



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI,
PROTECȚIEI SOCIALE ȘI
PERSOANELOR VÂRSTNICE
AMPOSDRU



Fondul Social European
POS DRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
NAȚIONALE
OIPOSDRU



Investește în oameni !

FONDUL SOCIAL EUROPEAN

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013

Axa prioritară 1: „Educația și formarea profesională în sprijinul creșterii economice și dezvoltării societății bazate pe cunoaștere”

Domeniul major de intervenție 1.5 "Programe doctorale și post-doctorale în sprijinul cercetării"

Titlul proiectului: „Q-DOC- Creșterea calității studiilor doctorale în științe ingineresti pentru sprijinirea dezvoltării societății bazate pe cunoaștere”

Contract : POSDRU/107/1.5/S/78534

Beneficiar: Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

FACULTATEA DE CONSTRUCȚII

Ing. Adina Popescu

TEZĂ DE DOCTORAT

STRUCTURI METALICE ACȚIONATE SEISMIC. RIGIDITATE LATERALĂ VS. AMORTIZARE ADĂUGATĂ

**Conducător științific,
Prof.dr.ing. Pavel Alexa**

Cuprins

Lista de figuri.....	II
Lista tabelor.....	VIII
Lista cu abrevieri și notații.....	IX
Abrevieri.....	XI
Capitolul 1. Introducere.....	1
1.1 Contextul tematic al cercetării.....	2
1.2 Obiective.....	6
1.3 Metodologie.....	8
1.4 Rezumatele capitolelor.....	14
Capitolul 2. Rigiditate versus amortizare în reducerea răspunsului seismic.....	17
2.1. Amortizarea inerentă și amortizarea adăugată.....	17
2.1.1 Amortizarea inerentă.....	18
2.1.2 Amortizarea adăugată.....	26
2.1.3 Disiparea energiei seismice.....	29
2.1.4 Amortizarea echivalentă a structurilor echipate cu amortizori vâscoși.....	36
2.1.5 Efectele amortizării adăugate asupra răspunsului seismic.....	38
2.2 Efectele rigidității laterale în răspunsul seismic.....	52
Capitolul 3. Capacitatea de absorbție energetică a structurii.....	68
3.1 Abordarea energetică. Bilanțul energetic.....	71
3.1.1 Componentele răspunsului seismic energetic al sistemelor cu un singur grad de libertate.....	74
3.1.2 Componentele răspunsului seismic energetic al sistemelor cu număr finit $n > 1$ de grade de libertate.....	77
3.2 Capacitatea de absorbție a energiei seismice.....	83
3.3 Capacitate de absorbție energetică vs. amortizare adăugată. Studii numerice.....	92
3.4 Capacitate de absorbție energetică vs. rigiditate laterală. Studii numerice.....	101
3.5 Coeficientul de modificare a capacității de absorbție energetică.....	113
Capitolul 4. Dualitatea rigidizare versus amortizare.....	121
4.1 Rigiditate vs. amortizare în răspunsul seismic.....	122
4.1.1 Gradarea rigidității laterale.....	122
4.1.2 Forța tăietoare seismică de bază vs. deplasări laterale.....	126
4.1.3 Starea energetică vs. deplasări laterale.....	129
4.2 Starea de rigiditate și starea de amortizare din punct de vedere al eficienței economice.....	132
4.2.1 Eficiența economică.....	135
4.2.2 Consumuri materiale structurale prin rigidizare laterală.....	137

4.3 Echivalarea rigidității laterale cu amortizarea adăugată pe baza deplasărilor relative de nivel.....	140
4.4 Echivalarea rigidității laterale cu amortizarea adăugată pe baza capacității de absorbție energetică.....	147
Capitolul 5. Contribuții și direcții viitoare de cercetare.....	153
5.1 Concluzii privind realizarea obiectivelor.....	153
5.2 Contribuții originale.....	154
5.3 Direcții de cercetare viitoare.....	158
Bibliografie.....	160

Lista de figuri

Figura 1.3-1 Energia de input a structurii 1, pentru accelerogramele Vrancea 1977, Focșani 1986 și Vrancea 1990.....	11
Figura 1.3-2 Structurile 1, 2 și 3 – de referință.....	11
Figura 1.3-3 Structurile rigidizate (+).....	11
Figura 1.3-4 Structurile contravântuite (cv.).....	12
Figura 1.3-5 Accelerograma Vrancea 4 martie 1977.....	14
Figura 1.3-6 Accelerograma Focșani 31 august.....	14
Figura 1.3-7 Accelerograma Vrancea 30 mai 1990.....	14
Figura 2.1-1 Mișcarea liberă a unui sistem GDL fără amortizare.....	19
Figura 2.1-2 Sistem cu un singur grad de libertate.....	21
Figura 2.1-3 Reprezentarea relației efort-deformație în cazul materialelor (a) elastice, (b) vâscoase și (c) vâsco-elastice.....	21
Figura 2.1-4 Determinarea capacității de amortizare.....	21
Figura 2.1-5 Modelarea controlului vibrațiilor: A) Pasiv, B) Activ, C) Semi-activ, D) Hibrid.....	29
Figura 2.1-6 Stări mecanice: (a) În echilibru în poziția de referință (b) Deformat față de poziția de referință (c) În mișcare de vibrație.....	29
Figura 2.1-7 Descreșterea amplitudinii sistemului oscilator.....	30
Figura 2.1-8 Energia disipată și energia de input în funcție de amplitudinea.....	34
Figura 2.1-9 Energia disipată.....	35
Figura 2.1-10 Reprezentarea reacțiunii totale FT.....	36
Figura 2.1-11 Variația deplasărilor relative de nivel a structurilor (A)1, (B)2 și (C)3. Vrancea 1977.....	40
Figura 2.1-12 Variația deplasărilor relative de nivel a structurilor (A)1, (B)2 și (C)3. Focșani 1986.....	40
Figura 2.1-13 Variația deplasărilor relative de nivel a structurilor (A)1, (B)2 și (C)3. Vrancea 1990.....	41

Figura 2.1-14 Variația accelerației relative laterale a structurii 1. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Focșani 1986.....	42
Figura 2.1-15 Variația accelerației relative laterale a structurii 2. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Focșani 1986.....	43
Figura 2.1-16 Variația accelerației relative laterale a structurii 3. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Focșani 1986.....	43
Figura 2.1-17 Variația accelerației relative laterale a structurii 1. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1977.....	44
Figura 2.1-18 Variația accelerației relative laterale a structurii 2. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1977.....	44
Figura 2.1-19 Variația accelerației relative laterale a structurii 3. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1977.....	45
Figura 2.1-20 Variația accelerației relative laterale a structurii 1 (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1990.....	45
Figura 2.1-21 Variația accelerației relative laterale a structurii 2. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1990.....	46
Figura 2.1-22 Variația accelerației relative laterale a structurii 3. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1990.....	46
Figura 2.1-23 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 1. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Focșani 1986.....	47
Figura 2.1-24 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 2. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Focșani 1986.....	47
Figura 2.1-25 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 3. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Focșani 1986.....	48
Figura 2.1-26 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 1 (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1977.....	49
Figura 2.1-27 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 2. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1977.....	49
Figura 2.1-28 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 3. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1977.....	50
Figura 2.1-29 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 1. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1990.....	50
Figura 2.1-30 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 2. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1990.....	51
Figura 2.1-31 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 3. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1990.....	51
Figura 2.2-1 Deplasări relative de nivel - structura (A)1, (B)2 și (C)3. Vrancea 1977.....	54

Figura 2.2-2 Deplasări relative de nivel - structura (A)1, (B)2 și (C)3. Focșani 1986.....	55
Figura 2.2-3 Deplasări relative de nivel - structura (A)1, (B)2 și (C)3. Vrancea 1990.....	55
Figura 2.2-4 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 1. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Focșani 1986.....	56
Figura 2.2-5 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 2. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Focșani 1986.....	57
Figura 2.2-6 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 3. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Focșani 1986.....	57
Figura 2.2-7 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 1. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1977.....	58
Figura 2.2-8 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 2. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1977.....	58
Figura 2.2-9 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 3. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1977.....	59
Figura 2.2-10 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 1. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1990.....	59
Figura 2.2-11 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 2. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1990.....	60
Figura 2.2-12 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 3. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1990.....	61
Figura 2.2-13 Structura investiției totale pentru diferite funcționalități structurale.....	61
Figura 2.2-14 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 1. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1977.....	63
Figura 2.2-15 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 2. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1977.....	63
Figura 2.2-16 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 3. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1977.....	64
Figura 2.2-17 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 1. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Focșani 1986.....	64
Figura 2.2-18 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 2. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Focșani 1986.....	65
Figura 2.2-19 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 3. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Focșani 1986.....	65
Figura 2.2-20 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 1. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1990.....	66
Figura 2.2-21 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 2. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1990.....	66

Figura 2.2-22 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 3. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1990.....	67
Figura 3.1-1 Distribuția energiei în structură.....	73
Figura 3.1-2 Sistem cu un singur grad de libertate.....	74
Figura 3.1-3 Sistem dinamic cu un singur grad de libertate.....	75
Figura 3.1-4 Sistem cu număr finit de grade de libertate.....	78
Figura 3.2-1 Circuitul energiei seismice.....	84
Figura 3.2-2 E_{ABS} vs. E_I structura 1. Vrancea 1977.....	85
Figura 3.2-3 E_{ABS} vs. E_I structura 2. Vrancea 1977.....	85
Figura 3.2-4 E_{ABS} vs. E_I structura 2. Focșani 1986.....	85
Figura 3.2-5 E_{ABS} vs. E_I structura 3. Focșani 1986.....	85
Figura 3.2-6 E_{ABS} vs. E_I structura 2. Vrancea 1990.....	86
Figura 3.2-7 E_{ABS} vs. E_I structura 3. Vrancea 1990.....	86
Figura 3.2-8 E_I structura 1. Focșani 1986.....	89
Figura 3.2-9 E_I structura 3. Vrancea 1977.....	89
Figura 3.2-10 E_I structura 3. Vrancea 1977.....	89
Figura 3.2-11 E_{ABS} structura 3. Vrancea 1977.....	89
Figura 3.2-12 E_{ABS}/E_I structura 1. Focșani 1986.....	90
Figura 3.2-13 E_{ABS}/E_I structura 1. Focșani 1986.....	90
Figura 3.2-14 Relația nivel de performanță seismică – intensitate seismică.....	91
Figura 3.3-1 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 1. Focșani 1986.....	93
Figura 3.3-2 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 2. Focșani 1986.....	93
Figura 3.3-3 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 3. Focșani 1986.....	94
Figura 3.3-4 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 1. Vrancea 1977.....	94
Figura 3.3-5 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 2. Vrancea 1977.....	95
Figura 3.3-6 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 3. Vrancea 1977.....	95
Figura 3.3-7 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 1. Vrancea 1990.....	96
Figura 3.3-8 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 2. Vrancea 1990.....	96
Figura 3.3-9 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 3. Vrancea 1990.....	97
Figura 3.3-10 E_K structura 1. Focșani 1986.....	97
Figura 3.3-11 E_S structura 1. Focșani 1986.....	97
Figura 3.3-12 E_K structura 2. Focșani 1986.....	98
Figura 3.3-13 E_S structura 2. Focșani 1986.....	98
Figura 3.3-14 E_K structura 3. Focșani 1986.....	98
Figura 3.3-15 E_S structura 3. Focșani 1986.....	98
Figura 3.3-16 E_K structura 1. Vrancea 1977.....	99
Figura 3.3-17 E_S structura 1. Vrancea 1977.....	99

Figura 3.3-18 E _K structura 2. Vrancea 1977.....	99
Figura 3.3-19 E _S structura 2. Vrancea 1977.....	99
Figura 3.3-20 E _K structura 3. Vrancea 1977.....	100
Figura 3.3-21 E _S structura 3. Vrancea 1977.....	100
Figura 3.3-22 E _K structura 1. Vrancea 1990.....	100
Figura 3.3-23 E _S structura 1. Vrancea 1990.....	100
Figura 3.3-24 E _K structura 2. Vrancea 1990.....	101
Figura 3.3-25 E _S structura 2. Vrancea 1990.....	101
Figura 3.3-26 E _K structura 3. Vrancea 1990.....	101
Figura 3.3-27 E _S structura 3. Vrancea 1990.....	101
Figura 3.4-1 Raportul E _{ABS} /E _I al structurii 1. Vrancea 1977.....	103
Figura 3.4-2 Raportul E _{ABS} /E _I al structurii 2. Vrancea 1977.....	104
Figura 3.4-3 Raportul E _{ABS} /E _I al structurii 3. Vrancea 1977.....	104
Figura 3.4-4 Raportul E _{ABS} /E _I al structurii 1. Focșani 1986.....	105
Figura 3.4-5 Raportul E _{ABS} /E _I al structurii 2. Focșani 1986.....	105
Figura 3.4-6 Raportul E _{ABS} /E _I al structurii 3. Focșani 1986.....	106
Figura 3.4-7 Raportul E _{ABS} /E _I al structurii 1. Vrancea 1990.....	107
Figura 3.4-8 Raportul E _{ABS} /E _I al structurii 2. Vrancea 1990.....	107
Figura 3.4-9 Raportul E _{ABS} /E _I al structurii 3. Vrancea 1990.....	108
Figura 3.4-10 E _K structura 1. Focșani 1986.....	108
Figura 3.4-11 E _S structura 1. Focșani 1986.....	108
Figura 3.4-12 E _K structura 2. Focșani 1986.....	109
Figura 3.4-13 E _S structura 2. Focșani 1986.....	109
Figura 3.4-14 E _K structura 3. Focșani 1986.....	109
Figura 3.4-15 E _S structura 3. Focșani 1986.....	109
Figura 3.4-16 E _K structura 1. Vrancea 1977.....	110
Figura 3.4-17 E _S structura 1. Vrancea 1977.....	110
Figura 3.4-18 E _K structura 2. Vrancea 1977.....	110
Figura 3.4-19 E _S structura 2. Vrancea 1977.....	110
Figura 3.4-20 E _K structura 3. Vrancea 1977.....	111
Figura 3.4-21 E _S structura 3. Vrancea 1977.....	111
Figura 3.4-22 E _K structura 1. Vrancea 1990.....	112
Figura 3.4-23 E _S structura 1. Vrancea 1990.....	112
Figura 3.4-24 E _K structura 2. Vrancea 1990.....	112
Figura 3.4-25 E _S structura 2. Vrancea 1990.....	112
Figura 3.4-26 E _K structura 3. Vrancea 1990.....	113
Figura 3.4-27 E _S structura 3. Vrancea 1990.....	113

Figura 3.5-1 C_a și C_r a structurii 1 acționată seismic prin Focșani 86, Vrancea 90 și Vrancea 77.....	117
Figura 3.5-2 C_a și C_r a structurii 2 acționată seismic prin Focșani 86, Vrancea 90 și Vrancea 77.....	118
Figura 3.5-3 C_a și C_r a structurii 3 acționată seismic prin Focșani 86, Vrancea 90 și Vrancea 77.....	119
Figura 4.1-1 A. Structura 1. B. Deplasarea nodului 42 a structurii 1. C. Interval perioadă.....	123
Figura 4.1-2 A. Structura 1. B. Deplasarea nodului 60 a structurii 2 C. Interval perioadă.....	123
Figura 4.1-3 A. Structura 1. B. Deplasarea nodului 78 a structurii 3 C. Interval perioadă.....	124
Figura 4.1-4 Ordonarea variantelor structurii 1 după rigiditate (prin deplasări laterale de nivel).....	124
Figura 4.1-5 Ordonarea variantelor structurii 2 după rigiditate (prin deplasări laterale de nivel).....	125
Figura 4.1-6 Ordonarea variantelor structurii 3 după rigiditate (prin deplasări laterale de nivel).....	125
Figura 4.1-7 Variația forței tăietoare seismice de bază în funcție de rigiditatea laterală a structurii 1. Vrancea 1990.....	126
Figura 4.1-8 Variația forței tăietoare seismice de bază în funcție de rigiditatea laterală a structurii 2. Vrancea 1990.....	127
Figura 4.1-9 Variația forței tăietoare seismice de bază în funcție de rigiditatea laterală a structurii 3. Vrancea 1990.....	128
Figura 4.1-10 E_{ABS}/E_I - depl. nod 42, structura 1.....	129
Figura 4.1-11 E_{ABS}/E_I - depl. nod 60, structura 2.....	129
Figura 4.1-12 E_{ABS}/E_I - depl. nod 78, structura 3.....	130
Figura 4.1-13 E_{ABS}/E_I - depl. nod 42, structura 1.....	130
Figura 4.1-14 E_{ABS}/E_I - depl. nod 60, structura 2.....	131
Figura 4.1-15 E_{ABS}/E_I - depl. nod 78, structura 3.....	131
Figura 4.1-16 E_{ABS}/E_I - depl. nod 42, structura 1.....	131
Figura 4.1-17 E_{ABS}/E_I - depl. nod 60, structura 2.....	131
Figura 4.1-18 E_{ABS}/E_I - depl. nod 78, structura 3.....	132
Figura 4.2-1 Variația costului de investiție în funcție de nivelul de performanță.....	134
Figura 4.2-2 Variația costului total al unei structurii.....	134
Figura 4.2-3 Rigiditate vs. consumul de material a structurii 1.....	136
Figura 4.2-4 Rigiditate vs. consumul de material a structurii 2.....	136
Figura 4.2-5 Rigiditate vs. consumul de material a structurii 3.....	138
Figura 4.2-6 Variația greutateii structurilor 1 ÷ 3.....	139
Figura 4.2-7 Variația greutateii structurilor echivalate 1 ÷ 3 (Str. A+). Focșani 1986.....	139
Figura 4.2-8 Variația greutateii structurilor echivalate 1 ÷ 3 (Str. C+). Vrancea 1977.....	140
Figura 4.2-9 Variația greutateii structurilor echivalate 1 ÷ 3 (Str. B+). Vrancea 1990.....	140
Figura 4.3-1 Variația deplasării relative de nivel a structurilor (A)1, (B)2 și (C)3. Vrancea 1977.....	141
Figura 4.3-2 Variația deplasării relative de nivel a structurilor (A)1, (B)2 și (C)3. Focșani 1986.....	142
Figura 4.3-3 Variația deplasării relative de nivel a structurilor (A)1, (B)2 și (C)3. Vrancea 1990.....	142
Figura 4.3-4 Structura 1 (Focșani 1986).....	145

Figura 4.3-5 Structura 2 (Focșani 1986).....	145
Figura 4.3-6 Structura 3 (Focșani 1986).....	145
Figura 4.3-7 Structura 1 (Vrancea 1977).....	145
Figura 4.3-8 Structura 2 (Vrancea 1977).....	146
Figura 4.3-9 Structura 3 (Vrancea 1977).....	146
Figura 4.3-10 Structura 1 (Vrancea 1990).....	146
Figura 4.3-11 Structura 2 (Vrancea 1990).....	146
Figura 4.3-12 Structura 3 (Vrancea 1990).....	147
Figura 4.4-1 E_{ABS} și E_I a structurii 3 de ref. (Vrancea 1990).....	148
Figura 4.4-2 E_{ABS} și E_I a structurii 3 de ref. (Focșani 1986).....	148
Figura 4.4-3 E_{ABS} și E_I a structurii 1 și 2 de ref. (Vrancea 1990).....	148
Figura 4.4-4 E_{ABS} și E_I a structurii 1- de ref., cv. și rig.....	148
Figura 4.4-5 Relația nivel de performanță seismică – intensitate seismică.....	148
Figura 4.4-6 Structura 1 (Focșani 1986).....	149
Figura 4.4-7 Structura 2 (Focșani 1986).....	149
Figura 4.4-8 Structura 3 (Focșani 1986).....	150
Figura 4.4-9 Structura 1 (Vrancea 1977).....	150
Figura 4.4-10 Structura 2 (Vrancea 1977).....	150
Figura 4.4-11 Structura 3 (Vrancea 1977).....	150
Figura 4.4-12 Structura 1 (Vrancea 1990).....	151
Figura 4.4-13 Structura 2 (Vrancea 1990).....	151
Figura 4.4-14 Structura 3 (Vrancea 1990).....	151

Lista tabelelor

Tabel 1.3-1 Caracteristicile accelerogramelor.....	14
Tabel 2.2-1 Perioada de vibrație a structurilor 1 ÷ 3, și a cutremurelor Focșani 1986, Vrancea 1990 și Vrancea 1977.....	53
Tabel 3.4-1 Perioada de vibrație a structurilor 1 ÷ 3, și a cutremurelor Focșani 1986, Vrancea 1990 și Vrancea 1977.....	104
Tabel 4.3-1 Perioada de vibrație a structurilor 1 ÷ 3 – Str. A+. Focșani 1986.....	143
Tabel 4.3-2 Perioada de vibrație a structurilor 1 ÷ 3 – Str. B+. Vrancea 1990.....	143
Tabel 4.3-3 Perioada de vibrație a structurilor 1 ÷ 3 – Str. C+. Vrancea 1977.....	144

Lista cu abrevieri și notații

Litere latine mici

a_g	Valoarea de vârf a accelerației seismice
c	Coeficientul de amortizare vâscoasă
c_c	Coeficientul de amortizare al dispozitivului activ
c_{cr}	Coeficientul de amortizarea critică
d_v	Capacitatea de amortizare pe unitate de volum
dL	este lucrul mecanic elementar
g	Accelerația gravitațională
k	Constanta elastică
k_c	Coeficientul de rigiditate al dispozitivului activ
m	Masa
\mathbf{r}	Vectorul coeficienților de influență
t	Timpul
$u(t)$	Deplasarea asociată masei m
$\mathbf{u}(t)$	Vectorul deplasărilor
$u_g(t)$	Deplasarea terenului
$u_t(t)$	Deplasarea totală (teren și structură)
u_0	Deplasarea la momentul $t=0$
$\dot{u}(t)$	Viteza asociată masei m
$\dot{\mathbf{u}}(t)$	Vectorul vitezelor
$\dot{u}_g(t)$	Viteza terenului
$\dot{u}_t(t)$	Viteza totală (teren și structură)
$\ddot{u}(t)$	Accelerația asociată masei m
$\ddot{\mathbf{u}}(t)$	Vectorul accelerațiilor
$\ddot{u}_g(t)$	Accelerația terenului
$\ddot{u}_t(t)$	Accelerația totală (teren și structură)
u_{st}	Deplasarea statică produsă de F_0

Litere latine mari

$A(t)$	Amplitudinea mișcării
\mathbf{C}	Matricea de amortizare liniar-vâscoasă
C_a	Coeficientul de modificare a capacității de absorbție energetică prin amortizare

C_r	Coeficientul de modificare a capacității de absorbție energetică prin rigidizare
D	Indice de degradare
E	Modul de elasticitate
E^*	Parametrul vâsco-elastic
E^\wedge	Parametrul histeretic
E'	Modulul de înmagazinare (a energiei), în fază cu efortul unitar σ
E''	Modulul de disipare (a energiei), în fază cu deformația ε
E_I	Energia indusă în sistem – de input
$E_{I,a}$	Energia de input absolută
$E_{I,r}$	Energia de input relativă
E_d	Energia disipată prin amortizare vâsco-elastică
E_K	Energia cinetică
$E_{K,a}$	Energia cinetică absolută
$E_{K,r}$	Energia cinetică relativă
$E_{S,e}$	Energia de deformație elastică
$E_{S,h}$	Energia de deformație inelastică
E_D	Energia disipată prin amortizare
E_{AD}	Energia disipată prin amortizare adăugată
E_{ND}	Energia înmagazinată
E_{DS}	Energia disipată
E_{ABS}	Capacitatea de absorbție a energiei
$F_i(t)$	Forța de inerție
$F_a(t)$	Forța de amortizare
$F_e(t)$	Forța elastică
$F_c(t)$	Forța de control activ
$F(t)$	Forța perturbatoare aplicată sistemului
F_0	Valoarea maximă a forței perturbatoare
$\mathbf{F}(t)$	Vectorul acțiunilor dinamice
$F_T(t)$	Reacțiune totală
\mathbf{K}_u	Matricea de rigiditate condensată
L_h	Lucrul mecanic efectuat prin deformațiile plastice
\mathbf{M}	Matricea inerțială
Q	Factorul de calitate (coeficientul de performanță)
R_ζ	Coeficientul de reducere a răspunsului seismic
R_s	Componenta răspunsului seismic
T	Perioada predominantă a cutremurului
T_c	Perioada de colț

T_1 Perioada fundamentală de vibrație a structurii

Litere grecești

ξ	Fracțiune de amortizare critică
ω	Frecvența proprie a vibrațiilor
σ	Variabila efort
ε	Variabila deformare
φ	Unghiul de defazare între efort și deformație
ε_0	Amplitudinea deformației
σ_0	Valoarea maximă a efortului unitar
σ_e	Efortul unitar elastic
σ_v	Efortul unitar vâscos
γ	Factorul de amortizare structurală
Ω	Frecvența oscilației forței de amortizare
δ	Starea de deplasare indusă
δ_u	Starea de deplasare ultimă

Abrevieri

ASCE	American Society of Civil Engineers
EC	Eurocod
FEMA	Federal Emergency Management Agency
INCERC	Institutului Național de Cercetare - Dezvoltare în Construcții
NERHP	National Earthquake Hazards Reduction Program
SLS	Starea limită de serviciu
SLU	Starea limită ultimă
Str. ref.	Structura de referință
Str. (5%) +	Str. rigidizată prin secțiuni (stâlpi, grinzi) transversale crescute
Str. A+	Structura echivalată prin rigidizare (secțiuni transversale crescute) cu o structură amortizată suplimentar ($\xi=10\%$), solicitată seismic prin cutremurul Focșani 1986
Str. B+	Structura echivalată prin rigidizare (secțiuni transversale crescute) cu o structură amortizată suplimentar ($\xi=10\%$), solicitată seismic prin cutremurul Vrancea 1990
Str. C+	Structura echivalată prin rigidizare (secțiuni transversale crescute) cu o structură amortizată suplimentar ($\xi=10\%$), solicitată seismic prin cutremurul Vrancea 1977
Str. cv.	Structura contavântuită

Str. (am.) 10% Structura cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=10\%$

Str. (am.) 15% Structura cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=15\%$

Str. (am.) 20% Structura cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=20\%$

Capitolul 1. Introducere

Activitatea de concepere și dimensionare a structurilor de construcții amplasate în zone seismice include o gamă foarte largă de tehnici, inovații, forme de reducere a răspunsului seismic al acestor construcții. Între acestea, adecvarea structurală este o abordare cu adevărat inginerească prin apelul limitat la secțiuni oricât de mari, prin limitarea superioară a rigidității laterale, prin mărginirea accesului la „rezistență”. Adecvarea structurală este – în abordarea tradițională a conceperii și proiectării structurilor - expresia unui echilibru al stărilor statice (rezistență) și cinematice (rigiditate). Creșterea secțiunilor transversale aduce, într-adevăr, un spor de rezistență dar, în același timp aduce și un spor de rigiditate. Sporul de rigiditate obținut fie prin dimensiuni sporite în secțiune fie prin contravântuiri are efecte complexe asupra răspunsului seismic al structurilor. Dacă, efectul – pozitiv – de reducere a deplasărilor relative de nivel constituie, de cele mai multe ori, un obiectiv în proiectarea structurală, creșterea, în același timp a accelerațiilor laterale este de cele mai multe ori un efect negativ al sporirii rigidității laterale. Efect negativ este și creșterea consumului material – de oțel, în cadrul cercetării întreprinse. Stadiul actual al dezvoltării protecției seismice oferă – prin amortizarea adăugată – o posibilitate de înscriere a structurii atât în parametrii de comportare (asociați, în primul rând SLS – stării limită de serviciu) cât și într-o stare de rigiditate asociată structurilor multi-etajate. Finalizarea studiului ingineresc referitor la structura concepută și abordarea protecției seismice înseamnă transformarea în costuri atât a amortizării cât și a consumului material. Costurile exprimă într-adevăr eficiența abordării adoptate, dar o face într-o formă simplistă care ascunde aspectul structural al efectului uneia sau a celeilalte opțiuni de abordare a protecției seismice. În etapa preliminară a proiectării structurale este necesară o echivalare a adoptării rigidității sporite și/sau a amortizării adăugate.

1.1 Contextul tematic al cercetării

Contextul tematic al cercetării poate fi exprimat succint în preocuparea – pe cât de veche, pe cât de actuală – de a reduce răspunsul seismic (valorile parametrilor care exprimă răspunsul seismic) fără a crește consumul material. Proiectantul structurii, executantul acesteia și beneficiarul constituie un adevărat sistem. Natura sistemică a grupului de mai sus este generată de câteva elemente, dintre care consumul material este printre cele mai importante. O analiză superficială a relației dintre consumul material structural și răspunsul seismic al

structurii, poate conduce la concluzia grăbită, total anti-inginerească și, de multe ori, falsă că secțiunile mari ale elementelor structurale înseamnă răspuns seismic redus. Relaționarea consumului material structural cu răspunsul seismic constituie prima parte a contextului tematic al cercetării întreprinse și cuprinse în teza de doctorat. A doua parte a contextului tematic este alcătuită din abordarea răspunsului seismic al structurilor metalice multi-etajate. În multe cazuri, răspunsul seismic înseamnă deplasarea laterală a structurii (răspuns seismic – legănarea sistemului „sway”) [1], [2], [3], [4], [5]. Echivalarea răspunsului seismic al structurilor înalte cu deplasările (absolute și chiar relative) este o înțelegere îngustă a conceptului de răspuns seismic – în ciuda faptului că este legiferată [6], [7], [8]. Autorul tezei propune – în această a doua parte – un criteriu sintetic de abordare a răspunsului seismic – criteriul energetic.

Relaționarea propusă a răspunsului seismic și a consumului material se realizează în teză, prin echivalarea rigidității laterale cu nivel de amortizare liniar-vâscoasă. Nivelul de amortizare (considerată liniar-vâscoasă) oferă o modalitate simplă de comparare a efectului acestui nivel de amortizare cu efectul rigidității laterale. Mai ales dacă acest efect înseamnă deplasări laterale. Mulțimea acestor parametri (deplasări laterale, rigiditate laterală, nivel de amortizare) poate fi sintetizată – într-un mod simplu și adecvat – într-o abordare energetică.

Protecția construcțiilor față de acțiunea cutremurelor este, din punct de vedere istoric, o activitate inginerească continuă cu succese și eșecuri memorabile ajungând, astăzi, la tehnici și tehnologii care sfidează chiar un principiu al Ingineriei Civile: construcțiile să fie cât mai fixate de terenul amplasamentului. O construcție obișnuită (clădiri, turnuri, etc.) nu poate fi concepută, proiectată și executată, cu grade de libertate cinematice, care să permită deplasări absolute (față de teren) sau relative (față de clădire) ale unor ansambluri ale construcției (unele față de altele). Și totuși, atribuirea unor grade de libertate construcției acționate seismic, poate avea efecte benefice din punct de vedere al îndeplinirii criteriilor de performanță impuse construcțiilor amplasate în zone seismice. Criteriile de performanță au avut, la rândul lor, o evoluție istorică spectaculoasă. *Avant la lettre*, metoda rezistențelor admisibile impunea respectarea, în primul rând, a stării statice a structurii, fiind focalizată înspre eforturi (unitare și secționale). Starea cinematică (deplasări maxime) era verificată *versus* valori impuse. Tehnologia de aplicare a metodei rezistențelor admisibile și rezultatele acesteia pot fi sintetizate în panaceul secțiuni mari/puternice. Într-adevăr, secțiunile transversale „puternice” asigură unei structurii, în general, o stare mecanică adecvată pentru o solicitare seismică dată, din punct de vedere static și cinematic. Metoda stărilor limită, mult mai analitică în ceea ce privește solicitările și verificarea „în secțiune” nu abandonează „bunul obicei” al secțiunilor

puternice. Starea mecanică a construcției caracterizată prin starea de eforturi (starea statică) și starea de deformații / deplasări (starea cinematică) a fost, recent, extinsă prin includerea stării de ductilitate. Aceasta (starea de ductilitate) poate asigura „supraviețuirea” unei structuri prin generarea în una sau mai multe secțiuni transversale a unor deformări post-elastice. Formarea zonelor plastice poate asigura, într-adevăr, supraviețuirea construcției, dar cu prețul implicat în activitatea de rehabilitare (a elementelor structurale și/sau a elementelor nestructurale) post-seism. Acceptarea – prin concepția structurală - și chiar prevederea – prin proiectarea în secțiune - a zonelor cu deformări plastice constituie o primă breșă în simplismul structură puternică \equiv structură adecvată. O secțiune plastifiată generează, la nivel local sau chiar global, un mecanism (local/global) care ajută, prin chiar gradul de libertate creat, la supraviețuirea construcției.

Tehnicile moderne de protecție seismică sintetizează, într-un anumit fel, conceptul secțiunilor puternice (care nu „cedează”) cu cel al acceptării formării zonelor plastice prin „externalizarea” fenomenului de plastificare. Acest fenomen – prin care se disipează o mare cantitate a energiei seismice de input – este dirijat înspre dispozitive special prevăzute, care nu fac parte din structura propriu-zisă și care pot prelua „deformări” plastice. Modul în care aceste dispozitive disipează energia seismică de input și conlucrează cu construcția, pe de-o parte și gradul de digitalizare a acestor dispozitive, pe de altă parte, încadrează dispozitivele în câteva clase de protecție seismică: protecție seismică pasivă, protecție seismică activă, protecție seismică semi-activă, protecție seismică hibridă. Adăugarea dispozitivelor de disipare a energiei seismice de input elimină necesitatea prevederii – prin proiectarea în secțiune – a zonelor de plastificare și deci, permit comportarea exclusiv în domeniul elastic a structurii acționate seismic. Intercalarea sistemelor de protecție seismică în structură nu a eliminat înclinarea investitorilor, proiectanților și a utilizatorilor înspre secțiuni „puternice”. În contextul actual al concepției structurilor și al impunerii unor niveluri de performanță ridicate, conceptul de structuri puternice a redevenit actual, iar rigidizarea corespunzătoare a stâlpilor și grinzelor poate duce la evitarea colapsului progresiv global al unei structuri în cadre. Cum altfel, decât prin secțiuni puternice poate fi asigurată o structură la acțiunea unor cutremure având indicele mediu de recurență $IMR = 475$ de ani? Cum altfel, decât prin secțiunile puternice căreia i-a fost provocată dispariția unui stâlp? În sfârșit, cum poate supraviețui o construcție supusă unor acțiuni teroriste decât prin stâlpi, grinzi, diafragme, adecvat dimensionate? Iată cum proiectarea pe bază de performanțe seismice (care implică seisme având indicele mediu de recurență de sute de ani) și solicitările noi la care sunt supuse construcțiile (explozii, tsunami, șocuri etc.) conduc la coabitarea unor structuri rigide cu

dispozitive moderne de protecție seismică și care - dintr-un anumit punct de vedere - flexibilizează structura, prin dispozitive de tip mecanism. Se ajunge astfel, la necesitatea unei stări mecanice complexe. O structură multi-etajată amplasată într-o zonă seismică, trebuie să îndeplinească simultan, un număr de condiții, unele contradictorii:

- Să fie suficient de „puternică” pentru a rezista solicitărilor tradiționale și mai recente;
- Să fie suficient de rigidă pentru a evita colapsul progresiv global;
- Să fie suficient de rigidă pentru a satisface condițiile de deplasări relative de nivel;
- Să fie prevăzută cu capacități/dispozitive de disipare a energiei seismice de input;
- Să nu fie solicitată în domeniul post-elastic pentru a permite o ocupare post-seism imediată;
- Să fie acceptabilă din punct de vedere a costurilor de investiții și mentenanță.

În același timp, o rigiditate excesivă a structurii (atinsă prin dimensionare în secțiune și/sau contravântuiri) înseamnă forțe seismice echivalente mari. Concepția structurală care înglobează atât structura cât și dispozitivele de protecție seismică trebuie să evidențieze un echilibru între rigiditate și capacitatea de disipare a energiei seismice conferită prin dispozitive mecanice. Un astfel de echilibru între structura propriu-zisă și dispozitivele mecanice cu care este prevăzută trebuie să se manifeste nu numai prin starea mecanică a structurii ci și prin bilanțul financiar. Bilanțul financiar este, prin chiar esența lui, implacabil și poate fi exprimat numai în cazuri complet cunoscute *a priori*. Oricum, bilanțul financiar este afectat de creșterea consumului de oțel generat de creșterea rigidității (laterale, în principal). Dar creșterea rigidității unei structuri metalice multi-etajate generează nu numai consecințe financiare ci și consecințe asociate stării energetice a structurii.

Starea energetică a structurii este un concept relativ nou în analiza și proiectarea structurilor multi-etajate amplasate în zone seismice. Deși au trecut mai mult de 50 de ani de la propunerea lui Housner [9] de abordare a răspunsului seismic prin capacitatea de absorbție a energiei seismice, starea energetică a structurii a devenit, doar recent un instrument de analiză și proiectare a structurilor [10], [11], [12], [13]. Prin dezvoltarea conceptelor energetice și a aparatului analitic de exprimare și evaluare a acestora, starea energetică a unei structuri acționate seismic este – în prezent – bine definită și distinctă de celălalte stări tradiționale: starea statică (de eforturi), starea cinematică (de deplasări, deformații), starea de stabilitate, starea de ductilitate. Starea energetică oferă, deja, posibilitatea atât a analizei seismice [14], [15], [16], [17] cât și a proiectării pe baze energetice [18], [19], [20], recent introduse în normativele de proiectare [21], [8], [22].

Cercetarea întreprinsă și cuprinsă în teza de doctorat propune o extindere a utilizării conceptelor energetice în evaluarea și compararea opțiunilor rigiditate vs. amortizare. Efectul spectaculos al aplicării oricăreia din aceste opțiuni în reducerea deplasărilor laterale induse seismic a împiedicat – într-o anumită măsură – verificarea și a altor consecințe ale rigidizării / amortizării adăugate. Starea energetică a structurii permite o incursiune profundă și extinsă a efectelor rigidizării / amortizării adăugate asupra răspunsului seismic al structurilor multi-etajate.

Referitor la structurile înalte. În ultimul secol, odată cu revoluția tehnologică și mutarea intereselor economice dinspre agricultură înspre industrie, s-a produs o migrare a populației către punctele urbane majore ale lumii. Acest lucru a generat aglomerarea excesivă a orașelor, obligând comunitatea inginerescă la găsirea unor soluții care să acomodeze spațiul urban noilor statistici demografice. Prin urmare, s-a dezvoltat un sistem de distribuție a structurilor pe verticală, sistem ce cuprinde atât spații tip *office*, cât și cele cu profil hotelier sau chiar rezidențial. Proiectarea acestor structuri – cu regim de înălțime ridicat - implică pe lângă o analiză complexă și materiale de construcții inovatoare, dispozitive de captare și disipare a energiei induse de vânt și/sau cutremur [23], [24], [25]. Problema prezentă la începuturile curentului „zgârie-nori” a fost lipsa acestor materiale inteligente și a dispozitivelor de amortizare, care au lăsat proiectanților doar o singură opțiune pentru reducerea răspunsului seismic al acestor structuri: rigidizarea. În timp, dezvoltarea tehnologiilor de disipare a vibrațiilor a condus la soluții inovatoare, performante și eficiente din punct de vedere economic. Dispozitivele de disipare a vibrațiilor disponibile în prezent sunt variate, iar modelarea sistemului de protecție poate fi abordat în nenumărate moduri: folosind masa acordată, amortizori vâscoși sau izolatori în bază. Aceste dispozitive de amortizare sunt dimensionate premergător fazei de executare, iar astfel se pot previziona deplasările structurii reale, și ale altor parametri ai răspunsului structural, pe când folosirea de materiale ultra-rezistente permite doar o aproximare vagă a capacității de amortizare a structurii.

Referitor la amortizare vs. contravântuire. Rigidizarea laterală a structurilor amplasate seismic nu se reduce doar la creșterea secțiunilor transversale a elementelor. Echiparea structurilor cu un sistem de contravântuiri este o soluție eficientă și frecvent utilizată, care conduce la reducerea deplasărilor relative de nivel ale structurilor amplasate în zone seismice. Însă eficientizarea răspunsului seismic nu implică doar reducerea deplasărilor relative de nivel. S-a constatat că cele mai importante distrugerii materiale sunt rezultatul accelerațiilor laterale. Analiza structurilor contravântuite comparativ cu cele ajutate de un sistem de disipare a energiei, dezvăluie complexitatea eficienței seismice [26], [20], [27]. Deși ambele metode

conduc la reducerea deplasărilor relative de nivel, echiparea cu dispozitive de amortizare adăugată produce diminuarea accelerațiilor laterale, a forței tăietoare seismice de bază și a momentului de răsturnare. Analizând cele două soluții se constată necesitatea utilizării acestor dispozitive de disipare a vibrațiilor, în special în cazurile în care sistemul de contravântuire este depășit. De asemenea, protecția seismică a structurilor care adăpostesc investiții considerabile (finisaje sau echipamente costisitoare) sensibile la accelerațiile laterale, prin contravântuire, este insuficientă. O mai bună informare asupra problemei proiectării seismice, a riscurilor la care sunt supuse structurile și a avantajelor prezentate de dispozitivele de amortizare ar conduce la folosirea pe scară largă a acestor echipamente și la reducerea costurilor acestora.

Referitor la principiile sustenabilității. Adoptarea rigidizării laterale ca soluție pentru optimizarea seismică a acestor structuri înalte vine în contradicție, însă, cu principiile sustenabilității în construcții [28]. Proiectarea sustenabilă a construcțiilor amplasate în zone active seismic, nu înseamnă rigidizarea lor la cel mai înalt nivel, pentru a preveni orice risc de prăbușire sau distrugere a elementelor. Principiile sustenabilității (folosirea materialelor locale, durabile și reciclabile, proiectarea și amplasarea eficientă, integrarea de sisteme care reduc consumul de resurse, etc.), descalifică soluțiile de proiectare care conduc la abuzul inutil de resurse. O definiție sugestivă a sustenabilității, relevantă în cazul construcțiilor amplasate seismic, este: „perfectiunea nu este atinsă atunci când nu mai este nimic de adăugat, ci doar când nu mai este nimic de scos” (Antoine de Saint- Exupery). Prin urmare, proiectarea unei structuri cu adevărat sustenabilă implică conceperea unui sistem care să îmbine cele două funcții: minim de consum și maxim de eficiență. Dispozitivele de protecție seismică atașate unui sistem structural, reduc parametrii răspunsului seismic, respectând în același timp aceste principii.

1.2 Obiective

Obiectivele pre-stabilite ale cercetării întreprinse derivă din pseudo-dilema RIGIDITATE sau AMORTIZARE? Activitatea de proiectare a structurilor este – între numeroasele activități profesionale – una dintre cele mai puternic normate. Prevederile / prescripțiile de proiectare în domeniul structurilor de construcții provin din multiple surse (Eurocoduri, Standarde Naționale), sunt numeroase, iar comentariile depășesc, prin volumul lor, prescripțiile. În cazul structurilor multi-etajate, un aspect important asupra căruia se focalizează prevederile normative îl constituie deplasările laterale absolute și relative ale acestor structuri. Respectarea prevederilor referitoare la deplasările laterale (verificarea la SLS)

este, în comunitatea profesională a inginerilor proiectanți de structuri, o temă actuală. Prin formulările prescripțiilor de proiectare și prin domeniile de valori ale unor parametri structurali (rigiditate E_i de exemplu), proiectantul este aproape obligat să apeleze la creșterea rigidității laterale a structurilor multi-etajate (prin creșterea parametrului E_i) pentru a satisface cerințele SLS. Dar, creșterea rigidității laterale a structurilor multi-etajate, conduce și la alte consecințe decât cele (așteptate) ale reducerii deplasărilor laterale absolute și relative. Aceste alte consecințe (reducerea perioadelor de vibrații, de exemplu) nu sunt în mod necesar favorabile. Acesta este contextul în care opțiunea (proiectantului) pentru RIGIDITATE sau pentru AMORTIZARE este referită ca o pseudo-dilemă. În același timp, acesta este contextul și sursa în care pot fi definite cele trei obiective principale ale prezentei teze de doctorat:

1. Echivalarea rigidității laterale conferite structurilor metalice multi-etajate prin secțiuni transversale crescute cu un nivel de amortizare vâscoasă;
2. Echivalarea pe baze energetice a efectului rigidizării structurilor metalice multi-etajate cu efectul amortizării adăugate;
3. Analiza eficienței economice comparative a structurilor metalice multi-etajate.

Obiective secundare

Autorul tezei consideră că realizarea primelor obiective principale necesită stabilirea și rezolvarea unor obiective secundare.

1. Primul obiectiv principal (echivalența rigiditate laterală - nivel de amortizare vâscoasă) necesită o incursiune – minimă ca extindere și profunzime - în conceptul de amortizare structurală (inerentă și adăugată);
2. Deși abordarea energetică a răspunsului seismic al structurilor nu mai constituie o noutate, rezolvarea celui de-al doilea obiectiv principal necesită o analiză – limitată – a stării energetice a structurilor multi-etajate. Această analiză va fi focalizată asupra influenței rigidității laterale și a amortizării adăugate asupra stării energetice a structurilor metalice multi-etajate;
3. Echivalarea pe baze energetice a efectelor rigidității laterale și a nivelului de amortizare vâscoasă asupra stării mecanice a structurii necesită un studiu al *capacității de absorbție energetică* a unei structuri multi-etajate acționate seismic.

Realizarea obiectivelor propuse necesită o abordare teoretică a răspunsului seismic și un set larg de analize numerice care să asigure relevanța rezultatelor și a concluziilor. O astfel de abordare a realizării obiectivelor precum și un oarecare grad de întrepătrundere a

obiectivelor menționate mai sus conduc la necesitatea evidențierii clare a realizării acestora. În același timp, autorul subliniază că aceleași formulări și aceleași rezultate se pot constitui în „dovezi” ale realizării a două obiective distincte.

1.3 Metodologie

Creșterea rigidității prin secțiuni transversale dezvoltate este exprimată în consum de material (oțel) al structurii. Îndeplinirea nivelurilor ridicate de performanță necesită, în general, fie un consum ridicat de oțel (în cazul structurilor metalice), fie oțel de clase superioare, fie o îmbinare a celor două cerințe. Respectarea prevederilor referitoare la deplasările relative de nivel este cel mai relevant exemplu în acest sens, având în vedere dificultatea îndeplinirii acestui criteriu de performanță, prin structuri flexibile. Într-o astfel de situație proiectantul tradițional apelează fie la adoptarea unei structuri cu o rigiditate laterală ridicată fie la contravântuire. Ambele soluții tehnice înseamnă consumuri materiale (de oțel, în acest caz) ridicate. Același nivel de performanță, poate fi, însă, îndeplinit prin amortizare suplimentară. Cum pot fi echivalate cele două stări mecanice (rigiditate sporită/amortizare suplimentară)? Care este criteriul care exprimă optim o astfel de echivalare?

Echivalarea în termeni economici a uneia din cele mai eficiente tehnici de protecție seismică pasivă – amortizarea adăugată de tip vâscos - poate fi realizată prin compararea costurilor implicate de echiparea cu amortizori cu costurile asociate consumului material (presupus crescut) în cazul rigidizării prin secțiuni crescute. Echivalarea constă în evaluarea componentelor răspunsului seismic obținute prin dimensionare în secțiune sau prin amortizare adăugată. Analiza întreprinsă urmărește printr-un set larg de studii numerice obținerea prin fiecare din cele două abordări (dimensionare în secțiune/amortizare vâscoasă adăugată) a aceleași stări mecanice. Starea mecanică a unei structuri acționate seismic se exprimă – în mod tradițional - prin parametri statici (eforturi secționale, eforturi unitare, forță seismică tăietoare de bază, forțe seismice static echivalente de nivel) și parametrii cinematici (deplasări laterale absolute, deplasări laterale relative de nivel, accelerații de nivel). Abordarea, în teza de doctorat, a primului obiectiv principal propus se realizează atât prin folosirea acestor parametri, cât și prin utilizarea unor parametri asociați abordării energetice a răspunsului seismic. Realizarea celui de-al doilea obiectiv principal necesită dezvoltarea conceptului de stare energetică și corelarea acestuia cu starea de rigiditate. Abordarea simultană a celor două aspecte (rigiditate, amortizare) considerate nu poate fi realizată prin referirea la starea mecanică de eforturi și de deformații. Este necesară introducerea și dezvoltarea conceptului de stare

energetică capabilă să implice simultan atât caracteristicile de rigiditate cât și cele de amortizare ale structurii acționată seismic. Utilizarea conceptului de stare energetică în analiza răspunsului seismic din punctul de vedere al contribuției rigidității laterale și a amortizării adăugate se constituie într-un instrument cuprinzător și versatil al acestei analize.

Starea energetică a structurilor acționată seismic este un concept relativ nou. Din punct de vedere istoric, prima abordare energetică a efectelor seismice asupra structurilor datează din 1956 [9]. Conceptul energetic în analiza seismică și proiectarea anti-seismică a structurilor a cunoscut o dezvoltare rapidă [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36] ajungându-se azi la faza de *proiectare pe baze energetice* a structurilor amplasate în zone seismice [16], [37], [38], [15], [39]. Parametrul energetic care s-a impus în această nouă abordare este capacitatea de absorbție a energiei seismice de input. Evaluarea, în general, a stării energetice este, prin chiar parametrul energie, mai complexă decât evaluările bazate pe parametri statici sau cinemati. Într-adevăr parametrul energie este mai cuprinzător și, deci mai expresiv decât orice parametru static sau cinematic având în vedere că energia unui sistem mecanic sintetizează și procesează un spectru larg de parametri asociați caracteristicilor elastice (rigiditate/flexibilitate), de inerție (mase și distribuția acestora), cinematice (viteze) și de amortizare (inerentă și adăugată). Echivalarea pe baze energetice a efectului rigidizării este, de asemenea, un obiectiv al cercetării întreprinse și incluse în teză. Dacă satisfacerea – prin proiectarea structurală – a unor criterii și niveluri de performanțe seismice se poate obține, simplu, prin secțiuni transversale adecvate, efectul real al rigidității sporite trebuie evaluat atât prin componenta sa, în general pozitivă, de reducere a deplasărilor relative de nivel cât și prin componenta sa energetică, mai realistă și nu în mod necesar pozitivă. Aceiași structură, din punct de vedere al geometriei sale generale, a încărcărilor gravitaționale și a specificității seismice al amplasamentului, dar concepută în două stări diferite de rigiditate (laterală) va avea stări energetice diferite. Cantitatea de energie introdusă în structură de un cutremur depinde profund atât de caracteristicile (elastice, inerțiale, de amortizare) structurii cât și de caracteristicile acțiunii seismice. Aceleași structuri analizate seismic i se pot induce cantități diferite de energie seismică în funcție de cutremurul la care este solicitată – Fig. 1.3-1.

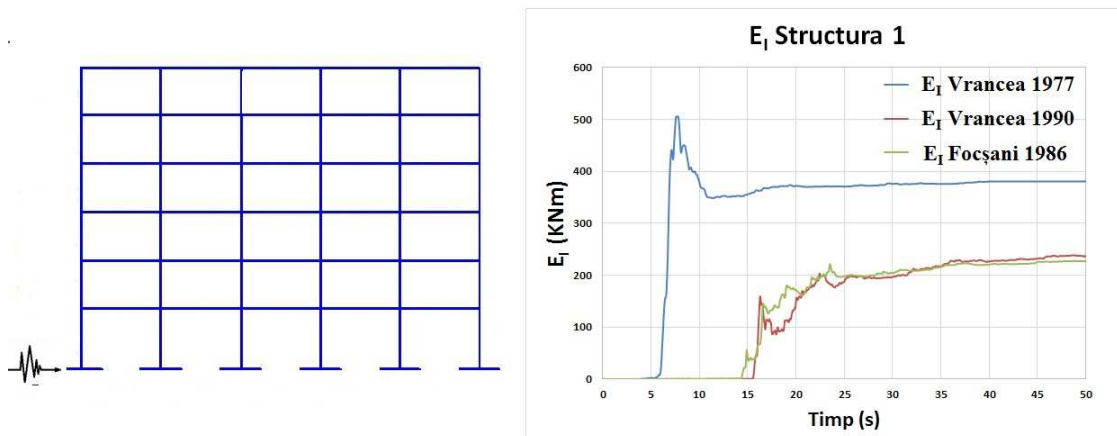


Figura 1.3-1 Energia de input a structurii 1, pentru accelerogramele Vrancea 1977, Focșani 1986 și Vrancea 1990

Ideea simplă, și chiar simplistă, că cerințele specifice SLS pot fi îndeplinite prin procedee tradiționale (creșterea dimensiunilor secțiunilor transversale, contravântuiri) trebuie evaluată într-un context mai larg care să includă și starea energetică a structurii. O structură „mai rigidă” poate atrage mai multă energie seismică decât una „flexibilă”. O cantitate mai mare de energie seismică de input trebuie, la rândul său, evaluată prin componentele structurale ale energiei: energia cinetică, energia de deformație, energia disipată prin amortizare. Implicarea într-o astfel de evaluare a conceptului de **capacitate de absorbție energetică** [16], [40] și a principiilor proiectării pe baze energetice a structurilor este în măsură să genereze într-adevăr, concluzii relevante referitoare la efectele rigidizării crescute a unei structuri. Oricărei structuri trebuie să i se asigure – prin proiectare - o capacitate suficientă de absorbție a energiei seismice de input. Componentele energie cinetică (E_K) și energie de deformare elastică ($E_{S,e}$) nu sunt absorbite de structură, ceea ce conduce, de fapt, la mișcarea de vibrație a structurii acționată seismic. Reducerea acestei mișcări se poate realiza asigurând structurii o capacitate de absorbție suficientă. Un astfel de context energetic oferă un cadru mai larg și mai riguros de evaluare a efectelor creșterii rigidității laterale a unei structuri multi-etajate. Într-o exprimare simplă și directă: structura mai rigidă poate avea o capacitate de absorbție energetică mai mică decât structura mai flexibilă. Relația rigiditate – capacitate de absorbție energetică trebuie, totuși, analizată în funcție de cutremurul de proiectare.

Metodologia prezentată mai sus implică, așa cum s-a menționat, formulări teoretice și analize numerice ale căror rezultate formează un set minim pe baza căruia să poată fi formulate concluzii asupra obiectivelor propuse. În analizele numerice principalul instrument de lucru este programul SAP2000 prin care sunt efectuate analize de tip *time-history* asupra unui set de structuri multi-etajate acționate de câteva cutremure de referință. Setul de structuri analizate

cuprinde structuri de referință, structuri rigidizate prin secțiuni transversale mari, structuri contravântuite și structuri echipate cu amortizare adăugată liniar-vâscoasă.

În subcapitolul precedent se vorbește despre subiectele – obiectivele – tratate în această teză. Deși enumerarea a conținut explicații mai detaliate, în mare cercetarea prezentă se referă la :

- Comportamentul structurilor metalice multi-etajate în zone cu activitate seismică;
- Răspunsul energetic al structurilor solicitate seismic;
- Abordarea economică a protecției seismice a structurilor.

Studiile numerice realizate pentru atingerea acestor obiective au implicat analize dinamice pentru mai multe tipuri de structuri. Astfel s-a adoptat o gamă de structuri variată din punct de vedere geometric, cu trei structuri având 5 deschideri și 6, 9, respectiv 12 niveluri (Fig. 1.3-2). Toate aceste structuri au fost proiectate în conformitate cu cerințele în vigoare și folosind spectrele seismice date de Normativul P100 – 1/2006 asociate unui amplasament caracterizat prin parametri $a_g = 0,24g$ și $T_c = 0,16$ [s].

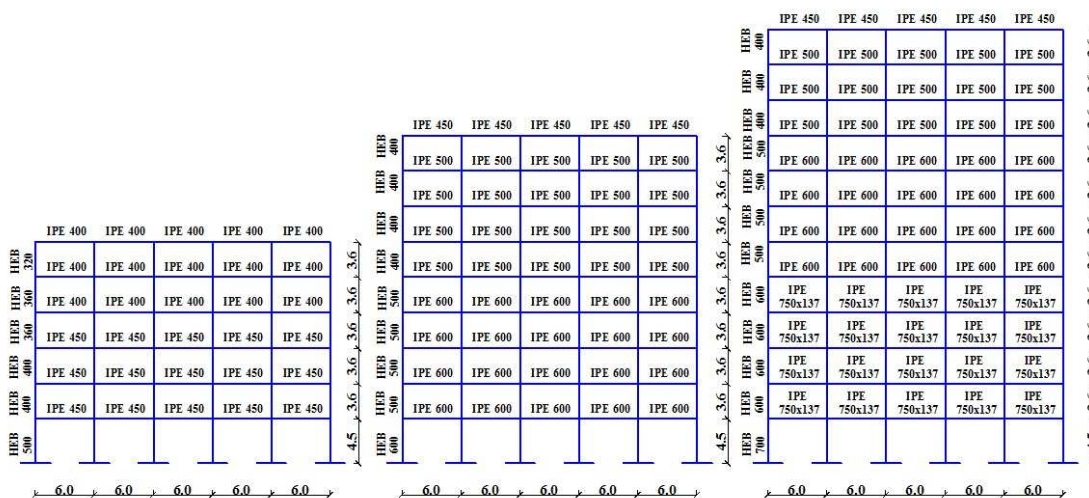


Figura 1.3-2 Structurile 1, 2 și 3 – de referință

Analizele de tip *time-history* folosind accelerogramele înregistrate în România în perioada 1977 – 1990, evidențiază o depășire a limitelor maxime admise pentru deplasările relative de nivel ale structurilor de mai sus. Respectarea – în totalitate – a cerințelor cinematice necesită echiparea acestor structuri cu amortizare suplimentară sau rigidizarea lor. Creșterea rigidității laterale a structurilor de mai sus – numite de referință – s-a realizat pe două căi distincte:

- Prin creșterea secțiunilor transversale ale elementelor structurale – stâlpi, rigle (Fig. 1.3-3);
- Prin contravântuirea în X a deschiderii centrale a structurilor (Fig. 1.3-4).

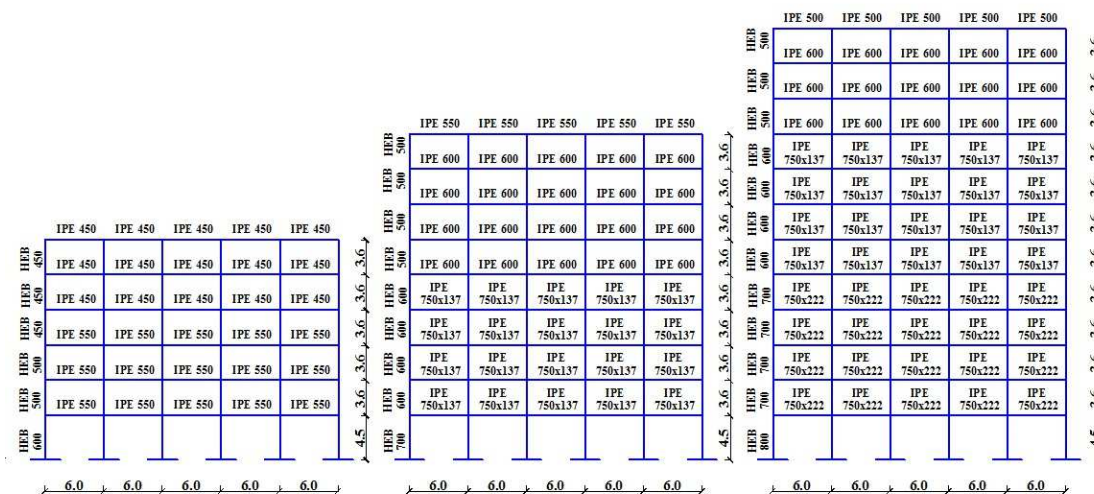


Figura 1.3-3 Structurile rigidizate (+)

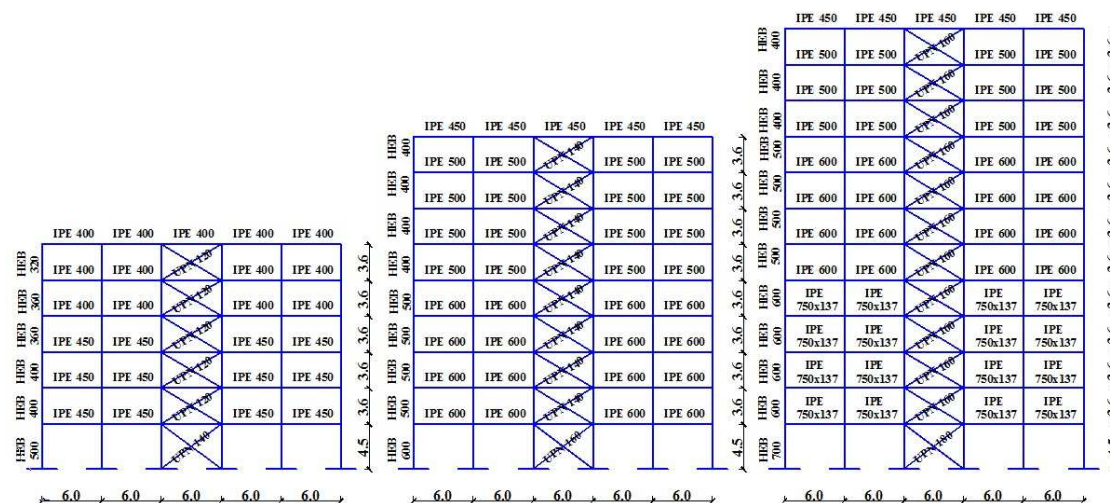


Figura 1.3-4 Structurile contravântuite (cv.)

Studiile numerice întreprinse încearcă să evidențieze avantajele amortizării suplimentare a structurilor metalice multi-etajate în comparație cu alte metode de proiectare anti-seismică. Astfel, se realizează un scurt sumar al pașilor parcurși în metodologia de lucru:

- Proiectarea unui set de structuri de referință, cu un procent de amortizare inerentă de 5%;
- Echiparea structurilor de referință cu 3 tipuri de protecție anti-seismică: rigidizarea prin mărirea secțiunilor grinzilor și stâlpilor, echiparea acestora cu contravântuiri și introducerea amortizării suplimentare ($\xi = 20\%$);

- Impunerea unui nivel de amortizare adăugată treptat: $\xi = 10\%$, 15% și 20% ;
- Analiza *time-history* a acestor structuri pentru obținerea rezultatelor în forma mai multor parametri, direcți sau sintetici.

În Capitolul 4, al tezei de doctorat este întreprins un nou set de analize, realizate pentru echivalarea structurilor rigidizate cu cele amortizate suplimentar din punctul de vedere a deplasărilor relative de nivel. Pașii parcurși pentru acest demers sunt:

- Proiectarea unui set de structuri de referință, cu un procent de amortizare inerentă de 5% (se folosesc structurile de referință de la studiul precedent);
- Adăugarea unui procent de amortizare suplimentar structurilor de referință ($\xi = 10\%$);
- Alinierea graficului deplasării relative de nivel al structurii amortizate cu cel al unei structuri rigidizate prin creșterea secțiunilor transversale ale unor structuri notate "Str. A+" – pentru structurile acționate seismic prin cutremurul Focșani 1986; "Str. B+" - pentru structurile solicitate prin cutremurul Vrancea 1990 - și "Str. C+" - pentru structurile acționate seismic de cutremurul Vrancea 1977.

Ipotezele adoptate în aceste analize sunt următoarele:

- Material liniar-elastic;
- Amortizare liniar-vâscoasă (proporțională). Frațiunea de amortizare critică inițială – de referință - $\xi = 5\%$;
- Modelarea structurii este efectuată cu elemente finite de tip bară cu șase grade de libertate dinamică (3+3);
- Analizele structurale întreprinse sunt de tip geometric-liniar, metoda *time-history* modal (Fast Nonlinear Analysis). Integrare iterativă cu pasul $\Delta t = 0,02$ [s] și criteriul de convergență $\varepsilon = 10^{-5}$.

Accelerogramele selectate pentru realizarea analizelor *time-history*, sunt pe primele trei poziții în clasamentul seismelor înregistrate în România ca magnitudine.

1. Vrancea 4 martie 1977 (sursa INCERC București) cu perioada predominantă $T = 1.16$ [s];
2. Focșani 31 august 1986 (sursa INCERC București) cu perioada predominantă $T = 0.55$ [s]
3. Vrancea 30 mai 1990 (sursa INCERC București) cu perioada predominantă $T = 0.60$ [s].

Accelerogramele Focșani 1986 și Vrancea 1990 au fost scalate pentru a atinge maximul accelerației terenului la valoarea 0,24g.

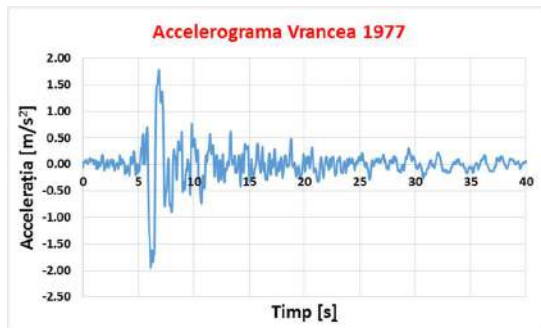


Figura 1.3-5 Accelerograma Vrancea 4 martie 1977

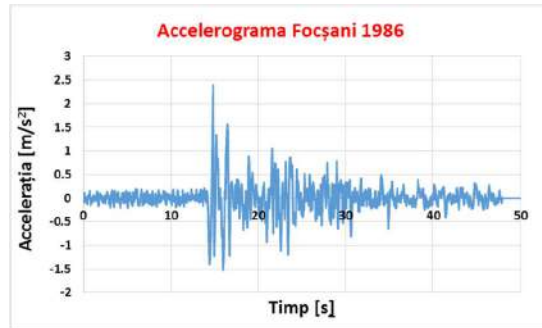


Figura 1.3-6 Accelerograma Focșani 31 august 1986

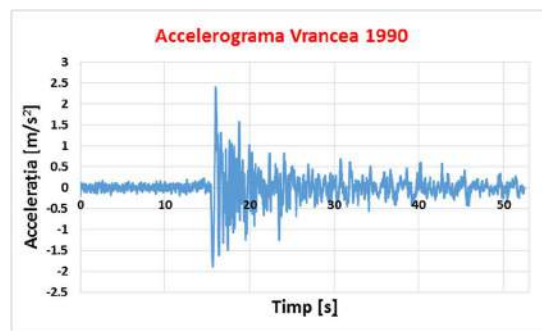


Figura 1.3-7 Accelerograma Vrancea 30 mai 1990

Tabel 1.3-1 Caracteristicile accelerogramelor

Accelerogramă	Vrancea 1977	Focșani 1986	Vrancea 1990
Data	4 Martie 1977	31 August 1986	30 Mai 1990
Acc. maximă (cm/s ²)	0.19g	0.24g	0.24g
Perioada predominantă (s)	1.16	0.50	0.66

1.4 Rezumatele capitolelor

Capitolul 1. Acest capitol conține patru subcapitole care descriu contextul tematic, obiectivele și metodologia cercetării întreprinse, aliniindu-se astfel cerințelor de editare a unei teze de doctorat. Autorul consideră că o extindere a viziunii proiectării seismice este necesară în comunitatea inginerilor constructori. Considerarea rigidizării laterale ca principala opțiune pentru proiectarea anti-seismică, conduce la risipă și ineficiență structurală. Prejudecățile cu privire la implicațiile economice necesare echipării cu amortizare adăugată și nivelul scăzut al educării în acest domeniu, rezultă în evitarea implementării unor soluții eficiente atât din punct de vedere economic cât și din punct de vedere al reducerii răspunsului seismic. Printre

argumentele prezentate se menționează și nevoia menținerii unui caracter sustenabil în proiectarea anti-seismică. De asemenea, cerința crescândă a proiectelor cu nivel ridicat de complexitate implică constrângerea de a identifica soluții ingenioase acoperitoare. Sunt prezentate obiectivele cercetării, atât cele principale cât și cele secundare. Intenția autorului este de a înțelege conceptele energetice și cele privind amortizarea structurală pentru a identifica un loc comun între rigiditatea laterală și amortizarea adăugată a structurilor acționate seismic. Analiza eficienței economice se realizează utilizând ca măsură procentul de investiție. Metodologia prezintă ipotezele studiilor numerice întreprinse în teză. Este descrisă geometria structurilor analizate și încărcările la care sunt supuse - acțiunile seismice fiind în special detaliate. Ipostazele structurilor enumeră atât patru niveluri de amortizare cât și modelele rigidizate lateral cu ajutorul contravântuirilor și secțiunilor transversale crescute.

Capitolul 2. Elementele teoretice premergătoare studiilor numerice sunt prezentate în mai multe subcapitole succesive. Primul subcapitol cuprinde atât fundamentele teoretice dinamice care definesc amortizarea inerentă a unei structuri cât și abordarea energetică a acestui aspect. În subcapitolul următor se descrie metoda de estimare a capacității de amortizare a unei structuri cu / sau fără elemente de disipare a energiei. Studiile numerice întreprinse enumeră 54 de analize seismice, asupra a trei structuri, în șase ipostaze de modelare (structura de referință, structura contravântuită, structura rigidizată prin secțiuni transversale crescute și cele trei structuri cu amortizare adăugată $\xi=10\%$, $\xi=15\%$, $\xi=20\%$), solicitate la trei acțiuni seismice. Obiectivul acestor analize este surprinderea răspunsului tradițional al structurilor metalice multi-etajate reprezentat de:

- Deplasări relative de nivel
- Forța tăietoare seismică de bază
- Accelerația laterală de nivel

Capitolul 3. În introducerea acestui capitol sunt prezentate elementele conceptului energetic. Bilanțul energetic al unei structuri și alcătuirea acestuia sunt descrise atât pentru sistemele cu un singur grad de libertate cât și pentru cele cu număr finit de grade de libertate. Capacitatea de absorbție energetică este aprofundată, iar elementele acesteia pentru cazul specific al studiilor numerice efectuate sunt definite. Analizele seismice realizate în Capitolul 2 sunt reluate, de această dată, pentru surprinderea parametrilor răspunsului energetic, și anume:

- Capacitatea de absorbție a energiei induse seismic – E_{ABS}/E_I ;
- Energia cinetică E_K ;
- Energia de deformație elastică E_S .

În ultimul subcapitol se propune un coeficient de modificare a capacității de absorbție a energiei seismice a structurilor metalice multi-etajate. Utilitatea acestuia este conferită de capacitatea de a exprima fidel variația stării energetice în raport cu acțiunea seismică și, în același timp, cu starea de rigiditate / amortizare a structurii. Se enunță studiile teoretice premergătoare acestei propuneri, care includ formulări ale unor criterii deja existente.

Capitolul 4. Acest Capitol sintetizează studiile numerice întreprinse în teză în mai multe subcapitole care tratează pe rând: compararea răspunsului seismic și a celui energetic al tuturor structurilor analizate în teză, compararea eficienței economice și echivalarea rigidității laterale cu amortizarea adăugată în baza a două criterii – deplasare relativă de nivel și capacitatea de absorbție a energiei induse seismic. Echivalarea rigiditate vs. amortizare în funcție de deplasări este realizată prin proiectarea unui set de 9 structuri, care îndeplinesc cu exactitate limitele parametrului deplasare relativă de nivel corespunzătoare unui nivel de amortizare de 10%, în toate cazurile de solicitare seismică studiată.

O incursiune scurtă în domeniul analizei costurilor implicate în proiectarea anti-seismică este realizată premergător comparațiilor economice.

Capitolul 5. În acest ultim capitol sunt enunțate concluziile cu privire la îndeplinirea obiectivelor propuse în primul capitol. Echivalarea stării de rigiditate cu cea de amortizare se realizează din mai multe puncte de vedere. Acesta ar fi primul din cele 5 obiective propuse și realizate. Direcțiile viitoare de cercetare enumeră aprofundarea studiilor economice de comparare a amortizării și rigidizării, în sfera costurilor.

Capitolul 2. Rigiditate versus amortizare în reducerea răspunsului seismic

Reducerea răspunsului seismic al structurilor multi-etajate prin adecvarea rigidității laterale este un procedeu simplu de aplicat, des folosit și încă prevăzut în normele de proiectare [6], [8]. Prin „manipularea” rigidității laterale, inginerul proiectant controlează în principal răspunsul seismic în deplasări (absolute și relative) laterale. Operația de reducere a deplasărilor laterale prin creșterea rigidității laterale constă – de fapt – în creșterea dimensiunilor secțiunilor transversale ale stâlpilor și reprezintă, încă, o opțiune frecventă în activitatea de proiectare. În acest context autorul tezei consideră că prezentarea comparativă a efectelor rigidizării laterale versus amortizare adăugată în încercarea de a controla răspunsul seismic este o acțiune nu numai oportună ci și utilă. O astfel de comparație constituie obiectivul specific al acestui Capitol 2. Deși reducerea răspunsului seismic prin amortizare adăugată nu mai este, ea însăși, o tehnologie nouă, autorul consideră necesară o prezentare succintă și specifică a amortizării adăugate. În acest fel prezentarea fenomenului de amortizare și a efectelor amortizării adăugate ocupă – prin extinderea sa – un spațiu mult mai mare decât cel rezervat rigidității.

2.1. Amortizarea inerentă și amortizarea adăugată

Fenomenele de tip interacțiune (cum este și amortizarea vibrațiilor) sunt tratate în Mecanică prin modele matematice adecvate. Un obiectiv secundar al acestui Capitol este prezentarea unor modele matematice ale amortizării. Sunt prezentate sursele / cauzele care generează amortizare și modelele matematice asociate. Amortizarea și matematica asociată se referă, în principal, la tipurile de amortizare cel mai adesea folosite în analiza seismică a structurilor: amortizarea liniar - vâscoasă și amortizarea histeretică. O matematică / algebră folosind mărimi / numere complexe și care modelează fenomenul amortizării este adaptată modelării amortizării și creează un instrument simplu pentru abordarea amortizării în analiza răspunsului seismic al structurilor într-un produs informatic curent. Într-un astfel de produs (program de calcul) amortizarea este modelată prin valoarea fracțiunii de amortizare critică. În acest context, autorul tezei consideră că o prezentare a amortizării liniar vâscoase (inerente și adăugate) și a modelării acesteia este necesară și utilă în înțelegerea abordării energetice a dualității rigidizare versus amortizare – un obiectiv principal al cercetării întreprinse.

2.1.1 Amortizarea inerentă

Amortizarea este un fenomen prin care energia cinetică este disipată și convertită, de obicei, în energie termică. Este un sistem de protecție al structurii, care diminuează efectele încărcărilor la care este supusă. Cunoașterea nivelului de amortizare dintr-un sistem dinamic este importantă în utilizarea, analiza și testarea acestuia. Natura și nivelul amortizării sunt informații de amplă relevanță, necesare pentru construirea unui model dinamic al sistemului structural. Calculul capacității de amortizare a structurilor este foarte relevant pentru obținerea unei imagini a comportamentului acestora la încărcările uzuale. Dar în cazul construcțiilor supuse la încărcări dinamice, precum vântul, vibrațiile cauzate de trafic sau activitatea seismică, cunoașterea capacității structurii de amortizare, sau a necesarului acesteia, este de majoră importanță [41]. Potențialul de amortizare structural trebuie cunoscut și condus la performanțe sporite prin alegerea materialului, soluțiilor tehnice în ceea ce privește dispunerea și legarea elementelor, sau chiar adăugarea de echipamente suplimentare care ajută la disiparea vibrațiilor.

Capacitatea de amortizare a structurilor are mai multe forme fizice și proveniențe. Astfel, sursele acesteia sunt: rezistența vâsco-elastică a particulelor componente ale materialului, frecarea dintre cristalele din structura materialului și frecarea dintre materialele componente, când elementul structural are o compunere mixtă. De asemenea „valoarea” amortizării depinde de mai multe variabile: tipul materialului, tipul structurii, tipul încărcării, conexiunilor etc.

Următoarele figuri reprezintă mai multe ipostaze ale mișcării unui sistem cu un grad de libertate. În prima figură este reprezentată mișcarea liberă a unui sistem cu 1 GDL în absența amortizării (situația ideală). Astfel, dacă elementul reprezentat dispune de proprietăți elastice perfecte și coeficientul de amortizare $c = 0$, acesta efectuează oscilații cu amplitudinea constantă.

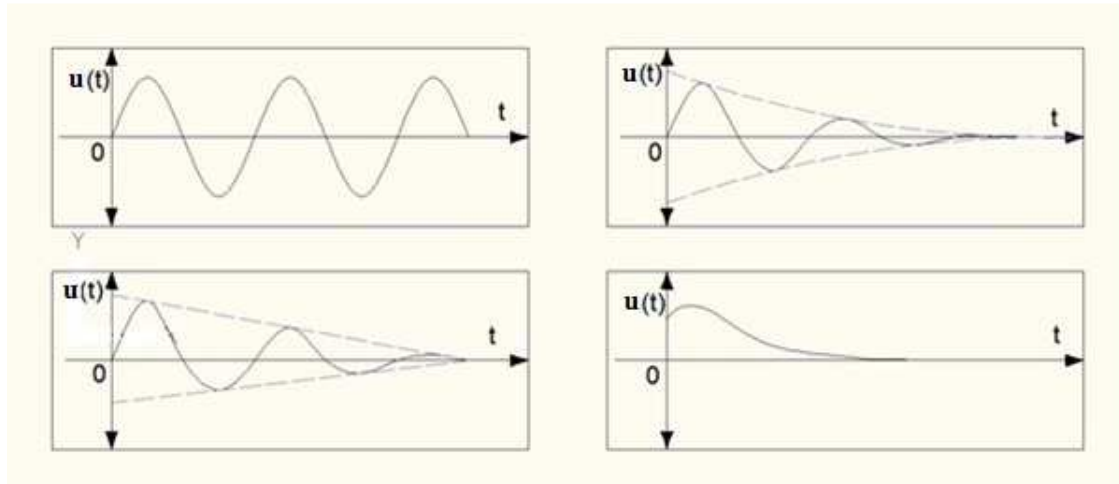


Figura 2.1-1 Mișcarea liberă a unui sistem GDL fără amortizare

A doua și a treia figură expun cazurile în care coeficientul de amortizare c este diferit de 0, diferența dintre cele două cazuri fiind faptul că descreșterea amplitudinii are un caracter exponențial la amortizarea vâscoasă, și liniar la amortizarea liniar-vâscoasă. Ultima figură reprezintă cazul în care elementul supus la vibrații dispune de proprietăți vâscoase perfecte ($c=c_{cr}$), astfel încât amortizarea devine atât de intensă încât oscilațiile sunt imposibile, iar masa revine la poziția inițială de echilibru foarte repede. Noțiunea de fracțiune din amortizarea critică (ξ) se exprimă prin raportul dintre amortizarea vâscoasă (c) și coeficientul de amortizare critică (c_{cr}). Coeficientul de amortizare critică reprezintă cantitatea limită de amortizare vâscoasă care elimină complet vibrația [42].

Cu aceste considerente, amortizarea vibrațiilor construcțiilor se încadrează în una dintre următoarele trei tipuri:

- Amortizarea internă (a materialului)
- Amortizarea structurală (prin noduri și suprafețe de contact)
- Amortizarea fluidă (prin interacțiunea dintre structură și fluid)

Amortizarea unei sistem structural reprezintă o combinație în diferite procentaje, a celor trei tipuri de amortizare amintite mai sus. Cele trei categorii sunt sursele primare ale capacității de amortizare a unei structuri. Prima dintre acestea – amortizarea internă - rezultă din disiparea energiei mecanice din material în urma unor procese microscopice și macroscopice, care depind de tipul materialului folosit și de proprietățile fizice care îl caracterizează. Al doilea tip menționat, amortizarea structurală, se dezvoltă la nivelul elementelor componente ale structurii și este cauzată de disiparea energiei mecanice rezultată din deplasări relative între componentele structurii la nivelul punctelor de contact, noduri sau suporturi. Al treilea tip, amortizarea fluidă, apare din disiparea energiei mecanice rezultate din forțele de tractare și a

interacțiunilor dinamice asociate unui comportament fluid al unui sistem, sau a componentelor lui. În domeniul liniar însă, amortizarea preponderent folosită în analizele structurale este cea vâscoasă. Gradul de amortizare al unei structuri poate fi modificat prin „intervenții” la unul sau mai multe din cele trei niveluri la care se produce fenomenul de frecare. O modalitate distinctă de intervenție și modificare a gradului de amortizare al unei structuri o constituie introducerea în sistemul structural a unui nivel de amortizare (adăugată) artificială.

Dacă se analizează situațiile a două sisteme cu un singur grad de libertate echivalente, deosebite doar prin prezența / lipsa amortizării vâscoase, se pot observa anumite aspecte din rezultate: o diferență infimă între frecvențele și perioadele celor două sisteme. Diferența survine doar în cazul amplitudinii. Cvasi-conservarea frecvenței / perioadei proprii de vibrație în cazul vibrațiilor amortizate față de cazul vibrațiilor neamortizate justifică neglijarea amortizării (deci o analiză dinamică mai simplă) pentru calculul valorilor proprii (frecvențe, perioade) de vibrație, în timp ce pentru calculul componentelor (deplasări, eforturi) ale răspunsului dinamic este necesară luarea în considerare a amortizării.

Modele matematice ale amortizării

Modelarea fenomenului amortizare este cea mai dificilă, dintre toate cele trei caracteristici ale unui sistem dinamic: masa, rigiditatea și amortizarea. Capacitatea de amortizare a unei structuri este dificil de cuantificat. După cum este menționat mai sus, proprietățile amortizării unui obiect de construcție vin din structura internă a materialului și alcătuirea nodului. Este cunoscut faptul că nivelul de amortizare inerentă (inițială), considerat în proiectare, se diferențiază în funcție de tipul materialelor folosite (metal, beton, compozit, etc.), de tipul îmbinărilor (sudate, nituite) și nu numai. Un exemplu ar fi structura metalică, al cărei nivel de amortizare inerentă este considerat 2% dacă îmbinările acesteia sunt sudate, și 5% dacă sunt nituite. Pentru obținerea acestor valori, modelarea amortizării trebuie inițiată luând în considerare anumite aspecte. Amortizarea fiind una dintre forțele care se opun mișcării (alături de forța elastică), preia forma acesteia. Astfel dacă o structură este solicitată la o forță armonică, la fel și amortizarea va avea un caracter armonic. Fiecare din elementele ecuației de echilibru dinamic este asociată cu o formă de mișcare, astfel și amortizarea este asociată vitezei. În continuare se vor discuta principalele tipuri de amortizare inerentă începând cu amortizarea liniar-vâscoasă.

1. Amortizarea liniar-vâscoasă

După cum este reprezentat în Figura 2.1-1, dacă descreșterea amplitudinii vibrațiilor sistemului se produce liniar, amortizarea sistemului este liniar-vâscoasă. Cele trei caracteristici ale unui sistem dinamic – masa, rigiditatea și amortizarea - se traduc în fizică în forțe: forța inerțială - care întreține mișcarea, forța elastică și cea disipativă - care se opun mișcării, mai exact: forța de amortizare. Aceste forțe împreună cu forța perturbatoare ($F(t)$), care poate fi aplicată direct sau bazei de rezemare a sistemului (cazul forței seismice – $\ddot{u}_g(t)$) alcătuiesc ecuația de echilibru dinamic.

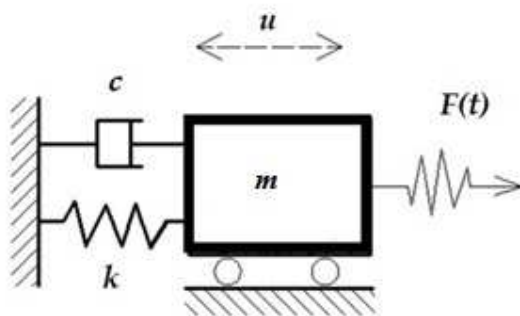


Figura 2.1-2 Sistem cu un singur grad de libertate

Forța de amortizare este notată $F_a(t)$. Caracteristica disipativă a sistemului este proporțională cu viteza prin intermediul coeficientului de amortizare:

$$F_a(t) = -c \cdot \dot{u}(t) \quad (2.1.1)$$

Se notează:

c – coeficientul de amortizare vâscoasă

c_{cr} - coeficientul de amortizarea critică $c_{cr} = 2 \cdot m \cdot \omega$

ξ – fracțiunea de amortizare critică $\xi = \frac{c}{2 \cdot m \cdot \omega} = \frac{c}{c_{cr}}$

Termenul ω se referă, bineînțeles, la frecvența proprie a vibrațiilor neamortizate.

După cum s-a specificat anterior, în Fig. 2.1-1, atingerea valorii $c = c_{cr}$ reprezintă cazul în care elementul supus la vibrații este flexibil și dispune de proprietăți vâscoase perfecte astfel încât amortizarea devine atât de intensă încât oscilațiile sunt imposibile.

2. Amortizarea vâsco-elastică

Un material are comportament vâsco-elastic dacă deține atât proprietăți vâscoase cât și elastice. Un material cu comportament elastic, odată ce este înlăturată sursa de deformație, își revine la forma inițială. Deci, graficele încărcării și deformației sunt în fază, conform legii lui

Hooke, care exprimă relația de proporționalitate dintre aceste două mărimi, factorul de proporționalitate fiind E - modulul de elasticitate:

La polul opus, un material cu comportament vâscos, absoarbe energia indusă de deformație și nu revine la forma inițială. După cum este reprezentat în Figura 2.1-3 diferențele dintre aceste materiale se pot observa cu ajutorul curbelor σ - ε . Astfel, în cazul materialului elastic graficul efortului și a deformației sunt în fază, valorile maxime și minime ale celor două se aliniază, rezultând relația proporțională descrisă de Hooke. Materialul vâscos însă, nu respectă aceste condiții, ci prezintă un comportament neliniar, care duce la defazarea celor două curbe. Frecvența încărcării este defazată de cea a deformației cu un unghi φ (unde $0 < \varphi < \pi/2$). Cu cât este mai mare acest unghi cu atât este mai mare și amortizarea. Materialul vâsco-elastic, însumând proprietăți ale ambelor materiale are o variație σ - ε cu defazare între efort și deformație mai puțin pregnantă.

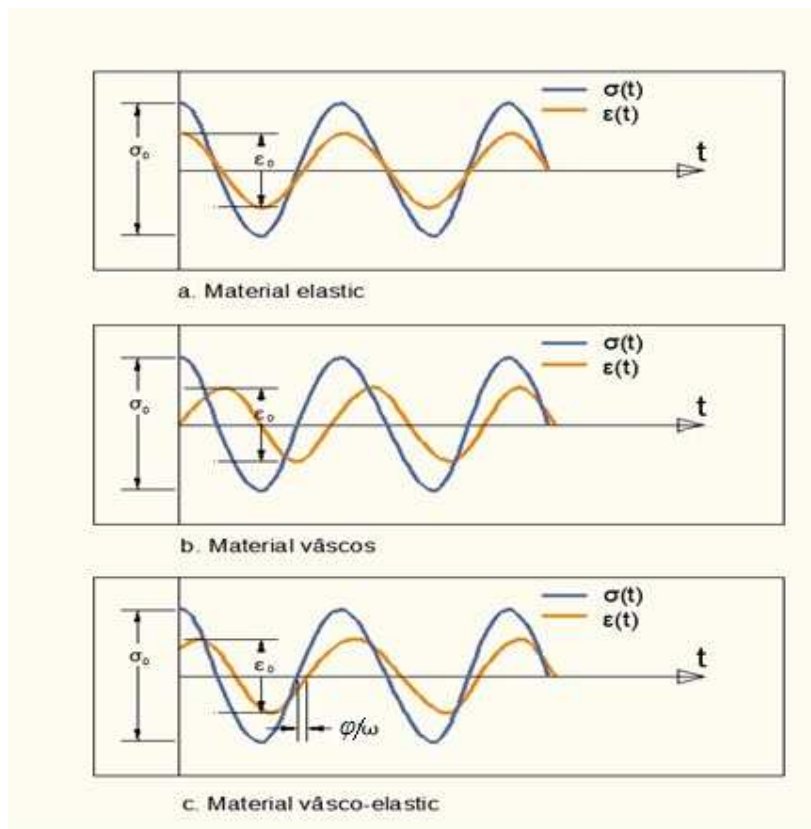


Figura 2.1-3 Reprezentarea relației efort-deformație în cazul materialelor (a) elastice, (b) vâscoase și (c) vâsco-elastice

Ecuția folosită în modelul analitic Kelvin-Voigt este:

$$\sigma = E\varepsilon + E^* \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.1.2)$$

În cazul amortizării vâsco-elastice relația are și o parte complexă. $E\varepsilon$ este partea reală și exprimă comportamentul elastic al materialului și rigiditatea, iar $E^* \frac{d\varepsilon}{dt}$ este partea imaginară care expune componenta vâscoasă și definește proprietatea de disipare a energiei materialului (adică amortizarea) [43], [44]. Acesta se mai numește și modulul complex sau parametrul vâsco-elastic. Termenul E^* poate fi descris cu relația:

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot e^{i\theta} \quad (2.1.3)$$

a cărei factori se pot exprima astfel:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega t) \quad (2.1.4)$$

$$\sigma_0 = E \cdot \varepsilon_0 \quad (2.1.5)$$

unde:

ε_0 – amplitudinea deformației

σ_0 – valoarea maximă a efortului unitar.

Pentru determinarea valorii amortizării vâsco-elastice se calculează aria acestei bucle - egală cu energia disipată pe unitate de volum a materialului, într-un ciclu de încărcare. I se mai spune capacitatea de amortizare pe unitate de volum.

$$d_v = E^* \int \frac{d\varepsilon}{dt} d\varepsilon \quad (2.1.6)$$

duce la formula:

$$d_v = \pi \cdot \omega \cdot E^* \cdot \frac{\sigma_0^2}{E^2} \quad (2.1.7)$$

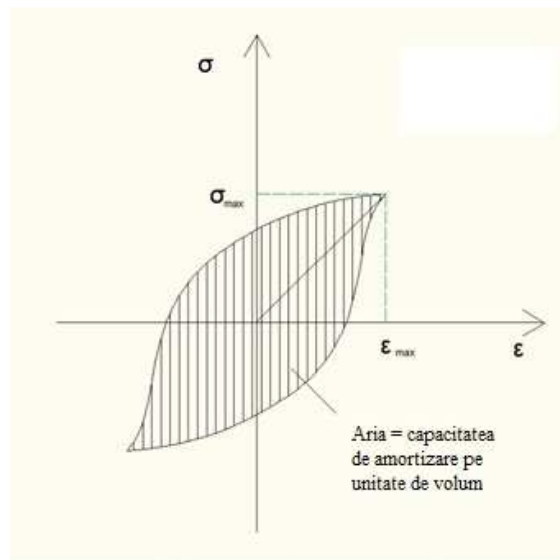


Figura 2.1-4 Determinarea capacității de amortizare

În modelul Kevin-Voigt capacitatea de amortizare pe unitate de volum este dependentă de frecvența vibrațiilor [45]. Celelalte modele de analiză a amortizării vâsco-elastice (Maxwell și modelul standard liniar solid) se bazează și pe relația σ - ε , doar că se folosesc mai mult pentru modelarea unui sistem de vibrații în mișcare și a amortizării suplimentare – în special amortizorii vâsco-elastici.

3. Amortizarea histeretică

Așa cum s-a arătat în paragraful anterior, amortizarea de tip vâscos are caracter histeretic, adică graficul efort-deformație este de forma unei curbe histeretice. De aceea, denumirea de „amortizare de tip histeretic” nu este potrivită. Totuși, literatura de specialitate, cu unele excepții continuă să utilizeze denumirea de „amortizare de tip histeretic” pentru a se referi la amortizarea internă, alta decât cea „de tip vâscos”. Denumirea potrivită ar fi cea de „amortizare independentă de frecvența de vibrație” [46].

Deoarece, amortizarea de tip vâscos depinde (prin viteză) de frecvența de „încărcare” a structurii, constatarea (practică) a existenței unei amortizări care nu depinde de frecvență a condus la acceptarea acestei clase distincte de amortizare (amortizarea de tip histeretic) [47]. Identificarea independenței amortizării de tip histeretic de frecvența de vibrație s-a făcut prin compararea răspunsurilor dinamice ale unei structuri cu număr finit de grade de libertate la acțiuni dinamice speciale.

La fel ca în cazul amortizării vâsco-elastice, relația σ - ε formează un grafic de forma curbei histeretice, a cărei arie este egală cu energia disipată în cadrul unui ciclu. Aceasta arie este proporțională cu deplasarea și viteza.

Modelarea analitică a forței de amortizare histeretică pornește de la considerarea acestei independențe față de frecvență:

$$F_a = \gamma \cdot k \frac{\dot{u}}{\omega} \quad (2.1.8)$$

unde: ω - este frecvența circulară a vibrațiilor cu amortizare histeretică,

k - este constanta elastică (coeficientul de rigiditate),

γ - este „coeficientul de amortizare” [46] sau factorul de amortizare structurală.

Pentru obținerea unui model matematic al amortizării histeretice, se consideră o variație armonică a deformației specifice ε care induce o variație în efortul unitar σ astfel:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2.1.9)$$

unde ε_0 este amplitudinea deformației, iar ω este frecvența circulară a variației lui ε . Deformația ε induce un efort unitar asociat σ defazat cu unghiul φ față de deformație, prin urmare:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \quad (2.1.10)$$

Astfel, rezultă:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos \varphi \cdot \cos(\omega \cdot t) - \sigma_0 \cdot \sin \varphi \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.1.11)$$

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos \varphi \cdot \cos(\omega \cdot t) + \sigma_0 \cdot \sin \varphi \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.1.12)$$

Primul termen al relației (2.1.12) este în fază cu deformația, iar al doilea în defazaj (cu $\pi/2$).

Se notează cei doi termeni:

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_v \quad (2.1.13)$$

În funcție de valoarea raportului în care se află cele două componente ale efortului unitar σ , materialul vâsco–elastic are un caracter mai pronunțat elastic ($\sigma_e > \sigma_v$) sau mai pronunțat vâscos ($\sigma_e < \sigma_v$).

Spre deosebire de amortizarea vâsco-elastică, după cum s-a menționat anterior, în cazul amortizării histeretice, parametrul (E^*) este independent de frecvența ω a mișcării de vibrație. În acest caz, parametrul se notează E^{\wedge} și modelul analitic Kelvin–Voight al amortizării are forma:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \frac{E^{\wedge}}{\omega} \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) \quad (2.1.14)$$

Considerând, din nou variația armonică a deformației ε în regim stabilizat dată de (2.1.10) relația constitutivă $\sigma - \varepsilon$ (2.1.15) devine:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) + E^{\wedge} \cdot \varepsilon_0 \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.1.15)$$

Astfel, conform formulei lui Euler enunțată în expresia (2.1.16), relația (2.1.15) devine:

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \cdot \sin \varphi \quad (2.1.16)$$

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos \varphi \cdot \cos(\omega \cdot t) + i \cdot \sigma_0 \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2.1.17)$$

Prin înlocuirea $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$, expresia (2.1.17) devine:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \varphi + i \cdot \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \varphi \quad (2.1.18)$$

Sau:

$$E^* = E' + i \cdot E'' \quad (2.1.19)$$

unde:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \varphi \quad (2.1.20)$$

este *modulul de înmagazinare* (a energiei) și care este în fază cu efortul unitar σ , iar

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \varphi \quad (2.1.21)$$

este *modulul de disipare* (a energiei) și care este în fază cu deformația ε [47], [48], [49]. Cu alte cuvinte, *modulul de înmagazinare* E' reprezintă partea de *energie de deformație elastică* în timp ce *modulul de disipare* E'' reprezintă partea de *energie disipată prin proprietatea de vâscozitate* a structurii. Modulul E' se numește de „înmagazinare” pentru că este implicat în înmagazinarea energiei dezvoltate de deformațiile elastice care însoțesc mișcarea vibratorie. Modulul E'' se numește „de disipare” pentru că este implicat în procesul de disipare a energiei mecanice (induse în structură de o acțiune exterioară) prin proprietatea de vâscozitate a materialului din care este alcătuită stuctura. Dacă E' este mai mare decât E'' , atunci mai multă energie este recuperată prin deformații elastice. Cu cât E'' este mai mare în raport cu E' , cu atât mai multă energie va fi disipată.

2.1.2 Amortizarea adăugată

Ingenieria seismică este un domeniu foarte complex, dezvoltat din mai multe direcții științifice pe parcursul unei perioade lungi de timp. Pentru a se ajunge la metode de perfecționare a construcțiilor civile, industriale și de infrastructură, s-au dezvoltat mai multe discipline precum geologia, seismologia și ingineria structurală. Aceste discipline au ajutat la înțelegerea elementelor care alcătuiesc evenimentul seismic: acțiunea seismică și recipientul ei (structura), și au condus la dezvoltarea unor tehnologii noi, care protejează structura acționată seismic.

Structura în sine este limitată în ceea ce privește răspunsul seismic, la capacitatea internă de amortizare și rigiditatea ei. Amortizarea internă a structurii provenită din structura internă a materialului, nodurile structurale și suprafețele de frecare, este un parametru greu de măsurat, și greu de optimizat.

Astfel, s-a recurs la o altă soluție: adăugarea unor echipamente cu capacitate suplimentară de absorbție a energiei seismice induse în structură. În compoziția lor intră așa numitele materiale inteligente și sisteme adaptive, care au capacitatea de a se modela la

mișcarea scoarței. Aceste sisteme au mai multe funcții: de a monitoriza schimbările mediului înconjurător, de a localiza și diagnostica problema, de a stoca și prelucra informațiile din măsurători, și de a sintetiza o soluție, protejând astfel integritatea structurală a clădirii.

Beneficiile acestor echipamente sunt multiple în ceea ce privește răspunsul seismic al structurii, dar nu numai. Echipamentele de protecție seismică conduc la importante economii de material și manoperă. Protecția seismică prin rigidizare excesivă compromite eficiența financiară a structurilor. Nivelul de rigiditate laterală impus unei structuri, necesar pentru atingerea performanței *ocupare imediată* – de exemplu – implică costuri suplimentare semnificative. Deși costul inițial de construcție este ridicat, acest nivel de performanță permite încă avarierea (minoră) a structurii, implicând operațiuni de reabilitare post-seismice costisitoare [22]. Bineînțeles că educarea insuficientă a comunității ingerești în privința acestor dispozitive, nu permite implementarea lor la scară largă, și deocamdată aplicațiile acestei tehnologii se rezumă la clădiri de importanță sporită, sau cu o structură sau localizare sensibilă la amenișarea seismică.

Cercetarea în domeniul protecției seismice a condus la elaborarea a numeroase soluții eficiente în disiparea vibrațiilor. Există o multitudine de astfel de echipamente, care se pretează nevoilor specifice amplasamentului și a modelului structural. Ele pot fi clasificate astfel:

1. Izolatori în bază: sisteme care separă suprastructura clădirii de infrastructură; astfel, la excitația seismică, suprastructura prezintă o mișcare de corp rigid. Principiul care stă la baza funcționării acestor dispozitive este plasarea unei structuri peste un material cu rigiditate laterală mică - ca și cauciucul – pentru a obține o bază flexibilă, care este capabilă să preia frecvențele înalte ale încărcării seismice, și prin urmare, să protejeze structura de avarii puternice sau colaps. Ținta acestor echipamente sunt clădirile cu regim mic sau mediu de înălțime pentru că acestea prezintă frecvențe înalte.
2. Protecție pasivă: sunt sisteme care folosesc energia introdusă în structură, pentru a produce forța de control a vibrațiilor. Acestea nu depind de un actuator, și nu au capacitatea de a măsura răspunsul structural, deci și procentul de amortizare suplimentar oferit este limitat. Dezavantajele acestui tip de sisteme de control a vibrațiilor sunt aplicabilitatea lor limitată la încărcări în care primul mod de vibrație primează și incapacitatea de a se adapta la încărcarea seismică și la răspunsul structural. Sistemele de protecție seismică pasivă includ: amortizori cu masă adăugată, amortizori cu lichid adăugat, dispozitive de frecare, dispozitive metalice de curgere, amortizori vâsco-elastici și amortizori vâscoși-fluizi.

3. Protecție activă: aceste dispozitive adaptive folosesc o sursă exterioară de energie, pentru a controla vibrațiile introduse în structură. Forța F_c cu care acționează este definită în următoarea expresie, în care parametri c_c și k_c reprezintă coeficientul de amortizare al dispozitivului, respectiv cel de rigiditate, variabile în funcție de datele pe care le procesează actuatorul:

$$F_c(t) = c_c \dot{u}(t) + k_c u(t) \quad (2.1.22)$$

Un sistem activ de control al vibrațiilor este în principiu alcătuit din următoarele componente: senzori, actuatori și un dispozitiv de control al vibrațiilor dotat cu un algoritm specific încărcării. Sensorii sunt amplasați la baza structurii sau chiar pe dispozitivele de control. Acestea măsoară parametri relevanți răspunsului structural precum: deplasări, viteze, accelerații și forțe necesare pentru controlul vibrațiilor induse de solicitare. Informațiile sunt trimise în forma unor semnale electrice dispozitivului de control, care le procesează și emite semnalele corespunzătoare actuatorilor. Aceștia din urmă produc forțele necesare menținerii echilibrului structural. Echipamentele folosite pentru funcția de actuator sunt de tip electro-hidraulic sau generatoare de impulsuri. Sursa de energie necesară pentru alimentarea acestor dispozitive și pentru generarea forței de control este însă considerabilă.

4. Protecție semi-activă: reprezintă un sistem pasiv căruia i s-a atașat un mecanism adaptabil pentru a regla forța de control a vibrațiilor. Aceste sisteme sunt alcătuite în principiu din senzori, un calculator, un actuator pentru control și un dispozitiv pasiv de amortizare. Sensorii au funcția de a măsura încărcarea la care este supusă structura dar și răspunsul structurii. Aceștia colectează informațiile necesare pentru calculul forței de control necesare, și le transmit calculatorului. Calculatorul procesează informațiile primite de la senzori și emite un semnal de control pentru actuator. Acesta din urmă, modelează comportamentul dispozitivului pasiv – forța de control – potrivit datelor înregistrate. Componenta pasivă a sistemului de protecție seismică semi-activ este cea care generează forța de control, rezultând astfel, o importantă economie de energie.
5. Protecție hibridă: sunt sisteme care combină controlul activ și cel pasiv. Din cauza existenței componentei pasive (sau de tip izolator în bază) rolul actuatorului în emiterea forței de control a vibrațiilor este mai scăzut, și deci și necesarul de energie.

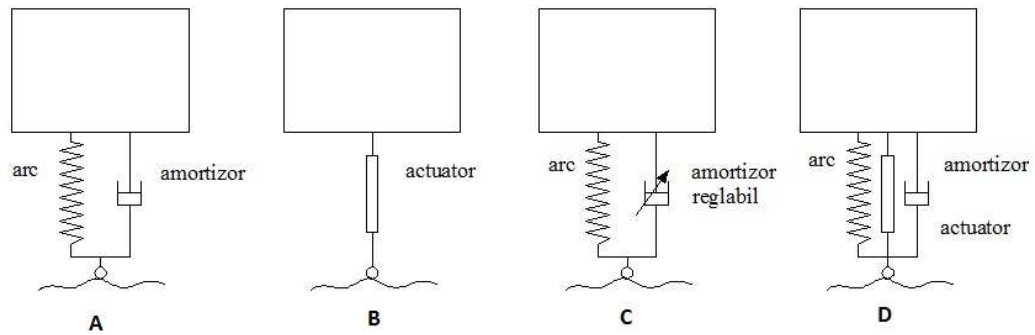


Figura 2.1-5 Modelarea controlului vibrațiilor: A) Pasiv, B) Activ, C) Semi-activ, D) Hibrid

2.1.3 Disiparea energiei seismice

Amortizare este un fenomen mecanic natural care este asociat mișcării de vibrație a unei structuri. Un sistem mecanic, de exemplu o structură, înmagazinează energie potențială dacă este adus într-o formă deformată (față de o poziție considerată de referință). Energia potențială (de deformație) se transformă, în anumite condiții în energie cinetică, energie care, la rândul său, generează mișcarea de vibrație (Fig. 2.1-6).

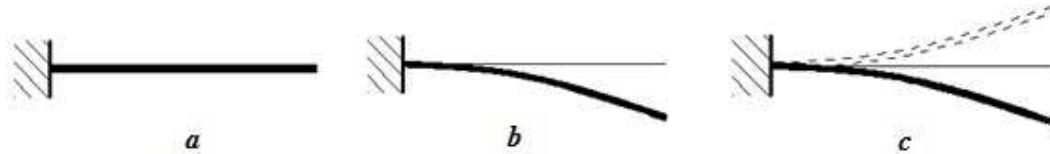


Figura 2.1-6 Stări mecanice: (a) În echilibru în poziția de referință (b) Deformat față de poziția de referință (c) În mișcare de vibrație

Disiparea energiei cinetice se datorează fenomenului de amortizare care însoțește (inerent) mișcarea mecanică și care este evidențiat prin scăderea treptată a amplitudinii mișcării. Din punctul de vedere al legilor Fizicii, disiparea energiei cinetice înseamnă transformarea acestei energii într-o altă formă de energie. În cazul mișcării de vibrație a structurilor, energia disipată se transformă preponderent, în energie termică [41].

În studiul vibrațiilor structurilor de construcții, amortizarea este asociată răspunsului structural (în deplasări, deformații, eforturi). Forma acestui răspuns este populară și cunoscută: în cazul unei structuri aflate în stare de vibrații libere, amplitudinile vibrațiilor descresc progresiv, iar în cazul unei structuri aflate în mișcare de vibrație forțată, energia indusă de excitația exterioară este disipată continuu prin amortizare.

Energia disipată prin amortizare a structurilor cu vibrații amortizate, este asociată cu un ciclu de vibrație. Pentru calculul energiei cinetice disipate, se reamintește noțiunea de forță de amortizare F_a . În mod evident, această forță se opune mișcării, însoțește mișcarea (masa / masele în mișcare) și, deci, produce lucru mecanic.

Pentru a exprima modelarea matematică a amortizării energiei seismice se reamintește clasica ecuație diferențială a mișcării [41]:

$$m \cdot \ddot{u}(t) + c \cdot \dot{u}(t) + k \cdot u(t) = F(t) \quad (2.1.23)$$

Soluția $u(t)$ a ecuației diferențiale (2.1.23) depinde, pe de o parte, de forma funcției perturbatoare $F(t)$ și pe de altă parte de fracțiunea de amortizare critică:

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} \quad (2.1.24)$$

Se reamintesc relațiile:

$$c_{cr} = 2m\omega \quad (2.1.25)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.1.26)$$

este frecvența circulară proprie a mișcării de vibrație.

De asemenea, din (2.1.25) și (2.1.26) rezultă:

$$c = \frac{2k\xi}{\omega} \quad (2.1.27)$$

Dacă $\xi \geq 1$, sistemul nu are o mișcare oscilatorie ajungând (printr-o mișcare oarecare) la poziția de echilibru. Dacă $\xi \leq 1$, sistemul execută o mișcare oscilatorie cu amplitudinile $A(t)$ descrescând (Fig. 2.1-7) după legea:

$$A(t) = A \cdot e^{-\xi\omega t} \quad (2.1.28)$$

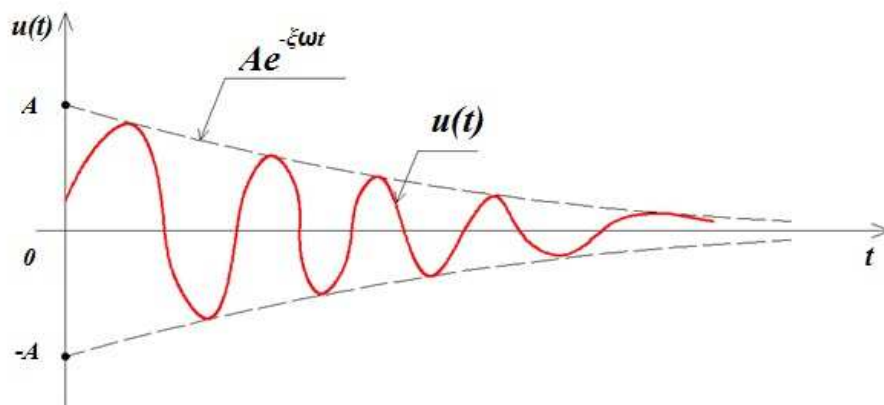


Figura 2.1-7 Descrescerea amplitudinii sistemului oscilator

Rezultă astfel ecuația de echilibru dinamic:

$$\ddot{u}(t) + 2 \cdot \xi \cdot \omega \cdot \dot{u}(t) + \omega^2 \cdot u(t) = \frac{F_0}{m} \cdot f(t) \quad (2.1.29)$$

Unde $F(t) = F_0 f(t)$ este forma generală a forței perturbatoare și F_0 este valoarea ei maximă ($F_0 = |F(t)|_{max}$). Dacă se introduce factorul de calitate (sau coeficientul de performanță):

$$Q = \frac{1}{2\xi} \quad (2.1.30)$$

al sistemului, ecuația diferențială a mișcării devine:

$$\ddot{u}(t) + \frac{\omega}{Q} \cdot \dot{u}(t) + \omega^2 \cdot u(t) = \frac{F_0}{m} f(t) \quad (2.1.31)$$

Energia disipata prin amortizare de tip vâsco-elastic

În ecuația diferențială (2.1.31) a mișcării forțate amortizate se consideră o oscilație armonică având frecvența Ω :

$$f(t) = \sin \Omega t \quad (2.1.32)$$

Ecuția (2.1.31) devine:

$$\ddot{u}(t) + 2 \cdot \xi \cdot \omega \cdot \dot{u}(t) + \omega^2 \cdot u(t) = \frac{F_0}{m} \sin \Omega t \quad (2.1.33)$$

Rezultă astfel forțele: - de inerție: $F_i = m \cdot \ddot{u}(t)$

- de amortizare: $F_a = 2 \cdot \xi \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{u}(t)$

- elastică: $F_e = m \cdot \omega^2 \cdot u(t)$

- perturbatoare: $F(t) = F_0 \cdot \sin \Omega t$

Ecuția (2.1.33) devine o ecuație de echilibru dinamic de forma:

$$F_i + F_a + F_e = F(t) \quad (2.1.34)$$

Se consideră vibrațiile libere ($F(t) = 0$) cu condițiile inițiale $t = 0; u(0) = u_0$. În regim stabilizat, legea de mișcare are forma:

$$u(t) = u_0 \cdot \sin(\Omega t - \varphi) \quad (2.1.35)$$

în care faza φ a mișcării este dată de relația:

$$tg \varphi = \frac{2 \cdot \xi \cdot \frac{\Omega}{\omega}}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2} \quad (2.1.36)$$

Din teorema de variație a energiei (disipate) E_d rezultă:

$$E_d = \int_{(ciclu)} dL \quad (2.1.37)$$

unde dL este lucrul mecanic elementar produs de forța de amortizare F_a sau aplicată $F(t)$. Rezultă, pentru calculul energiei disipate prin amortizarea de tip vâsco-elastic:

$$dL = F_a \cdot du = F_a \cdot \dot{u} dt = c \cdot \dot{u}^2 dt \quad (2.1.38)$$

Pentru un ciclu de vibrație se obține:

$$E_d = \int_0^T c \cdot \dot{u}^2(t) dt \quad (2.1.39)$$

unde $T = \frac{2\pi}{\Omega}$ este perioada proprie de vibrație a mișcării stabilizate.

Rezultă:

$$E_d = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} c \cdot \dot{u}^2(t) dt \quad (2.1.40)$$

Înlocuind (2.1.35) în (2.1.40) se obține energia disipată într-un ciclu de vibrație:

$$E_d = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} c \cdot [u_0 \cdot \Omega \cos(\Omega t - \varphi)]^2 dt = \pi \cdot c \cdot \Omega \cdot u_0^2 \quad (2.1.41)$$

Sau înlocuind pe c cu (2.1.27):

$$E_d = \frac{2\pi \cdot \xi \cdot \Omega \cdot k}{\omega} \cdot u_0^2 \quad (2.1.42)$$

Din (2.1.40) se observă că:

- * Energia disipată într-un ciclu de vibrație este proporțională cu pătratul amplitudinii u_0 a mișcării;
- * Energia disipată într-un ciclu este funcție liniară de frecvența Ω a acțiunii (forță, cutremur) perturbatoare;
- * Energia disipată într-un ciclu de vibrație este proporțională cu rigiditatea k a sistemului;
- * Energia disipată într-un ciclu de vibrație este invers proporțională cu frecvența proprie ω a sistemului.

Este util să se calculeze și energia indusă (de acțiunea perturbatoare $F(t)$) în sistemul care vibrează. Pe baza teoremei de variație a energiei, aceasta se calculează ca lucrul mecanic efectuat (într-un ciclu de vibrație) de forța $F(t)$. Astfel, energia E_I indusă de acțiunea perturbatoare într-un ciclu se scrie succesiv:

$$E_I = \int F(t) du = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} F(t) \cdot \dot{u} dt = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} F_0 \cdot \sin \Omega t \cdot \dot{u}(t) dt \quad (2.1.43)$$

Înlocuind $\dot{u}(t)$ se obține:

$$E_I = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} F_0 \cdot \sin \Omega t \cdot \Omega \cdot u_0 \cdot \cos(\Omega t - \varphi) dt = \pi \cdot F_0 \cdot u_0 \cdot \sin \varphi \quad (2.1.44)$$

Se reamintește faza φ a mișcării cu expresia:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \cdot \xi \cdot \frac{\Omega}{\omega}}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2} \quad (2.1.36)$$

iar, prin transformarea:

$$\sin \varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} \quad (2.1.46)$$

rezultă:

$$\sin \varphi = \frac{2\xi \frac{\Omega}{\omega}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2\right]^2 + \left[2 \cdot \xi \cdot \frac{\Omega}{\omega}\right]^2}} \quad (2.1.47)$$

Adică, energia indusă în sistem într-un ciclu de vibrație este:

$$E_I = \pi \cdot F_0 \cdot u_0 \cdot \sin \varphi \quad (2.1.48)$$

Din expresia (2.1.48) se constată că:

- Energia indusă în sistem este direct proporțională cu amplitudinea F_0 a acțiunii perturbatoare;
- Energia indusă în sistem este direct proporțională cu amplitudinea u_0 a mișcării în regim stabilizat.

De asemenea, înlocuind:

$$u_0 = \frac{F_0}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi \frac{\Omega}{\omega}\right]^2}} \quad (2.1.49)$$

în expresia (2.1.48), aceasta devine:

$$E_I = 2\pi \cdot \xi \cdot \frac{\Omega}{\omega} \cdot k \cdot u_0^2 \quad (2.1.50)$$

Din expresiile (2.1.42) și (2.1.50) se constată că:

$$E_d = E_I$$

adică, în timpul mișcării în regim stabilizat, energia indusă în sistem (E_I) de acțiunea perturbatoare este în întregime disipată prin amortizare vâscoasă.

Reprezentarea grafică a energiei disipate E_d dată de (2.1.42), respectiv induse E_I în funcție de amplitudinea u_0 a mișcării în regim stabilizat dată de (2.1.48) este dată în Fig. 2.1-8.

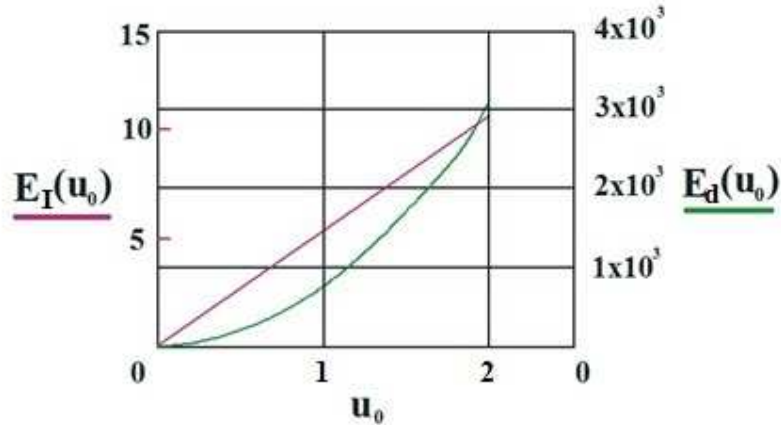


Figura 2.1-8 Energia disipată și energia de input în funcție de amplitudine

Caracterul histeretic al amortizării vâscoase

Forma histeretică a unui fenomen ciclic rezultă din interpretarea relației constitutive care stă la baza fenomenului. În cazul amortizării vâscoase a vibrațiilor mecanice, exprimarea (analitică / grafică) a relației forță de amortizare (F_a) - deplasare (u) conduce la evidențierea caracterului histeretic al fenomenului de amortizare vâscoasă [41].

Se reamintesc relațiile legii de mișcare $u(t)$ și a forței de amortizare vâscoasă F_a :

$$u(t) = u_0 \cdot \sin(\Omega t - \varphi) \quad (2.1.51)$$

$$F_a = c\dot{u}(t) = c \cdot \Omega \cdot u_0 \cos(\Omega t - \varphi) \quad (2.1.52)$$

Rezultă:

$$\begin{cases} \frac{u(t)}{u_0} = \sin(\Omega t - \varphi) \\ \frac{F_a}{c \cdot \Omega \cdot u_0} = \cos(\Omega t - \varphi) \end{cases} \quad (2.1.53)$$

Relațiile (2.1.53) pot fi aduse la forma:

$$\left[\frac{u(t)}{u_0} \right]^2 + \left[\frac{F_a}{c \cdot \Omega \cdot u_0} \right]^2 = 1 \quad (2.1.54)$$

care reprezintă ecuația unei elipse cu centrul în origine și simetrică față de axele de coordonate (Fig. 2.1-9). O formă alternativă a ecuației (2.1.54) se obține prin înlocuirea:

$$\cos(\Omega t - \varphi) = \pm \sqrt{1 - \sin^2(\Omega t - \varphi)} \quad (2.1.55)$$

în expresia

$$F_a = c \cdot \Omega \cdot u_0 \cos(\Omega t - \varphi) \quad (2.1.56)$$

rezultă:

$$F_a = \pm c \cdot \Omega \sqrt{u_0^2 - u^2} \quad (2.1.57)$$

care exprimă forma explicită a ecuației elipsei a cărei axe de simetrie sunt chiar axele de coordonate.

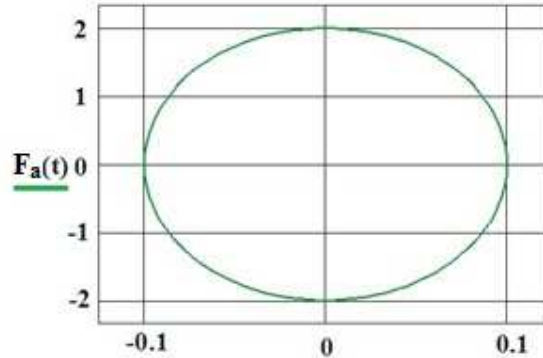


Figura 2.1-9 Energia disipată

Daca legea constitutivă forță – deplasare include atât forța de amortizare $F_a = c\dot{u}$ cât și forța elastică $F_e = ku$, atunci relația constitutivă forță – deplasare $F_e + F_a - u$ are, succesiv, formele:

$$F_e + F_a = k \cdot u(t) + c\dot{u}(t) \quad (2.1.58)$$

$$F_e + F_a = k \cdot u + c \cdot \Omega \cdot u_0 \cos(\Omega t - \varphi) \quad (2.1.59)$$

$$F_e + F_a = k \cdot u + c \cdot \Omega \cdot u_0 \sqrt{1 - \sin^2(\Omega t - \varphi)} \quad (2.1.60)$$

$$F_e + F_a = k \cdot u + c \cdot \Omega \cdot u_0 \frac{1}{u_0} \sqrt{u_0^2 - u_0^2 \sin^2(\Omega t - \varphi)} \quad (2.1.61)$$

$$F_e + F_a = k \cdot u + c \cdot \Omega \sqrt{u_0^2 - u^2} \quad (2.1.62)$$

Se introduce noțiunea de reacțiune totală F_T :

$$F_T = F_e + F_a \quad (2.1.63)$$

Relația (2.1.62) ia forma:

$$F_T = ku + c\Omega \sqrt{u_0^2 - u^2} \quad (2.1.64)$$

Care reprezintă ecuația unei elipse având axele înclinate față de axele de coordonate (Fig. 2.1-10).

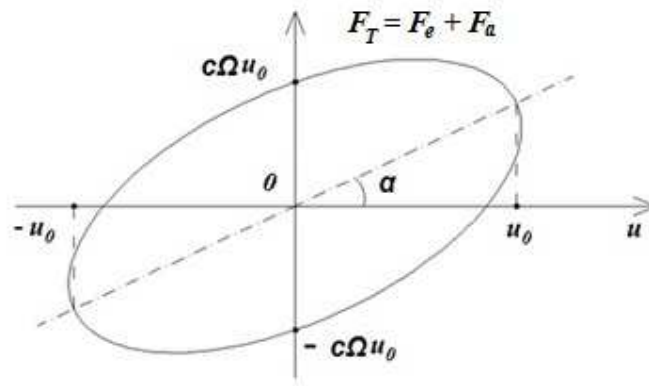


Figura 2.1-10 Représentarea reacțiunii totale F_T

Se observă că:

- Dacă se neglijează amortizarea ($c = 0$) relația (2.1.64) degenerază în forma $F_e = ku$ a cărei reprezentare grafică este o linie (lipsește caracterul histeretic);
- Dacă se neglijează componenta elastică ($k = 0$) a deplasării, relația (2.1.64) ia forma (2.1.90);
- Din forma generală $E = \int F du$ a teoremei de variație a energiei, rezultă că aria închisă de elipsele (2.1.54) (Fig. 2.1-9) și, respectiv (2.1.64) (Fig. 2.1-10) reprezintă energia disipată în sistemul care vibrează într-un ciclu (de-a lungul unei perioade $T = \frac{2\pi}{\Omega}$) prin amortizare și, respectiv prin amortizare și deformare elastică.

2.1.4 Amortizarea echivalentă a structurilor echipate cu amortizori vâscoși

Amortizarea structurilor este un fenomen complex, alcătuit din manifestări variate ce apar atât în materialele folosite în construcție cât și între elementele structurale – stâlpi, grinzi, etc.. Clasificarea și definirea amortizării ca: internă, structurală și fluidă, confirmă complexitatea acesteia. În cadrul unei structuri pot acționa toate cele trei tipuri de amortizare prin intermediul a mai multor fenomene ce au loc la nivel molecular sau la nivel structural. Caracteristica disipatoare a construcțiilor poate fi augmentată, prin adăugarea de echipamente de protecție seismică. Complexitatea procesului de disipare a vibrațiilor conduce la dificultatea estimării unei valori a amortizării inerente. Astfel, s-au realizat anumite experimente fizice pentru a determina scăderea amplitudinii vibrațiilor structurilor simple, care nu dispun de sisteme disipatoare de vibrații, precum contravântuirile sau dispozitivele anti-seismice. Concluziile studiilor au determinat că valoarea procentului de amortizare „naturală” a unei

structuri se regăsește între 2 și 8% [46]. Sistemele de protecție seismică sunt construite și dedicate scopului de a reduce efectul vibrațiilor introduse de cutremure în structură, deci evident acestea îi măresc capacitatea de a disipa energia încărcării. Astfel, procentul global de amortizare se modifică. Pentru a putea anticipa răspunsul seismic al unei structuri proiectate să reziste solicitării seismic este importantă cunoașterea acestei valori. În acest context a fost elaborat conceptul de amortizare vâscoasă echivalentă, definit ca mărimea ce cumulează toate aceste efecte, rezultând, astfel, o imagine completă asupra capacității de amortizare a structurii. Cercetarea în acest domeniu a condus la rezultate implementate ca prescripții normate [22], sub forma unor expresii matematice care estimează nivelul amortizării structurale, cu sau fără sprijinul echipării cu dispozitive de disipare a vibrațiilor .

Simplitatea modelării matematice a amortizării de tip vâscos, pe de o parte și imposibilitatea decelării clare și sigure a cantităților de amortizare vâscoasă și histeretică prezente într-un sistem în mișcare de vibrație, pe de altă parte, constituie o ispită spre modelarea întregului nivel de amortizare ca fiind amortizare de tip vâscos. Un astfel de nivel global de amortizare – provenind atât de la amortizarea de tip vâscos cât și de la amortizarea de tip histeretic – bazat pe principiul amortizării de tip vâscos, este calculat. O cale simplă (nu singură) pentru calculul amortizării vâscoase echivalente a unui sistem este măsurarea răspunsului dinamic în deplasări ale sistemului produs de o forță perturbatoare armonică. Răspunsul dinamic este definit ca deplasări al sistemului, iar forța dinamică trebuie să aibă frecvența circulară Ω egală cu frecvența proprie ω a sistemului. Evaluarea cantității de amortizare vâscoasă se face prin calcularea fracțiunii de amortizare critică ξ .

În vederea prezentării complete a acestui calcul, se menționează expresiile:

- * Frecvența vibrațiilor libere neamortizate:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.2.26)$$

- * Expresia forței dinamice:

$$F(t) = F_0 \cdot \sin \Omega t \quad (2.2.65)$$

- * Frațiunea de amortizare critică:

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} ; \quad \xi = \frac{c}{2m \cdot \omega} \quad (2.2.24)$$

$$(2.2.27)$$

- * Răspunsul dinamic amortizat (deplasări) în regim stabilizat:

$$u(t) = u_0 \cdot \sin(\Omega t - \varphi) \quad (2.2.66)$$

- * Deplasarea statică u_{st} produsă de F_0 :

$$u_{st} = \frac{F_0}{k} \quad (2.2.67)$$

* Amplitudinea u_0 a vibrațiilor amortizate

$$u_0 = u_{st} R_a \quad (2.2.68)$$

$$u_0 = \frac{F_0}{k} \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi \cdot \frac{\Omega}{\omega}\right]^2}} \quad (2.2.49)$$

* Faza φ a mișcării

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\xi \frac{\Omega}{\omega}}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2} \quad (2.2.36)$$

* În cazul rezonanței ($\omega = \Omega$)

$$R_a = \frac{1}{2\xi} \quad (2.2.69)$$

$$u_0 = \frac{F_0}{k} \cdot \frac{1}{2\xi} = \frac{F_0}{c\omega} \quad (2.2.70)$$

Sau

$$u_0 = \frac{u_{st}}{2\xi} \quad (2.2.71)$$

* Rezultă, în cazul rezonanței

$$\xi = \frac{1}{2} \cdot \frac{u_{st}}{u_0} \quad (2.2.72)$$

Expresia (2.2.72) a fracțiunii de amortizare critică ξ sugerează procedeul pentru determinarea experimentală a amortizării vâscoase echivalente:

- Se aplică static F_0 și se măsoară u_{st} ;
- Se aplică dinamic $F(t)$ cu $\Omega = \omega$ și se măsoară amplitudinea u_0 a vibrațiilor;
- Se calculează fracțiunea de amortizare critică vâscoasă echivalentă

$$\xi = \frac{1}{2} \cdot \frac{u_{st}}{u_0} \quad (2.2.73)$$

2.1.5 Efectele amortizării adăugate asupra răspunsului seismic

Acum că aspectele teoretice ale amortizării inerente și ale amortizării adăugate au fost enunțate, este important să se evalueze efectele pe care amortizarea le are asupra structurilor acționate seismic. Bineînțeles că toate structurile sunt echipate cu o anumită rezervă de

amortizare inerentă, a cărei valoare depinde de multe aspecte, așa cum s-a prezentat adineauri, valoare care poate fi modificată prin elemente adiționale, disipatoare de energie. Modificarea procentului fracțiunii de amortizare critică fără aceste dispozitive (de disipare a energiei) este foarte dificilă, și implică elemente de proiectare cu consecințe negative asupra răspunsului seismic. Un exemplu ar fi, utilizarea oțelului de înaltă rezistență pentru construcția structurilor metalice, în speranța reducerii cantității de material și a creșterii capacității de disipare energetică a structurii. Folosirea acestor materiale însă conduce la creșterea flexibilității structurale, și prin urmare, la creșterea perioadei de vibrație. Alternativa echipării structurii cu dispozitive de protecție seismică conduce la îmbunătățirea evidentă a răspunsului seismic cu valori maxime ale fracțiunii de amortizare critică, mult mai mari decât orice altă metodă de rigidizare cunoscută. De exemplu, echiparea structurii cu amortizori vâscoși conduce la un procent total al amortizării critice de până la 50% [50]. Procentul maxim al fracțiunii de amortizare critică ($\xi=20\%$) a fost ales pentru a păstra elementului de economicitate al proiectării anti-seismice. Amortizarea inerentă a structurii se consideră, în literatura de specialitate, în intervalul 2% - 8%. Autorul tezei a considerat impunerea unui procent de amortizare inerentă a structurilor egal cu 5%.

În continuare sunt prezentate rezultatele analizelor efectuate cu scopul surprinderii efectului amortizării adăugate asupra structurilor metalice multi-etajate. Cadrele analizate cuprind cinci deschideri, și șase, nouă și doisprezece niveluri înălțime. Amortizarea adăugată este introdusă progresiv, în trepte de cinci procente, rezultând astfel, următoarele categorii de structuri amortizate: structura de referință – cu fracțiunea de amortizare critică ξ egală cu 5%, și structurile cu amortizare totală egală cu $\xi =10\%$, $\xi =15\%$ și $\xi =20\%$. Acțiunile seismice considerate sunt: Vrancea 4 Martie 1977, Focșani 31 August 1986 și Vrancea 30 Mai 1990. După cum este specificat în Subcapitolul 1.2 – Metodologie – accelerogramele Focșani 1986 și Vrancea 1990 au fost scalate pentru a atinge maximul accelerației la valoarea 0,24g. Parametrii discutați sunt procentul deplasării relative de nivel, forța tăietoare seismică de bază și accelerația laterală de nivel.

Deplasarea relativă de nivel este un parametru semnificativ al răspunsului seismic, care oferă o imagine amplă asupra rigidității laterale, puternic încercate în timpul activității seismice. Figurile 2.1-11 ÷ 2.1-13 sunt reprezentări grafice ale deplasărilor relative de nivel procentuale induse structurilor 1 ÷ 3 de cele trei cutremure, în funcție de nivelul de amortizare global impus:

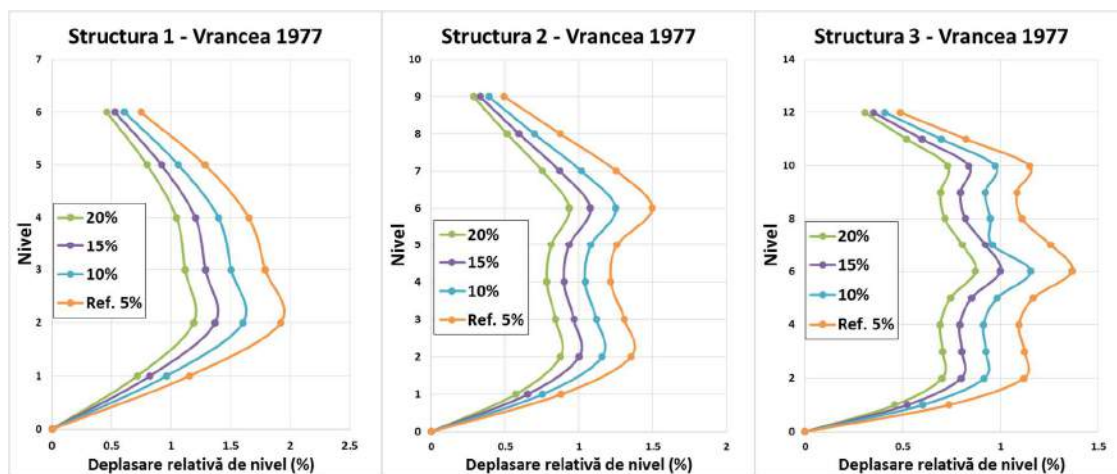


Figura 2.1-11 Variația deplasărilor relative de nivel a structurilor (A)1, (B)2 și (C)3. Vrancea 1977

Prima figură prezintă structurile 1, 2 și 3, cu 6, 9 și respectiv, 12 niveluri, solicitate prin acțiunea seismică Vrancea 1977. Se observă progresul în reducerea procentului deplasării relative de nivel al structurilor, pe măsură ce crește nivelul de amortizare critică. Impactul cel mai mare, în reducerea deplasărilor relative de nivel, îl au primele 5 procente de amortizare adăugată, care produc - în cazul primei structuri - scăderea procentului deplasării relative de nivel cu cca. 0,3%. În continuare, diferența deplasării relative de nivel, între structurile cu valoarea fracțiunii de amortizare critică consecutivă, scade. Ultima treaptă de amortizare - între nivelurile fracțiunii de amortizare critică $\xi = 15\%$ și $\xi = 20\%$ - produce un progres în deplasarea relativă de nivel, egal cu cca. 0,15%.

În continuare se prezintă rezultatele obținute prin solicitarea structurilor la acțiunea seismică Focșani 1986:

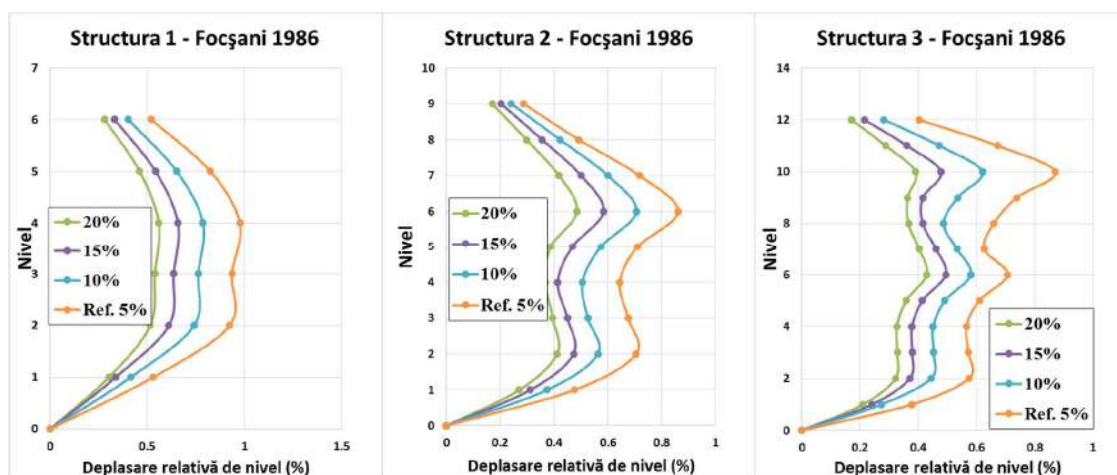


Figura 2.1-12 Variația deplasărilor relative de nivel a structurilor (A)1, (B)2 și (C)3. Focșani 1986

Evoluția deplasărilor laterale relative de nivel, a structurilor 1 ÷ 3, acționate seismic de Focșani 1986 este influențată de perioada redusă a acestui cutremur, față de cea a cutremurului

Vrancea 1977. Se observă că parametrul deplasare relativă de nivel nu depășește valoarea 1, la nici una dintre cele trei structuri. Prin urmare, diferența acestui procent între structurile cu niveluri de amortizare adăugată consecutive, este implicit mai mică. Reducerea maximă este din nou întâlnită între gradele de amortizare, reprezentate de structura de referință ($\xi=5\%$) și cea cu fracțiunea de amortizare egală cu 10%. Astfel, în cazul structurii 1 și 3, reducerea deplasării relative de nivel atinge valoarea maximă de 0,23%, iar în cazul structurii 2, valoarea de 0,15%.

La fel de relevante pentru surprinderea efectului amortizării adăugate asupra răspunsului seismic prin deplasări relative de nivel sunt și analizele realizate prin solicitarea structurilor la acțiunea seismică Vrancea 1990:

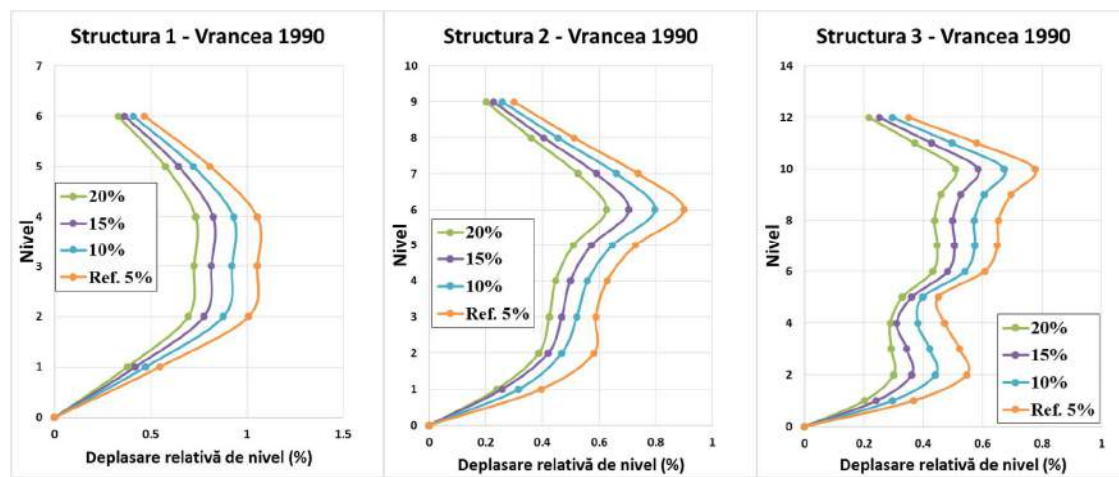


Figura 2.1-13 Variația deplasărilor relative de nivel a structurilor (A)1, (B)2 și (C)3. Vrancea 1990

Deplasarea relativă de nivel indusă de cutremurul Vrancea 1990 acestor structuri variază în funcție de procentul de amortizare impus. Așa cum este de așteptat acestea se reduc considerabil, începând cu o diferență majoră între structura de referință și cea cu amortizare adăugată 10%. Valorile maxime ale acestui parametru pentru cele trei structuri, acționate seismic de Vrancea 1990, sunt diminuate față de rezultatele obținute prin celelalte două accelerograme studiate în teză. Structura 1, a cărei valoare maximă a deplasării relative de nivel, trece puțin peste un procent, prezintă o reducere a acestui parametru, prin amortizare adăugată, până la 0,2%. Structura 2, cu procentul maxim al deplasării relative de nivel al structurii de referință egal cu 0,9%, are o reducere maximă de 0,2%, iar structura 3, de 0,1%. Diferențele ulterioare ale procentului deplasării relative de nivel, între structurile cu niveluri consecutive de amortizare, deși substanțiale, sunt din ce în ce mai mici.

În cele ce urmează este prezentată a doua categorie a parametrilor răspunsului seismic, extrasă în urma acestor analize, și anume: **acelerațiile laterale de nivel**. Alegerea acestei

mărimi pentru exprimarea comportamentului seismic al structurii este motivată de relevanța acestor valori în înțelegerea nivelului de rigiditate structural. Mai mult, sensibilitatea elementelor care definesc funcționalitatea clădirii (echipamente, finisaje) la accelerații, atribuie acestui parametru funcția de indicator al costurilor de mentenanță a structurilor acționate seismic [51], [52], [53]. Variația accelerației laterale de nivel a structurilor 1 ÷ 3, acționate prin cutremurele Vrancea 4 Martie 1977, Focșani 31 August 1986 și Vrancea 30 Mai 1990, cu cele 4 niveluri ale fracțiunii de amortizare critică ($\xi = 5\%$, $\xi = 10\%$, $\xi = 15\%$ și $\xi = 20\%$), este reprezentată în Figurile 2.1-14 ÷ 2.1-22.

Primele grafice prezentate sunt cele obținute prin analizele la Focșani 1986:

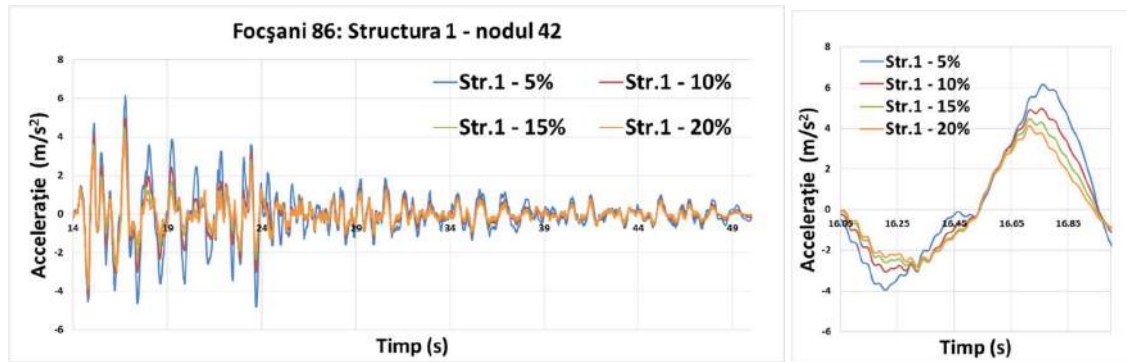


Figura 2.1-14 Variația accelerației relative laterale a structurii 1. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Focșani 1986

Variația accelerației laterale a structurii 1, cu 6 niveluri, este prezentată pe parcursul intervalului relevant al cutremurului Focșani 1986, în figura (A). Autorul a decis excluderea perioadei 1 ÷ 14 [s] din durata cutremurului folosit în analiza seismică, care prezintă o variație monotonă a vibrațiilor cutremurului și a structurii. Figura adiacentă (B) surprinde un interval egal cu o perioadă de vibrație, ales pentru valorile maxime ale accelerației. Astfel, reducerea accelerației odată cu creșterea nivelului de amortizare adăugată poate fi observată mai bine. În figura (B), în care este prezentat intervalul de variație maximă a accelerației laterale, se observă reducerea acestui parametru de la valoarea 6,2 [m/s²] a structurii de referință ($\xi = 5\%$), la valorile 5,0, 4,5 și 4,0 [m/s²], pentru structurile cu fracțiunea de amortizare critică egală cu 10%, 15%, și respectiv 20%. Diferența maximă, ca și în cazul deplasărilor relative de nivel, apare între structura de referință și cea cu amortizare $\xi = 10\%$, și este egală cu 1,2 [m/s²]. În continuare reducerea accelerației laterale prin amortizare suplimentară (de câte 5 procente) are o valoare constantă egală cu 0,5 [m/s²].

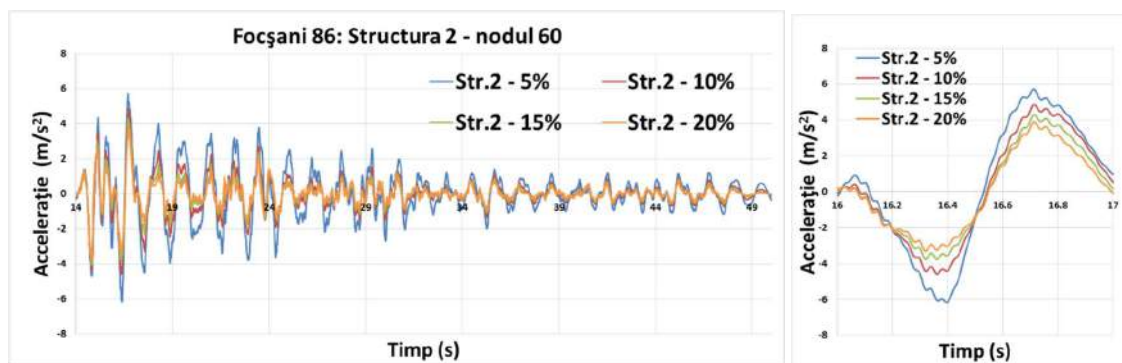


Figura 2.1-15 Variația accelerației relative laterale a structurii 2. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Focșani 1986

Structura 2, cu 9 niveluri, nu prezintă modificări considerabile în ceea ce privește variația accelerației laterale, față de structura 1. Pornind de la valoarea $6,0 \text{ [m/s}^2\text{]}$, maximum de accelerație relativă a structurii de referință ($\xi=5\%$), adaosul de amortizare adus structurilor, conduce la reducerea acestui parametru la valoarea $4,6$, $3,9$ și $3,1 \text{ [m/s}^2\text{]}$ pentru structurile cu fracțiunea de amortizare critică egală cu 10% , 15% , și respectiv 20% . Este evidentă, astfel, dependența valorii accelerației de cea a amortizării structurii.

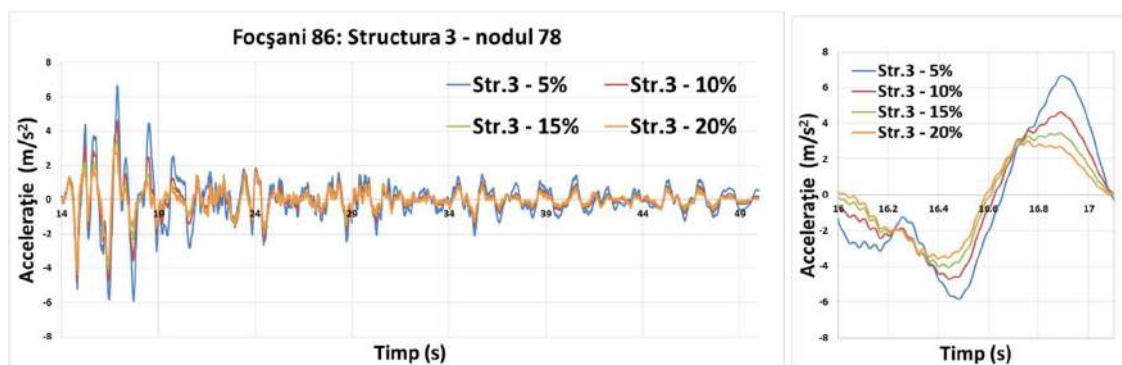


Figura 2.1-16 Variația accelerației relative laterale a structurii 3. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Focșani 1986

În cazul structurii 3, cu 12 niveluri, variația accelerației, demonstrează nu numai dependența răspunsului seismic de nivelul de amortizare structural ci și capacitatea sporită a cadrelor amortizate de a reduce parametrii seismici într-un interval de timp mai scurt. În imaginea (A) care arată variația accelerației laterale a variantelor structurale în intervalul $14 \div 50 \text{ [s]}$, se observă la nivel general evoluția accelerației față de fracțiunea de amortizare critică. În figura (B) însă, sunt surprinse atât valorile maxime înregistrate – ale accelerației laterale a structurilor cu amortizare adăugată - cât și raportul dintre ele. Structura de referință atinge maximum accelerației la valoarea $6,8 \text{ [m/s}^2\text{]}$, iar variantele structurale cu amortizare adăugată $\xi=10\%$, $\xi=15\%$ și $\xi=20\%$, valorile $4,5$, $3,5$ și respectiv $3,0 \text{ [m/s}^2\text{]}$. Reducerea accelerației prin amortizare suplimentară, atinge apogeul în cazul structurii amortizate suplimentar $\xi=10\%$, diferența față de structura de referință, a valorilor acestui parametru fiind egală cu $2,3$ procente.

În continuare se prezintă variația accelerației laterale a structurilor 1 ÷ 3, acționate seismic prin cutremurul Vrancea 1977, imaginea (A) reprezentând intervalul 5 ÷ 50 [s] al cutremurului, iar imaginea (B) intervalul definit de perioada de vibrație a structurii, care înregistrează valorile maxime ale accelerației:

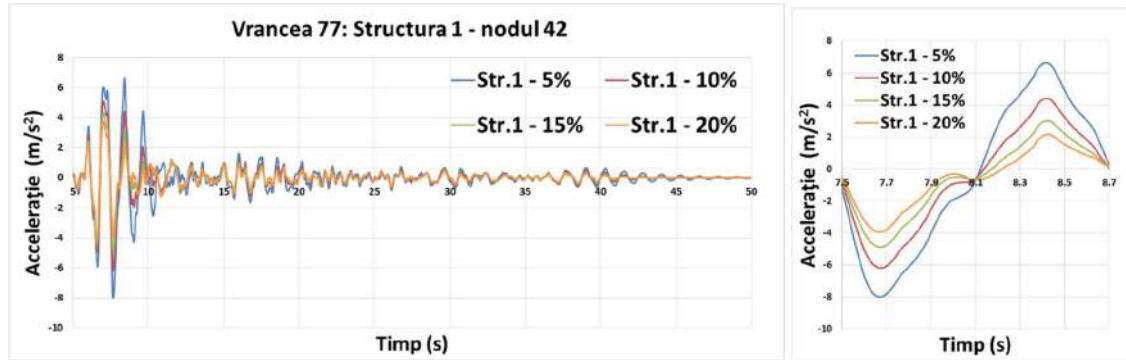


Figura 2.1-17 Variația accelerației relative laterale a structurii 1. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1977

În cazul structurii 1, acționate seismic prin cutremurul Vrancea 1977, valorile accelerației laterale înregistrează vârfuri mult mai mari decât în cazul structurilor solicitate de cutremurul Focșani 1986, și anume: $8,0 \text{ [m/s}^2\text{]}$ pentru structura de referință și $6,2$, $5,0$ și $4,0 \text{ [m/s}^2\text{]}$ pentru cadrele cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=10\%$, $\xi=15\%$, și respectiv $\xi=20\%$. Prin impunerea unei încărcări seismice de magnitudine superioară, precum Vrancea 1977, se evidențiază mai bine aportul amortizării în reducerea răspunsului seismic al structurilor. Chiar dacă în partea negativă a ordonatei se înregistrează valorile maxime ale accelerației pentru această structură, diferența cea mai mare – între valorile accelerației a două cadre cu nivel consecutiv de amortizare - se observă în cadrul valorilor pozitive, anume între structura de referință și cea cu $\xi=10\%$, și este egală cu 2,2 procente.

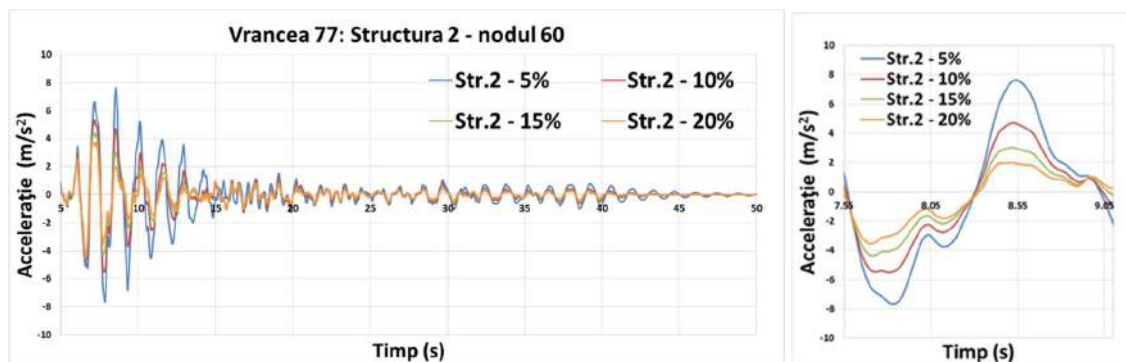


Figura 2.1-18 Variația accelerației relative laterale a structurii 2. (A)Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1977

Eficiența amortizării adăugate de a reduce răspunsul seismic al structurilor, este surprinsă și în cazul cadrului 2, cu 9 niveluri, acționat seismic prin cutremurul Vrancea 1977. Similar structurilor solicitate la cutremurul Focșani 1986, variația accelerației relative de nivel

se diminuează pe măsură ce crește nivelul de amortizare, scăzând de la valoarea de referință 7,5 [m/s²], la 5,5, 4,5 și 3,5 [m/s²] – valorile accelerației pentru structurile cu amortizare adăugată $\xi=10\%$, $\xi=15\%$, și respectiv $\xi=20\%$.

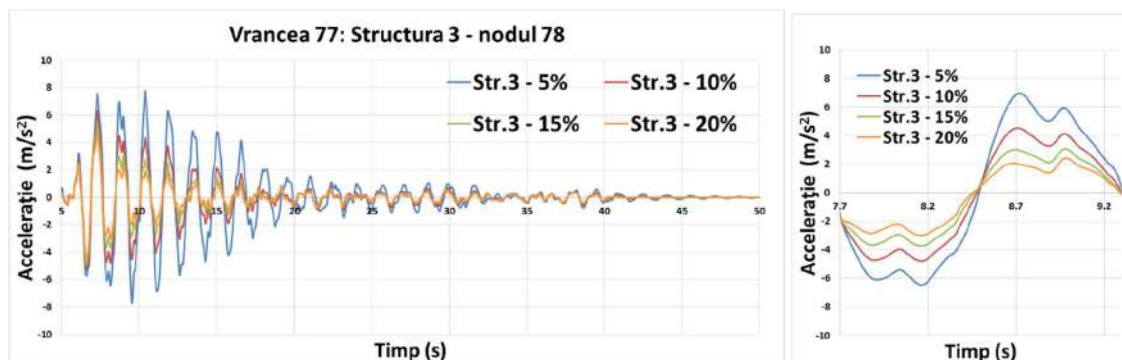


Figura 2.1-19 Variația accelerației relative laterale a structurii 3. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1977

Structura 3, solicitată seismic prin cutremurul Vrancea 1977, atinge vârful maxim al accelerației relative de nivel, a nodului 78, la valoarea 6,9 [m/s²]. Reducerea treptată a acestui parametru, odată cu creșterea nivelului de amortizare adăugată produce noi valori ale maximului de accelerație, anume: 4,5, 3 și 2,4 [m/s²] pentru structura cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=10\%$, $\xi=15\%$, și respectiv $\xi=20\%$. Se constată din nou că diferența maximă – în ceea ce privește accelerația relativă laterală – care se produce între două cadre cu nivel consecutiv de amortizare apare între structura de referință și cea cu $\xi=10\%$, și are valoarea 2,5 [m/s²].

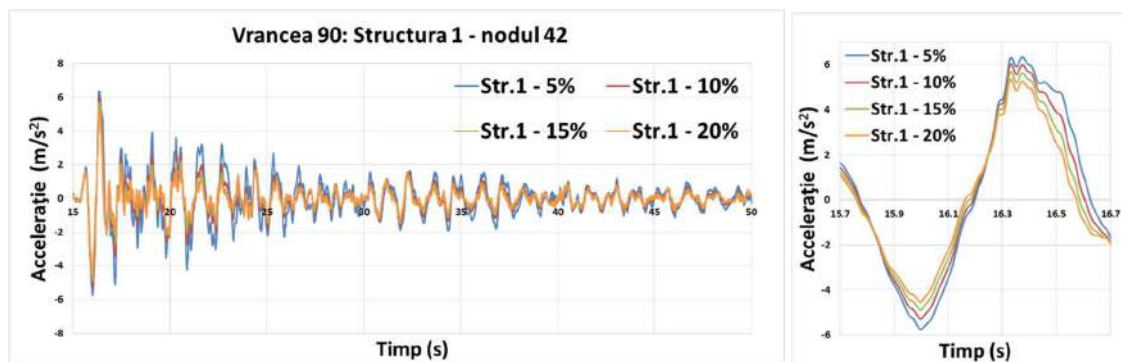


Figura 2.1-20 Variația accelerației relative laterale a structurii 1. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1990

Variația accelerației laterale în cazul structurii 1, acționată seismic de cutremurul Vrancea 1990, în cele patru ipostaze de amortizare, prezintă vârfuri maxime concentrate în intervalul valoric 5 ÷ 6,5 [m/s²]. Diferența între valorile maxime ale structurilor cu nivel consecutiv de amortizare nu depășește 0,4 procente. Răspunsul seismic indus de cutremurul Vrancea 1990 acestei structuri este amplu și dificil de redus, precum se observă în Fig. 2.1-20 (B). Cu toate că reducerea accelerației, prin amortizare adăugată se desfășoară în pași mărunți,

progresul este vizibil. Nivelul maxim de amortizare conduce la reducerea accelerației laterale de nivel cu 23% față de structura de referință.

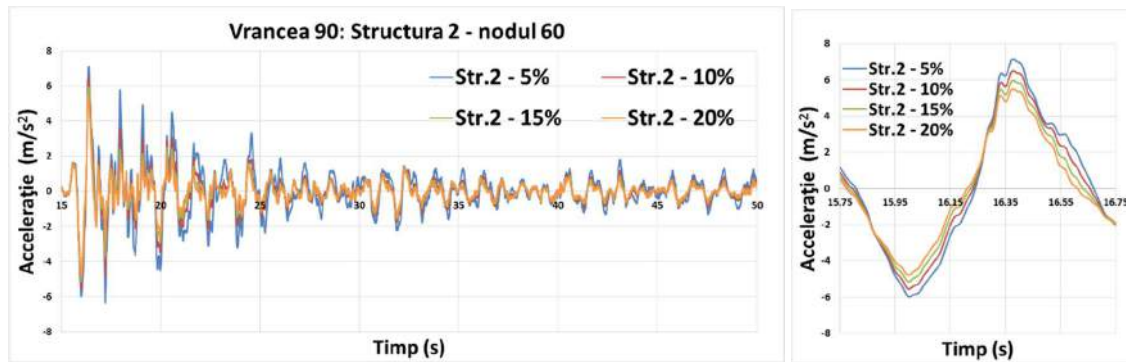


Figura 2.1-21 Variația accelerației relative laterale a structurii 2. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1990

A doua structură, a setului studiat, acționată seismic prin cutremurul Vrancea 1990, produce rezultate similare ale accelerației laterale de nivel. Valorile maxime sunt concentrate într-un interval restrâns: $5 \div 7$ [m/s²]. Diferența maximă dintre aceste structuri - 0,4% [m/s²] - în ceea ce privește parametrul accelerației laterale de nivel, este infimă în comparație cu reducerea produsă prin adăugarea a 5 procente de amortizare suplimentară structurii, în cazul celorlalte două cutremure folosite în aceste analize.

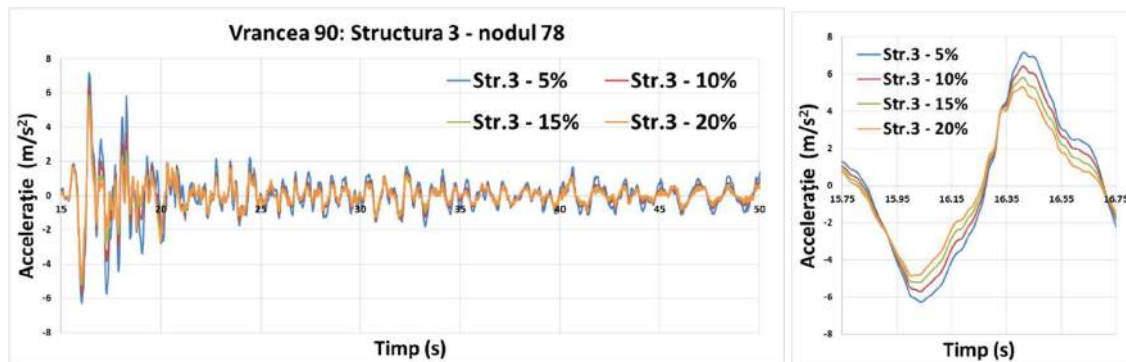


Figura 2.1-22 Variația accelerației relative laterale a structurii 3. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1990

Valoarea maximă a accelerației laterale de nivel atinsă, în cazul structurii 3 acționate seismic de Vrancea 1990 este cca. 7 [m/s²]. Prin amortizare adăugată valorile de vârf al acestui parametru scad până la 5,3 [m/s²]. Reducerea accelerației este considerabilă, însemnând 23% din valoarea parametrului analizat pentru structura de referință.

În cele din urmă este reprezentată **forța tăietoare seismică de bază** pentru evaluarea răspunsului seismic al structurilor 1 ÷ 3, dispuse pe 5 deschideri, și având 6, 9 și 12 niveluri. Accelerogramele analizate au fost din nou Vrancea 1977, Focșani 1986 și Vrancea 1990. Pentru a observa mai bine efectul amortizării adăugate se impun mai multe niveluri ale procentului de amortizare critică, de la 5% (structura de referință) până la 20%, în trepte de 5 procente. Forța

seismică de bază are o relevanță majoră în proiectarea anti-seismică, și este o unealtă eficientă în observarea capacității structurii de a reduce răspunsul seismic prin amortizare adăugată. Acest parametru este reprezentat în Figurile 2.1-23 ÷ 2.1-31.

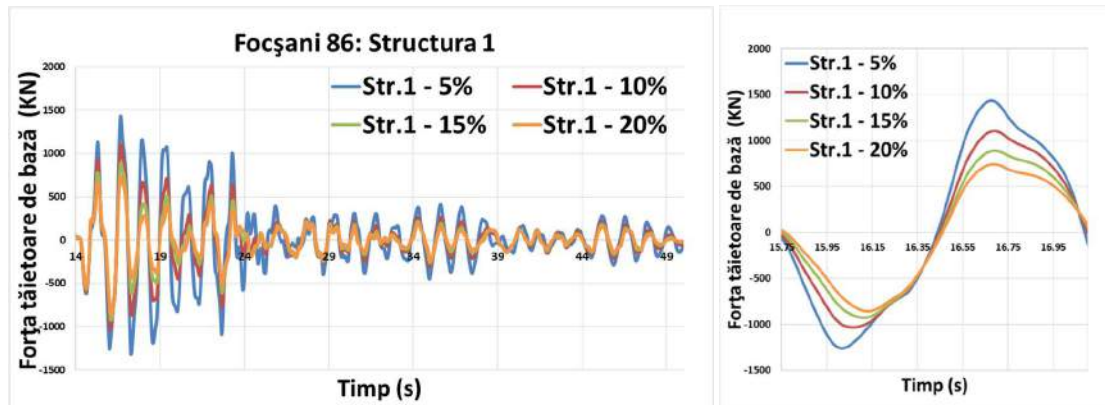


Figura 2.1-23 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 1. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Focșani 1986

Similar reprezentărilor accelerației laterale de nivel, variația forței seismice tăietoare de bază a structurilor este prezentată în două figuri: figura (A) - pe parcursul intervalului relevant al cutremurului (excluzând segmentul de timp care prezintă o variație monotonă a vibrațiilor cutremurului și a structurii), și figura adiacentă (B) – care surprinde un interval egal cu o perioadă de vibrație, ales pentru valorile maxime ale forței tăietoare. Astfel, în figura (B) se observă reducerea acestui parametru de la valoarea 1433 [kN] a structurii de referință ($\xi=5\%$), la valorile 1105, 891 și 742 [kN], pentru structurile cu fracțiunea de amortizare critică egală cu $\xi=10\%$, $\xi=15\%$, și respectiv $\xi=20\%$. Diferența maximă, ca și în cazul deplasărilor relative de nivel, apare între structura de referință și cea cu amortizare $\xi=10\%$, și este egală cu 328 [kN], ce reprezintă cca. 23% din valoarea forței structurii de referință.

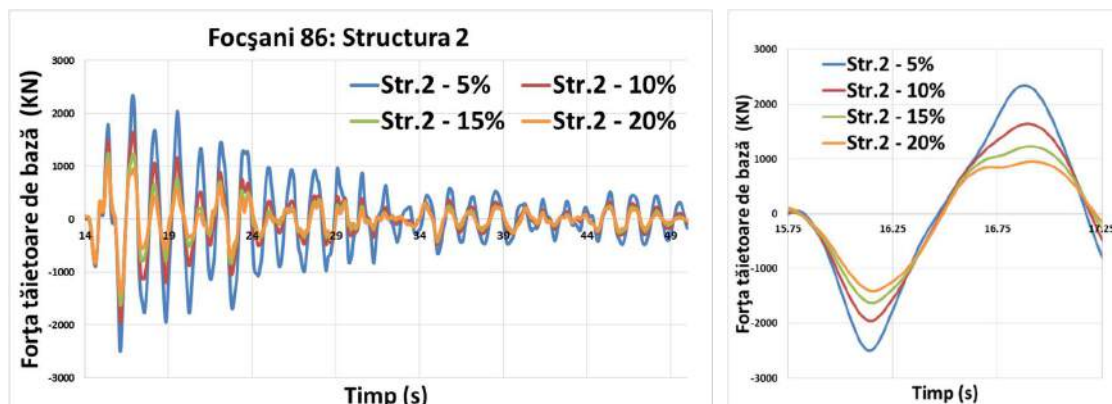


Figura 2.1-24 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 2. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Focșani 1986

Structura 2, cu 9 niveluri, supusă la acțiunea seismică Focșani 1986, prezintă valori crescute ale forței tăietoare seismice de bază. Pornind de la valoarea 2495 [KN], maximul forței tăietoare seismice de bază, pentru structura de referință ($\xi=5\%$), valoarea acesteia se reduce prin amortizare adăugată la 1954, 1625 și 1409 [KN] pentru structurile cu fracțiunea de amortizare critică egală cu $\xi=10\%$, $\xi=15\%$, și respectiv $\xi=20\%$. Este evidentă, astfel, dependența valorii forței tăietoare de bază de cea a amortizării structurii.

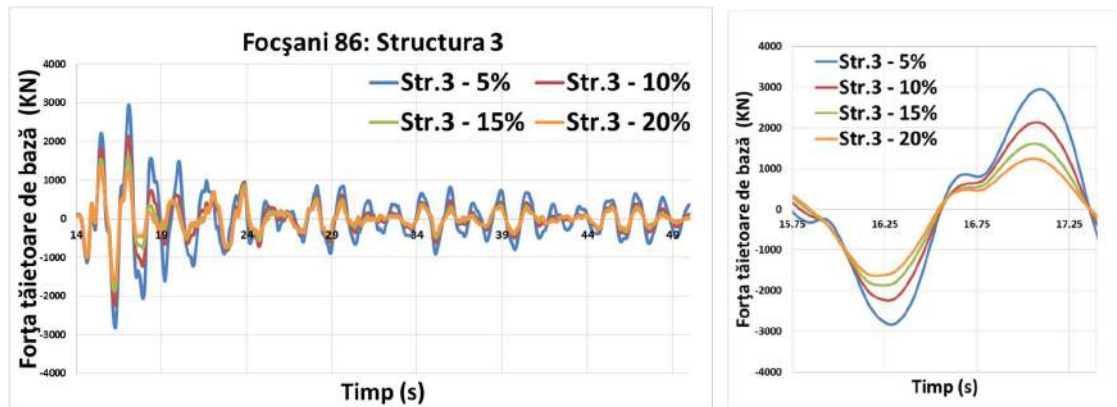


Figura 2.1-25 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 3. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Focșani 1986

În cazul structurii 3, cu 12 niveluri, variația forței tăietoare seismice de bază, demonstrează capacitatea sporită a cadrelor amortizate de a reduce parametrii seismici. În imaginea (A) care arată variația accelerației laterale a variantelor structurale în intervalul 14 ÷ 50 [s], se observă la nivel general evoluția forței față de fracțiunea de amortizare critică. În figura (B) sunt surprinse valorile maxime înregistrate pe parcursul unei oscilații. Structura de referință atinge maximul forței seismice de bază la valoarea 2948 [KN], iar variantele structurale cu amortizare adăugată $\xi=10\%$, $\xi=15\%$ și $\xi=20\%$, valorile 2241, 1866 și respectiv 1632 [KN]. Reducerea forței seismice de bază prin amortizare suplimentară, atinge apogeul în cazul structurii cu $\xi=10\%$, diferența față de structura de referință, a valorilor acestui parametru fiind egală cu 24 procente.

În continuare se prezintă variația forței tăietoare seismice de bază a structurilor 1 ÷ 3, acționate seismic prin cutremurul Vrancea 1977, imaginea (A) reprezentând intervalul 5 ÷ 50 [s] al cutremurului, iar imaginea (B) intervalul definit de perioada de vibrație a structurii, care înregistrează valorile maxime ale acestui parametru:

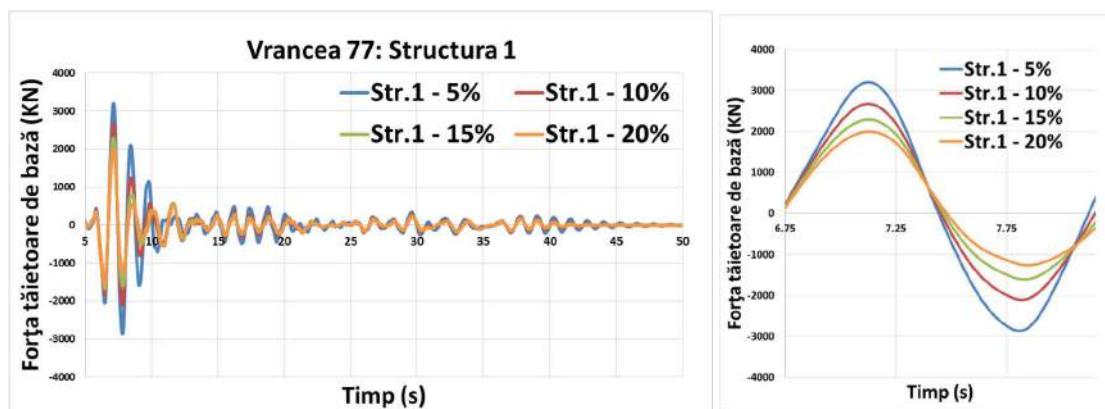


Figura 2.1-26 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 1. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1977

În cazul structurii 1, solicitate de cutremurul Vrancea 1977, valorile forței seismice tăietoare de bază înregistrează vârfuri mult mai mari decât a structurilor acționate prin cutremurul Focșani 1986, anume: 3202 [KN] pentru structura de referință și 2673, 2288 și 1996 [KN] pentru cadrele cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=10\%$, $\xi=15\%$, și respectiv $\xi=20\%$. Prin impunerea unei sarcini seismice de magnitudine superioară, precum Vrancea 1977, se evidențiază mai bine aportul amortizării în reducerea răspunsului seismic al structurilor. Chiar dacă în partea pozitivă a ordonatei se înregistrează valorile maxime ale forței seismice de bază pentru această structură, diferența cea mai mare – între valorile forței a două cadre cu nivel consecutiv de amortizare - se observă în cadrul valorilor negative. Reducerea maximă are loc între structura de referință și cea cu $\xi=10\%$, și este egală cu 26 procente.

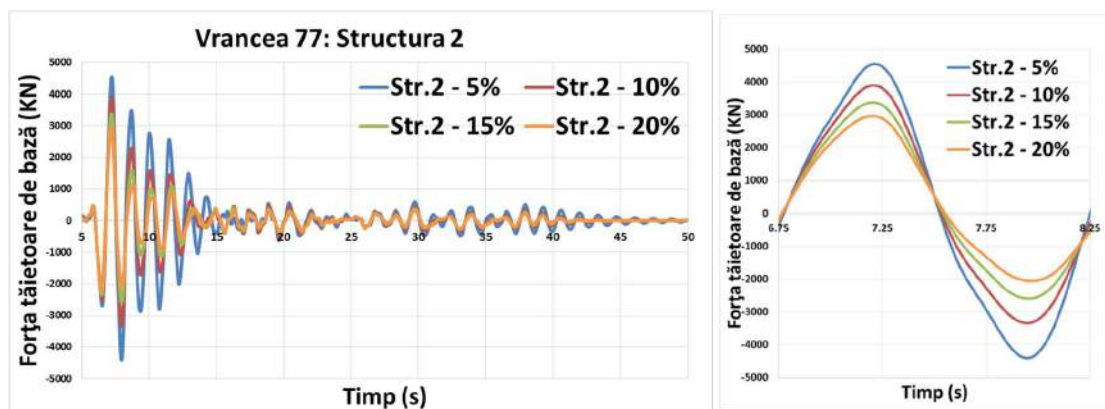


Figura 2.1-27 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 2. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1977

Efectul de reducere a răspunsului seismic prin amortizare adăugată, este surprins și în cazul cadrului 2, cu 9 niveluri, acționat seismic de cutremurul Vrancea 1977. Similar structurilor solicitate de cutremurul Focșani 1986, variația forței tăietoare seismice de bază se diminuează pe măsură ce crește nivelul de amortizare, scăzând de la valoarea de referință 4542

[KN], la 3892, 3375 și 2961[KN] – valorile forței tăietoare seismice de bază a structurilor cu amortizare adăugată $\xi=10\%$, $\xi=15\%$, și respectiv $\xi=20\%$.

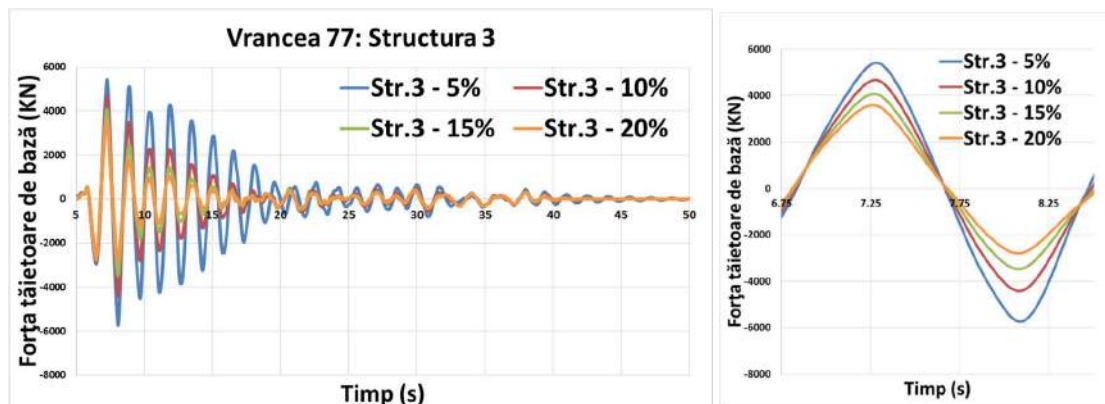


Figura 2.1-28 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 3. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1977

Structura 3, solicitată prin acțiunea seismică Vrancea 1977, atinge vârful maxim al forței tăietoare seismice de bază, la valoarea 5734 [KN]. Reducerea treptată a acestui parametru, odată cu creșterea nivelului de amortizare adăugată produce noi valori ale maximului de forță seismică de bază, anume: 4675, 4072 și 3593 pentru structura cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=10\%$, $\xi=15\%$, și respectiv $\xi=20\%$. Se constată din nou că diferența maximă – în ceea ce privește forța tăietoare seismică de bază – care se produce între două cadre cu nivel consecutiv de amortizare apare între structura de referință și cea cu $\xi=10\%$, și are valoarea 603 [KN], care reprezintă 18% din valoarea forței structurii de referință.

În continuare se prezintă forța tăietoare seismică de bază a structurilor solicitate prin acțiunea seismică Vrancea 1990:

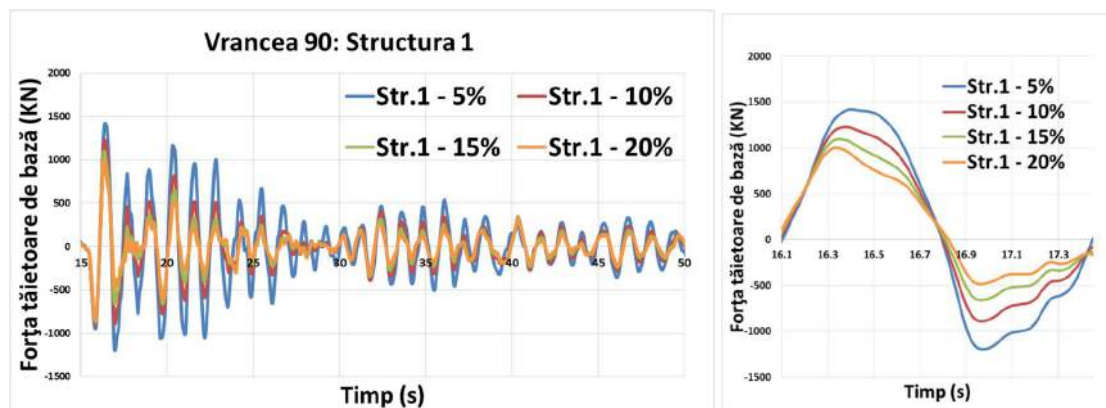


Figura 2.1-29 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 1. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1990

Variația forței tăietoare seismice de bază indusă de cutremurul Vrancea 1990, structurii cu 6 niveluri, este similară celei induse de cutremurul Focșani 1986. Structura de referință

atinge maximul acestui parametru la valoarea 1419 [KN]. Prin creșterea nivelului de amortizare adăugată, forța tăietoare seismică de bază se reduce treptat la valorile 1127, 1097 și 1001 [KN] - pentru fracțiunea de amortizare $\xi=10\%$, $\xi=15\%$, și respectiv $\xi=20\%$. Valoarea maximă cu care se reduce forța tăietoare în acest caz - între două structuri cu nivel consecutiv de amortizare (Str. ref. și Str. $\xi=10\%$) - reprezintă 20% din maximumul structurii de referință.

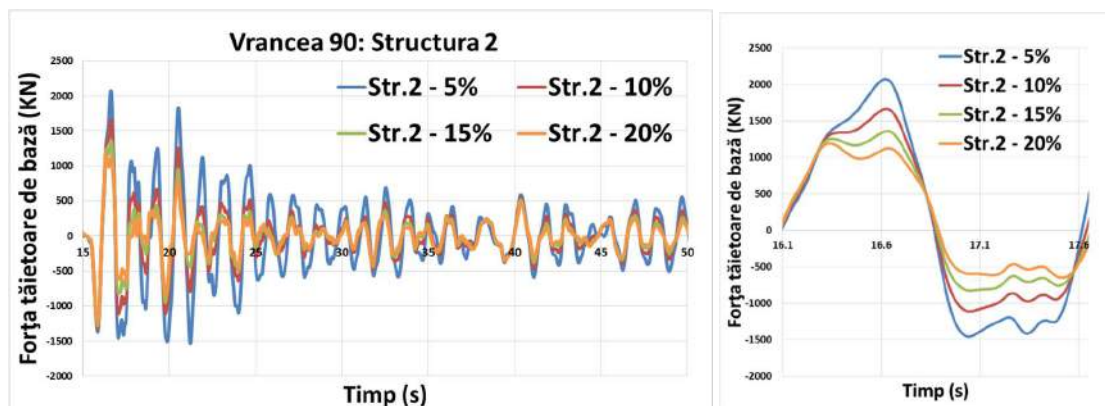


Figura 2.1-30 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 2. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1990

Rezultatele analizelor produse prin solicitarea seismică la cutremurul Vrancea 1990 sunt un nou exemplu al relației: fracțiune de amortizare critică - forța tăietoare seismică de bază. Variația forței tăietoare de bază a structurilor 1 ÷ 3 indusă de acest cutremur scade, așa cum era de așteptat, odată cu creșterea fracțiunii de amortizare critică a structurilor, de la valoarea de referință 2070 [KN] la valorile maxime a structurilor cu amortizare adăugată ($\xi=10\%$, $\xi=15\%$, și respectiv $\xi=20\%$): 1664, 1358 și 1241 [KN].

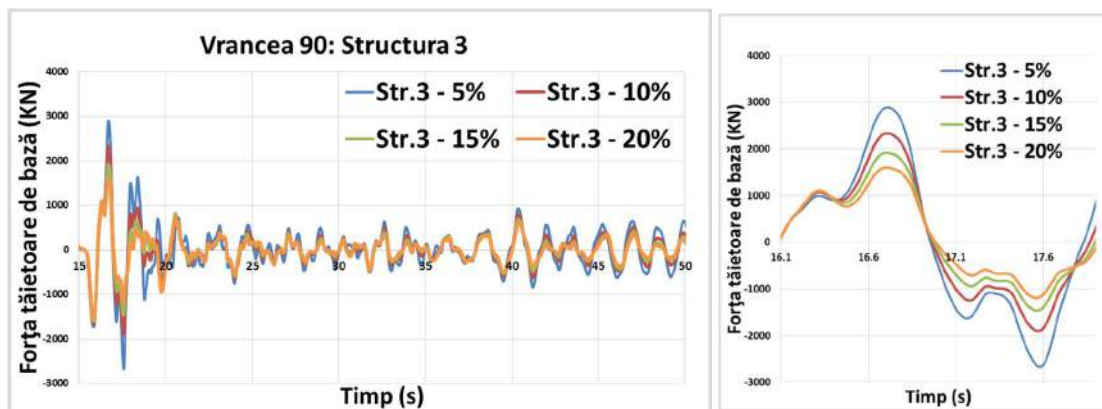


Figura 2.1-31 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 3. (A) Interval complet. (B) Interval perioadă. Vrancea 1990

În cazul structurii 3 acționată de cutremurul Vrancea 1990, valorile forței tăietoare seismice de bază se amplifică. Nivelul ridicat de înălțime al acestei structuri conduce la creșterea maximumului forței pentru structura de referință la valoarea 2888 [KN]. Treptele

suplimentare de amortizare $\xi=10\%$, $\xi=15\%$, și respectiv $\xi=20$ conduc la reducerea forței tăietoare seismice de bază la valorile: 2333, 1915 și respectiv 1597 [KN].

2.2 Efectele rigidității laterale în răspunsul seismic

Rigiditatea structurii este probabil, caracteristica structurală cea mai importantă prin influența ei asupra stării cinemate, a stării statice și a stării de stabilitate, generală și locală a unei structuri. Pe cât este de importantă prin consecințele asupra acestor stări, pe atât este de simplu și de mult „manipulată” în vederea obținerii unei alcătuirii structurale adecvate. Într-adevăr, modificarea rigidității generale sau locale a unei structuri / a unui element de structură, implică modificări în răspunsul structurii la acțiunea asociată. Paleta largă de curpindere a influenței rigidității asupra comportării structurii (influența asupra stării de eforturi, asupra stării cinemate - deplasări și deformații, influența asupra stabilității) conduce, de multe ori, la aspecte neluate în considerare, sau simplu, nedorite. Astfel, de exemplu, creșterea rigidității laterale (a unei structuri multi-etajate) decisă cu scopul asigurării „efectului de șaibă” conduce la perioade proprii de vibrații mai mici și, deci, la forțe seismice (de bază și static echivalente de nivel) mai mari. Modificarea rigidității unei structuri, este, în același timp, mijlocul – cu siguranță cel mai folosit – pentru adecvarea unei structuri la cerințele prevederilor de proiectare cuprinse în norme [6], [8], [22], [54]. Chiar și obținerea unui mecanism de cedare post-elastică a unei structuri conform prevederilor normelor de proiectare se obține tot prin „manipularea” rigidității: prin creșterea rigidității stâlpilor se asigură formarea zonelor de plastificare în rigle [6], [55]. Acesta este un alt exemplu prin care modificarea rigidității se impune dintr-un singur motiv (asigurarea mecanismului de cedare post-elastică impus de norme) dar are consecințe asupra întregului spectru de răspuns al structurii. Această situație, în care consecințele modificării rigidității sunt studiate unilateral, este și o urmare a faptului că rigiditatea este asociată (inclusiv în codurile de proiectare) câte unei singure componente a răspunsului seismic. De cele mai multe ori această componentă este deplasarea pe direcția gradelor de libertate cărora le este asociată caracteristica de rigiditate. Asocierea rigidității cu un anumit vector al gradelor de libertate generează mecanismul prin care consecințele rigidității asupra unui alt vector al gradelor de libertate sunt, adesea, omise. Cel mai frecvent, acest lucru se întâmplă în cazul analizelor dinamice când vectorii gradelor de libertate dinamice sunt diferiți de cei asociați analizelor statice. Care este atunci, posibilitatea asocierii simultane a rigidității cu întregul spectru al componentelor (statice, cinemate) care formează răspunsul seismic al

unei structuri? Un răspuns posibil este includerea în răspunsul seismic a unor componente sintetice care să includă în structura lor atât parametrii tradiționali ai răspunsului seismic (deplasări, deformații, eforturi secționale, eforturi unitare) cât și parametrii de tip energie. Aceasta, energia, procesează și sintetizează atât parametrii cinematici (deplasări, viteze, accelerații) și statici (eforturi) cât și parametrii asociați stării de rigiditate, de ductilitate (deformări plastice) și de amortizare. Dezvoltările energetice și asocierea lor cu răspunsul seismic sunt prezentate în Cap. 4.

În continuare este prezentat un studiu al efectelor rigidității asupra componentelor tradiționale ale răspunsului seismic. Studiul constă în analize seismice conduse asupra unui set de structuri metalice multi-etajate acționate de cele trei cutremure selectate, în prezentarea grafică și numerică a rezultatelor acestor analize și în comentarii a acestor rezultate. În primul rând se prezintă un parametru important în proiectarea anti-seismică, anume perioada de vibrație a structurilor. În tabelul 2.2-1 se poate observa evoluția perioadei structurilor în funcție de metoda de rigidizare aleasă: structura de referință, structura rigidizată și cea contravântuită. Rigidizarea laterală, fie prin secțiuni transversale crescute sau prin contravântuiri conduce la reducerea perioadei, în cazul primei structuri cu 20%, respectiv 34%. Metodele de rigidizare laterală în cazul structurii 2, sunt la fel de eficiente în reducerea perioadei, cele două valori – 1,09 și 1,04 fiind aproape egale. Procentul cu care se reduce acest parametru este 19% - prin secțiuni crescute – și 23% - prin contravântuire. Variantele rigidizate ale structurii 3, însă, prezintă aceeași perioadă de vibrație, anume 1,25, redusă cu 19%, față de structura de referință.

Tabel 2.2-1 Perioada de vibrație a structurilor 1 ÷ 3, și a cutremurelor Focșani 1986, Vrancea 1990 și Vrancea 1977

Structura	Str. 1	Str. 2	Str. 3	Focșani 86	Vrancea 90	Vrancea 77
Referință/Am.	1.25	1.36	1.55			
Rigidizată	1.00	1.09	1.25	0.50	0.66	1.16
Contravântuită	0.82	1.04	1.25			

O componentă tradițională a răspunsului seismic și care relevă, într-adevăr, efectele rigidității laterale asupra răspunsului seismic este constituită din deplasările laterale relative de nivel [56], [57], [58], [59]. **Procentul deplasărilor relative de nivel** este, în același timp, un criteriu important care trebuie verificat și îndeplinit în activitatea de proiectare a structurilor multi-etajate. Pentru evidențierea influenței rigidității laterale asupra procentului deplasărilor relative de nivel, acestea au fost calculate și reprezentate (Fig. 2.2-1 ÷ 2.2-3) în următoarele

ipostaze: structura de referință, structura contravântuită și structura rigidizată, toate cu fracțiunea de amortizare critică inerentă de 5% și cu structura cu amortizare suplimentară caracterizată prin valoarea fracțiunii de amortizare critică de 20%.

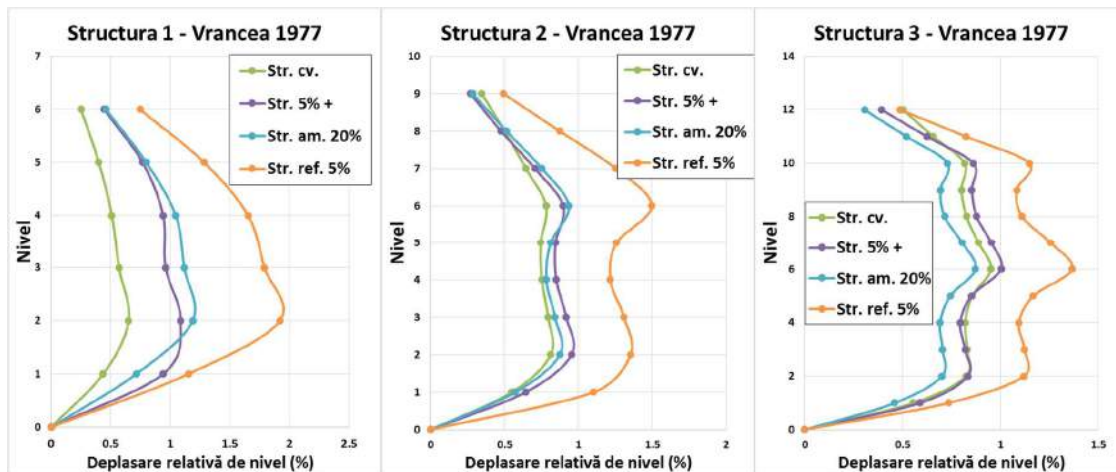


Figura 2.2-1 Deplasări relative de nivel - structura (A)1, (B)2 și (C)3. Vrancea 1977

Prin solicitarea celor 3 structuri la acțiunea seismică Vrancea 1977 se constată efectul puternic de rigidizare adus de contravântuiri dar și creșterea treptată a efectului de reducere a deplasărilor laterale prin amortizare adăugată odată cu ridicarea gradului de amortizare. În cazul primei structuri, cu 6 niveluri, contravântuirea este soluția care conduce la rigiditatea laterală cea mai mare, reducând deplasarea relativă de nivel cu cca. 1,3%. Pentru structurile cu 9 și cu 12 niveluri, efectele (asupra deplasărilor laterale) sporirii rigidității laterale prin creșterea secțiunilor, a echipării cu contravântuiri și a prevederii cu amortizare adăugată sunt foarte apropiate. În cazul structurii cu 12 niveluri se observă că varianta cu amortizare suplimentară are deplasările cele mai reduse dintre toate cele patru ipostaze. Diferența maximă a deplasărilor relative de nivel între structura cu amortizare adăugată și cea de referință este de cca. 0,5%.

În continuare sunt prezentate variațiile deplasărilor relative de nivel induse celor trei structuri de acțiunea seismică Focșani 1986.

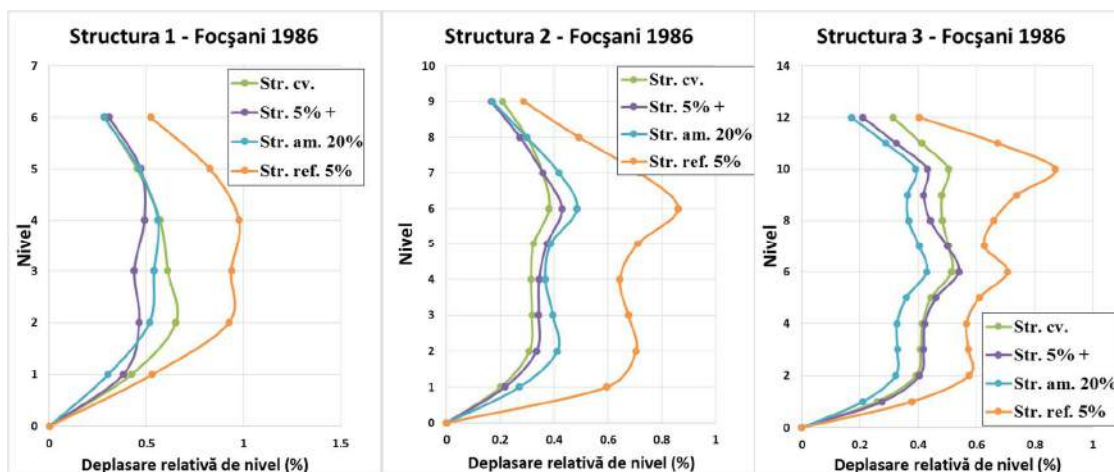


Figura 2.2-2 Deplasări relative de nivel - structura (A)1, (B)2 și (C)3. Focșani 1986

Și în cazul acestei acțiuni seismice se constată următoarele:

- Influența echipării cu contravântuiri asupra reducerii deplasărilor laterale scade pe măsură ce crește numărul de niveluri. În cazul structurii cu 6 niveluri, rigidizarea prin secțiuni transversale crescute induce cele mai mici deplasări laterale. În cazul structurilor cu 9 niveluri efectul cel mai puternic asupra reducerii deplasărilor laterale îl are echiparea cu contravântuiri, ajungându-se ca pentru structura cu 12 niveluri efectul amortizării adăugate să fie – la rândul său – mai puternic decât efectul echipării cu contravântuiri.

În cele din urmă, sunt prezentate rezultatele obținute prin acționarea seismică structurilor la cutremurul Vrancea 1990:

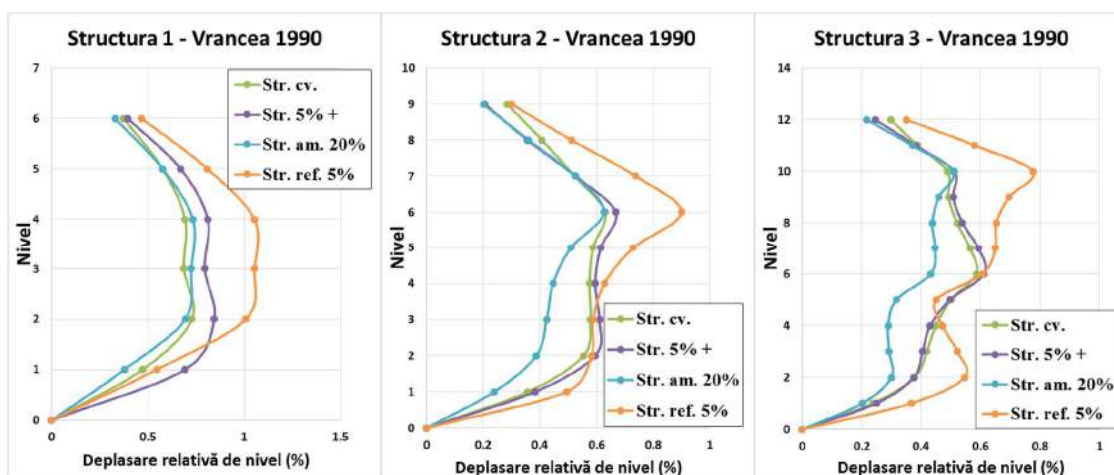


Figura 2.2-3 Deplasări relative de nivel - structura (A)1, (B)2 și (C)3. Vrancea 1990

Spre deosebire de rezultatele analizelor realizate cu celelalte două accelerograme – Vrancea 1977 și Focșani 1986 – care prezintă varianta contravântuită mai avantajoasă pentru structura de 6 niveluri, în cazul încărcării cu accelerograma Vrancea 1990 impactul amortizării

adăugate asupra acestei structuri este foarte similar. Efectul celor două metode de rigidizare (contravântuirea și rigidizarea prin creșterea secțiunilor transversale) asupra deplasării laterale relative de nivel a structurilor, cu 9 și 12 niveluri, este aproape identic. Se constată că introducerea unui nivel suplimentar de amortizare ($\xi=20\%$) are impactul cel mai puternic, de reducere a deplasărilor relative de nivel.

O altă componentă a răspunsului seismic al structurilor multi-etajate – foarte relevantă din punct de vedere al influenței rigidității laterale asupra răspunsului seismic – este **forța tăietoare seismică de bază** [60], [61], [62]. Variația acestui parametru în ipostazele structurale menționate mai sus este prezentată în Figurile 2.2-4 ÷ 2.2-12.

În cele ce urmează se prezintă rezultatele obținute prin solicitarea structurilor la cutremurul Focșani 1986:

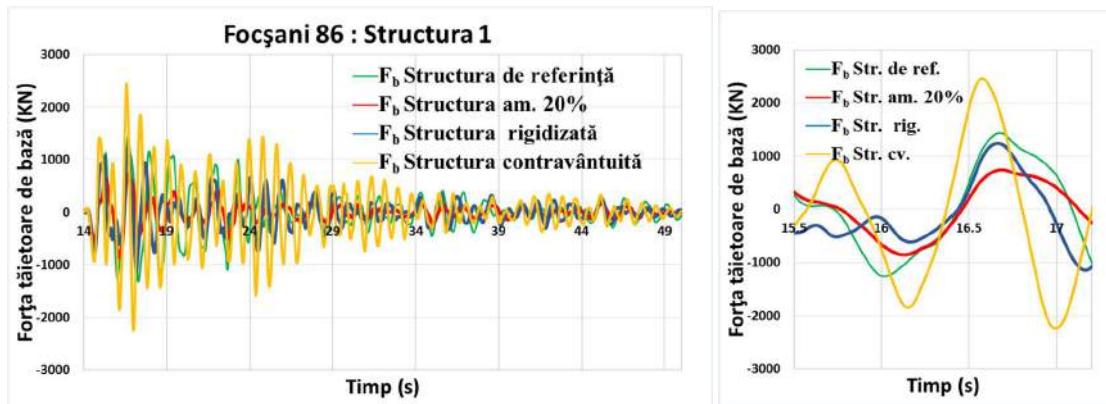


Figura 2.2-4 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 1. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Focșani 1986

Variația forței tăietoare seismice de bază este prezentată, ca și în cazul structurilor cu niveluri treptate de amortizare adăugată, în două figuri alăturate, prima reprezentând intervalul relevant al cutremurului, excluzând în cazul cutremurului Focșani 1986 segmentul de timp 1 ÷ 14 [s], iar a doua figură - intervalul egal cu o perioadă. Perioada reprezentată a fost selectată pentru a include valorile de vârf ale acestui parametru. În cazul structurii 1, acționată seismic de cutremurul Focșani 1986, forța seismică tăietoare de bază a structurii de referință are maximul 1433 [KN], care scade prin amortizare adăugată la valoarea 855 [KN] – $\xi=20\%$. La fel și rigidizarea prin secțiuni transversale crescute are un efect de reducere a forței tăietoare, valoarea forței tăietoare de bază fiind 1238 [KN]. Varianta contravântuită însă produce valoarea maximă dintre toate ipostazele structurii 1, anume 2457 [KN].

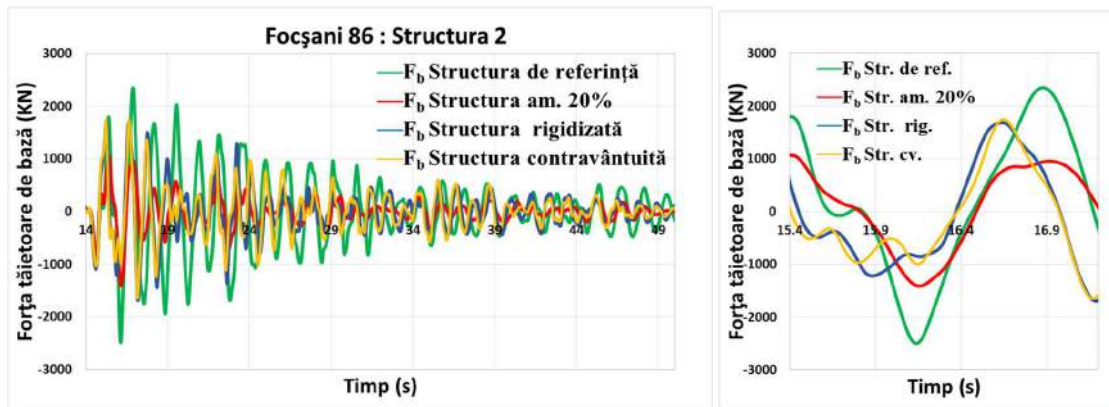


Figura 2.2-5 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 2. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Focșani 1986

A doua structură, solicitată seismic de cutremurul Focșani 1986, prezintă o variație diferită a forței seismice de bază în cele patru ipostaze analizate. Maximul forței tăietoare este atins de structura de referință cu valoarea 2495 [KN], iar structurile rigidizate prin secțiuni transversale crescute și contra-vântuiri au următoarele valori, anume 1722 [KN], respectiv 1742 [KN]. Amortizarea adăugată ($\xi=20\%$) are efectul de reducere al forței tăietoare seismice de bază, cel mai puternic (1409 [KN]).

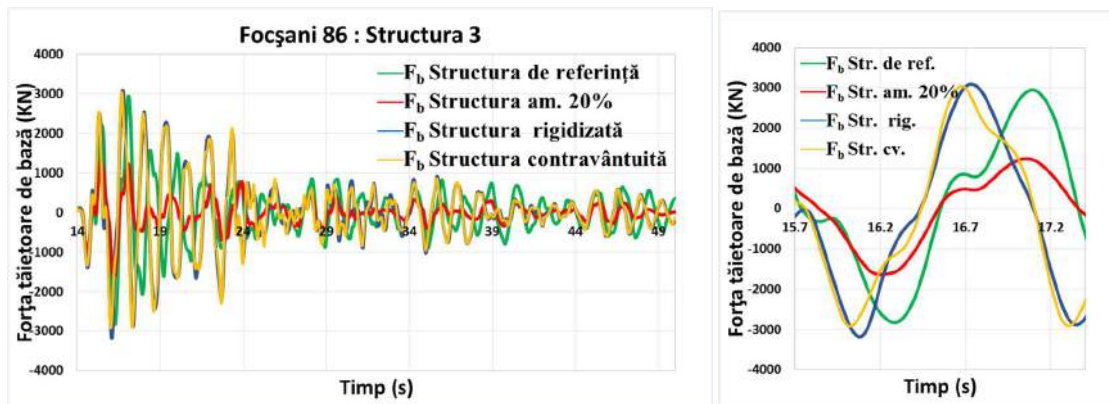


Figura 2.2-6 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 3. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Focșani 1986

Influența rigidizării laterale, prin contra-vântuiri sau secțiuni transversale crescute, asupra răspunsului seismic al structurii 3, acționată seismic de cutremurul Focșani 1986, este nesemnificativă asupra forței tăietoare seismice de bază. Valoarea forței tăietoare a cadrului de referință – 2984 [KN] – este foarte similară valorilor structurilor rigidizate lateral – prin creșterea secțiunilor transversale și contra-vântuire - anume: 3178 [KN], respectiv 3041 [KN]. În ceea ce privește structura amortizată suplimentar, acest parametru este redus considerabil, la valoarea 1632 [KN].

În continuare se prezintă rezultatele obținute prin solicitarea seismică la cutremurul Vrancea 1977, a celor trei structuri:

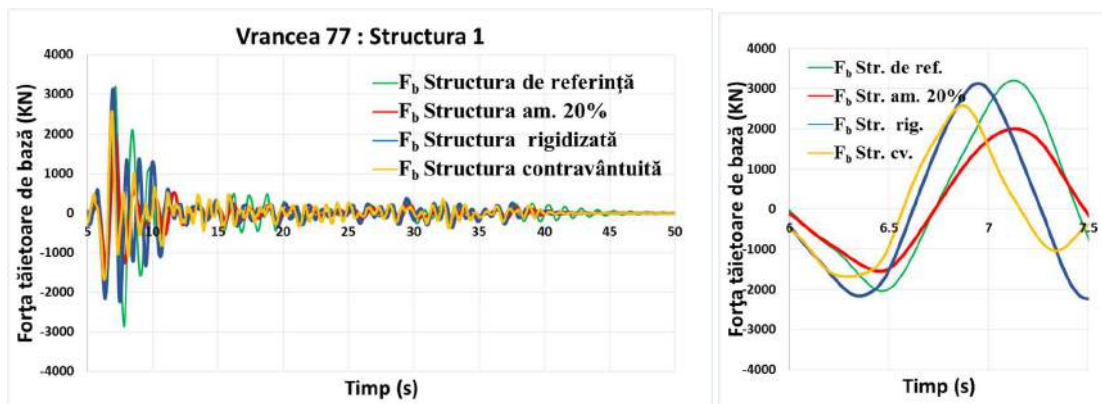


Figura 2.2-7 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 1. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1977

Aționată de cutremurul Vrancea 1977, structura 1 prezintă variații similare ale forței tăietoare seismice de bază în două dintre cele 4 ipostaze analizate: cadrul de referință și cel rigidizat prin secțiuni transversale crescute, cu valorile maxime 3202 [kN], respectiv 3124 [kN]. Echiparea cu contravântuiri și amortizare adăugată în procent de 20%, are un efect de reducere a forței tăietoare seismice, valorile de vârf atinse de acestea fiind 2570 [kN] și 1996 [kN].

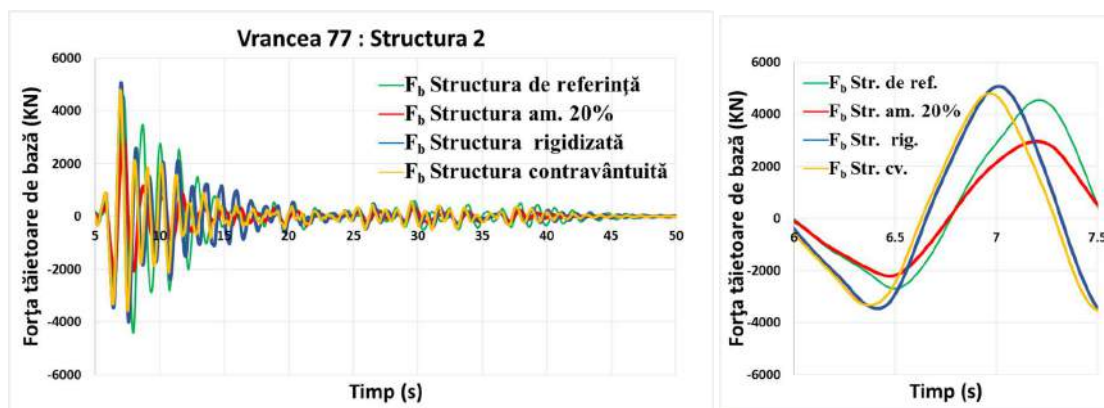


Figura 2.2-8 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 2. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1977

În cazul structurii 2, acționată seismic de cutremurul Vrancea 1977, se observă efectul rigidizării laterale, de amplificare a forței tăietoare seismice de bază, de la valoarea de referință 4542 [kN] la valorile 5062 [kN] – a cadrului rigidizat prin secțiuni transversale crescute – și 4797 [kN] – a cadrului contravântuit. Amortizarea adăugată, însă, conduce la reducerea acestui parametru, la valoarea 2961 [kN].

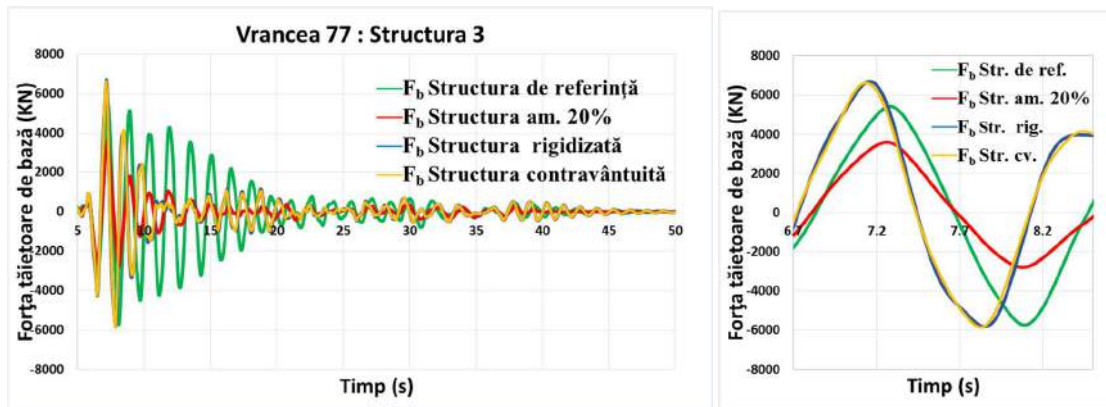


Figura 2.2-9 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 3. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1977

A treia structură, acționată de accelerograma Vrancea 1977, prezintă același tipar al variației forței tăietoare seismice de bază. Valoarea maximă – 5734 [KN] - a structurii de referință este depășită de valorile, aproape egale, a structurilor rigidizate lateral prin contravântuiri – 6614 [KN] – și prin secțiuni transversale crescute – 6693 [KN]. Cadrul echipat cu amortizare adăugată, având fracțiunea de amortizare critică egală cu 20%, înregistrează vârful forței tăietoare seismice de bază la valoarea 3403 [KN], mult redusă față de cadrele rigidizate suplimentar.

Ultima accelerogramă utilizată pentru surprinderea variației forței tăietoare seismice de bază este accelerograma Vrancea 1990:

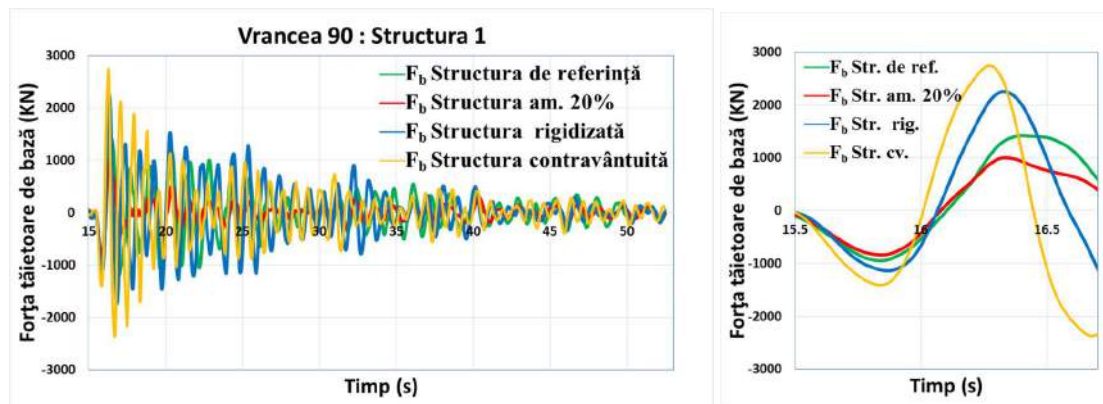


Figura 2.2-10 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 1. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1990

Valoarea de vârf a forței tăietoare seismice de bază, înregistrată de structura 1, acționată seismic de cutremurul Vrancea 1990, este atinsă în varianta contravântuită. Structurile rigidizate lateral prezintă valori crescute ale acestui parametru: 2255 și 2741 [KN] – a structurii rigidizate prin creșterea secțiunilor transversale ale elementelor, respectiv a structurii contravântuite – față de structura de referință (1419 [KN]). În cazul structurii cu fracțiunea de

amortizare critică egală cu $\xi=20\%$, forța tăietoare seismică de bază este redusă la valoarea 1001 [KN].

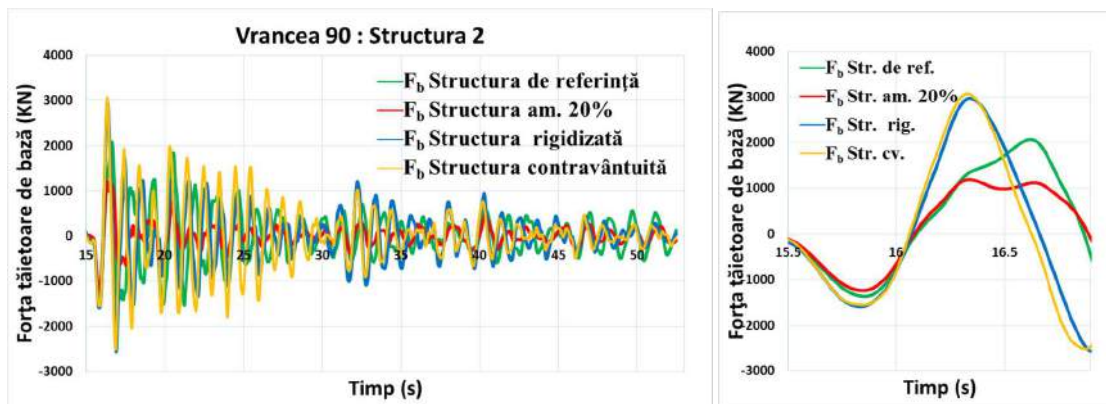


Figura 2.2-11 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 2. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1990

Similaritatea variației forței tăietoare seismice de bază a celor două cadre rigidizate lateral prin secțiuni transversale crescute și prin contravântuire, continuă, și în ceea ce privește structura 2. Maximul forței, atins de cele două structuri, aproape se confundă, valorile lor fiind 2969 [KN] – structura rigidizată prin secțiuni transversale – respectiv, 3068 [KN] – structura contravântuită. Efectul de reducere a parametrilor răspunsului seismic, prin amortizare adăugată se constată și în acest caz. Valoarea forței tăietoare seismice de bază a structurii de referință – 2070 [KN] – fiind redusă la 1241 [KN] – prin suplimentarea amortizării ($\xi=20\%$).

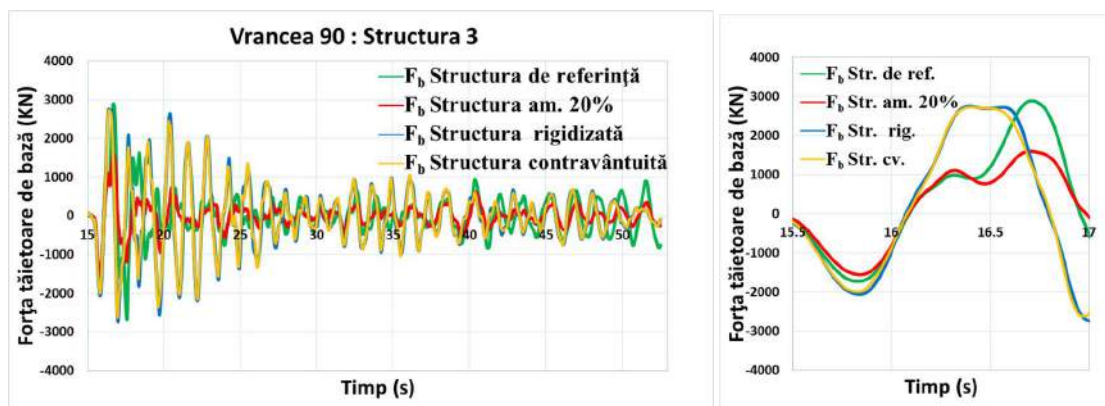


Figura 2.2-12 Variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 3. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1990

Variația forței tăietoare seismice de bază, în cazul structurii 3, solicitate seismic de cutremurul Vrancea 1990, este, din nou, similară pentru structurile rigidizate prin secțiuni transversale crescute și prin contravântuiri. Deși în Figura 2.2-12 se observă delimitarea graficului forței structurii de referință față de cel al structurilor rigidizate lateral, maximul celor trei cadre este apropiat: 2888 [KN] – Str. ref. - 2760 [KN] – Str. + - respectiv 2731 [KN] – Str.

cv. Prin suplimentarea fracțiunii de amortizare critică a structurii 3, la valoarea $\xi=20\%$, se obține reducerea forței tăietoare – 1597 [KN].

Accelerațiile laterale de nivel – considerate drept componente ale răspunsului seismic al structurilor multi-etajate – sunt mai rar calculate și analizate [51], [52], [53]. Totuși, accelerațiile (relative/absolute) de nivel constituie un indiciu important și relevant în studiul influenței rigidității laterale asupra răspunsului seismic al structurilor multi-etajate. Într-adevăr accelerațiile laterale sunt direct corelate cu perioadele de vibrație ale structurilor. Înafara de acest aspect (corelarea directă a accelerației cu rigiditatea laterală), accelerațiile laterale au devenit un indicator de bază în evaluarea costurilor de mentenanță a structurilor multi-etajate amplasate în zone seismice.

Pe scurt, despre evaluarea costurilor de investiții și de mentenanță ale structurilor amplasate în zone seismice. În activitatea de proiectare a structurilor multi-etajate amplasate în zone seismice, deplasările laterale relative sunt unul dintre cei mai dificili parametri care trebuie încadrați în limitele prescrise de normative. Aducerea valorilor deplasărilor relative de nivel în limitele admisibile înseamnă – practic – adecvarea rigidității laterale prin „jocul secțiunilor” elementelor structurale stâlpi și rigle și, după caz, prevederea contravântuirilor. În acest fel respectarea limitelor, prevăzute în normele de proiectare, deplasărilor relative de nivel, influențează direct costul investiției asociat structurii. Dar costul investiției este doar o componentă a costului total. Cealaltă componentă o constituie costul de mentenanță care include nu numai costurile asociate structurii (de tip reabilitări post seism, de exemplu) ci și costuri asociate mentenanței dotărilor din clădire (costuri de reabilitare/înlocuire a aparaturii, echipamentelor etc.) din clădire. Această componentă financiară, constituită din cheltuielile implicate de degradările provocate dotărilor din clădire, este, uneori, mai importantă decât costurile reabilitărilor structurale post-seism [63], [64], [65], [66]. Acest lucru se datorează, în bună măsură, și faptului că structura propriu-zisă este, în general, adecvat proiectată prin respectarea prescripțiilor normative referitoare la deplasările relative de nivel. Așa cum costurile de investiții sunt relaționate de deplasările relative, costurile de mentenanță sunt relaționate de accelerațiile laterale de nivel. În această relație *accelerații relative de nivel - costuri de mentenanță* rezidă importanța considerării accelerațiilor laterale de nivel drept componentă a răspunsului seismic a structurilor multi-etajate. În continuare sunt prezentate variațiile accelerației relative de nivel în ipostazele structurale considerate.

Printre cele mai „costisitoare” cutremure se numără cel din Japonia, 11 martie 2011, cu pierderi economice estimate la 309 miliarde de dolari, Kobe, 17 ianuarie 1995, cu pierderi de

100 de miliarde de dolari și Northridge, 17 ianuarie 1994, cu o sumă de 42 de miliarde de dolari reprezentând pagubele materiale. Deși este greu de estimat exact procentul asociat cu pierderile de ordin nestructural, acestea sunt însemnate. Un studiu [67] care prezintă date prelevate în urma cutremurului din San Fernando (9 februarie 1971) relevă faptul că 80% din pierderile economice produse sunt de natură nestructurală.

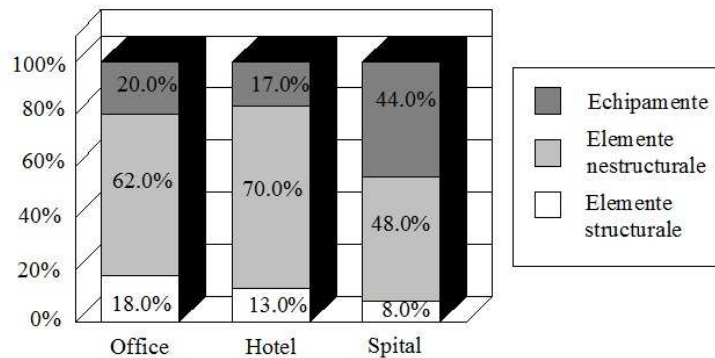


Figura 2.2-13 Structura investiției totale pentru diferite funcționalități structurale

Motivele pentru care elementele nestructurale cauzează pierderile economice cele mai importante în cadrul evenimentelor seismice sunt:

- Procentul superior din investiția totală dedicată elementelor nestructurale: 70-80 %.
- Magnitudinea seismică necesară pentru avarierea elementelor nestructurale este mult mai mică decât pentru elementele structurale.
- Suprafața atinsă de un cutremur capabil să inducă eforturi ce avariază elementele structurale, este inferioară suprafeței atinse de același cutremur, în ceea ce privește distrugerea elementelor nestructurale.
- Frecvența cutremurelor de intensitate joasă, responsabile de producerea eforturilor ce rezultă în avarierea elementelor nestructurale, este mult mai mare decât a celor puternice.

În continuare sunt prezentate variațiile accelerației laterale de nivel a structurilor 1, 2 și 3 cu 5 deschideri, și 6, 9 și 12 niveluri, în Figurile 2.2-14 ÷ 2.2-22. Rezultatele acestea sunt obținute prin aplicarea a trei cazuri de solicitare seismică, folosind accelerogramele înregistrate în România: Vrancea 1977, Focșani 1986 și Vrancea 1990. Se reamintește faptul că două din cele trei accelerograme - Focșani 1986 și Vrancea 1990 - au fost scalate pentru a atinge maximul accelerației la valoarea 0,24g. Fiecare tipar structural prezintă trei variante de protecție seismică, pe lângă structura de referință (cu valoarea fracțiunii de amortizare inerentă

egală cu 5%), anume: structura rigidizată prin secțiuni transversale crescute, structura contravântuită (ambele cu amortizare inerentă de 5%) și structura cu amortizare adăugată - egală cu 20%.

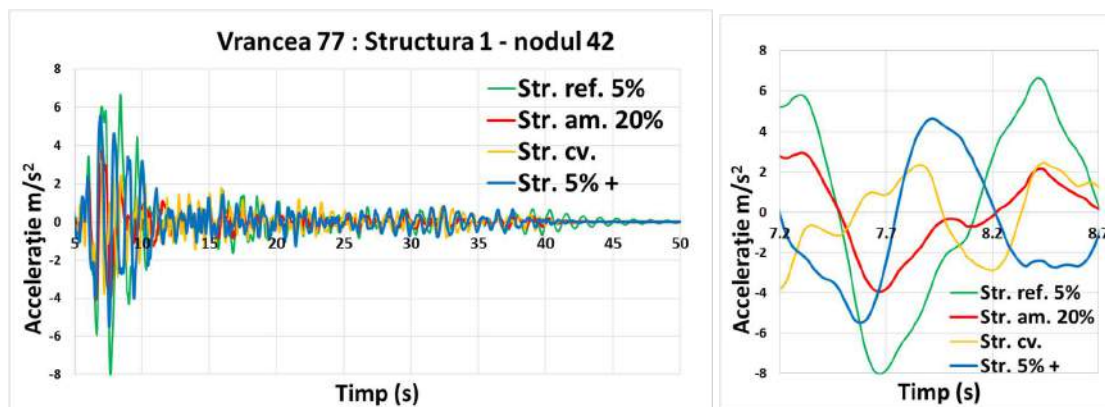


Figura 2.2-14 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 1. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1977

Primele structuri studiate pentru surprinderea răspunsului seismic prin parametrul accelerație laterală de nivel, sunt cele acționate seismic de cutremurul Vrancea 1977. Din nou, datele grafice se prezintă în două imagini paralele, prima dintre ele - (A) - reprezentând variația totală relevantă a accelerației nodului, excluzând partea de început a cutremurului (0 ÷ 5 [s]) în acest caz), iar a doua – (B) – se concentrează pe un interval perioadă a structurilor, care cuprinde maximul acestui parametru. În ceea ce privește prima structură, valoarea maximă a accelerației este întâlnită la varianta de referință – 7,99 [m/s²] – urmată fiind de structura rigidizată prin secțiuni transversale crescute – 5,54 [m/s²]. Echiparea cu amortizare adăugată (fracțiunea de amortizare critică $\xi=20\%$) și cu un sistem de contravântuiri, produc un efect de reducere a accelerației laterale de nivel, aproape identic, valorile maxime ale acestora fiind, 4,07 și 4,01 [m/s²].

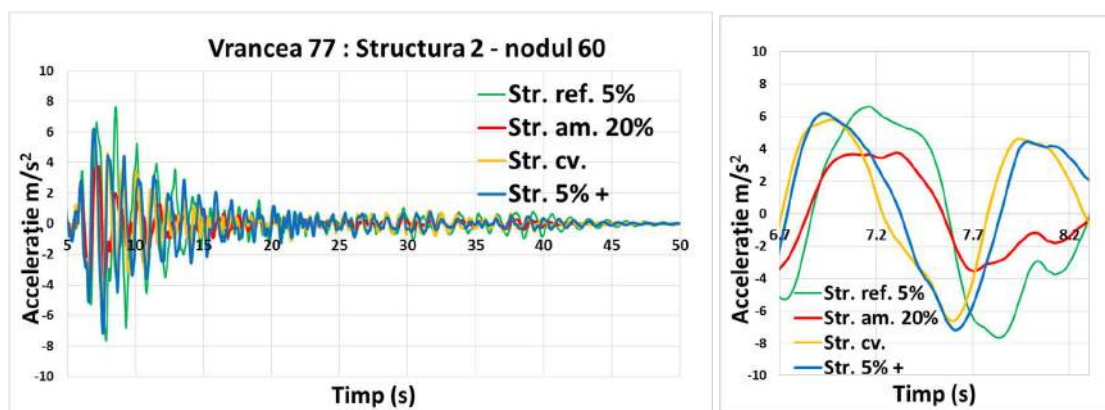


Figura 2.2-15 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 2. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1977

Variația accelerației, în cazul structurii 2, acționată de cutremurul Vrancea 1977, se modifică. Valorile maxime ale acestui parametru, pentru variantele structurale rigidizate lateral: prin contravântuiri – 6,61 [m/s²] - și secțiuni transversale crescute – 7,15 [m/s²] - se apropie mult de valorile structurii de referință – 7,64 [m/s²]. Amortizarea adăugată, însă, conduce la o reducere drastică a accelerației laterale, la valoarea 4,25 [m/s²].

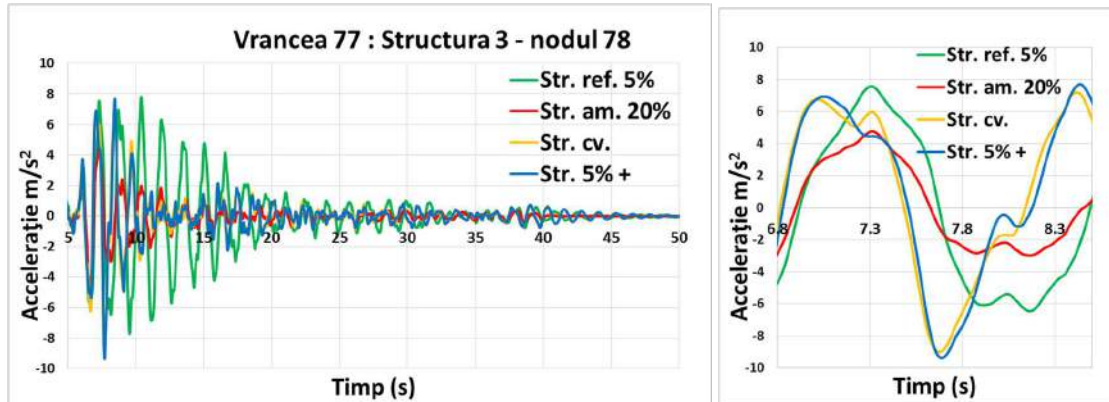


Figura 2.2-16 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 3. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1977

În cazul structurii 3, variația accelerației laterale de nivel a celor 4 ipostaze, se structurează foarte diferit. Dacă în cazul structurii 1, cadrul de referință atingea vârful maxim al accelerației, varianta de referință a structurii 3 are valoarea maximă 7,79 [m/s²], în timp ce variantele rigidizate lateral, prin contravântuiri și prin creșterea secțiunilor transversale produc valori numerice superioare, anume 8,99, respectiv 9,36 [m/s²]. Prin amortizare adăugată, se obține însă valoarea 4,75 [m/s²], ce semnifică o reducere cu 38% a acestui parametru.

În continuare, se prezintă variația accelerației laterale de nivel, a structurilor acționate seismic prin cutremurul Focșani 1986:

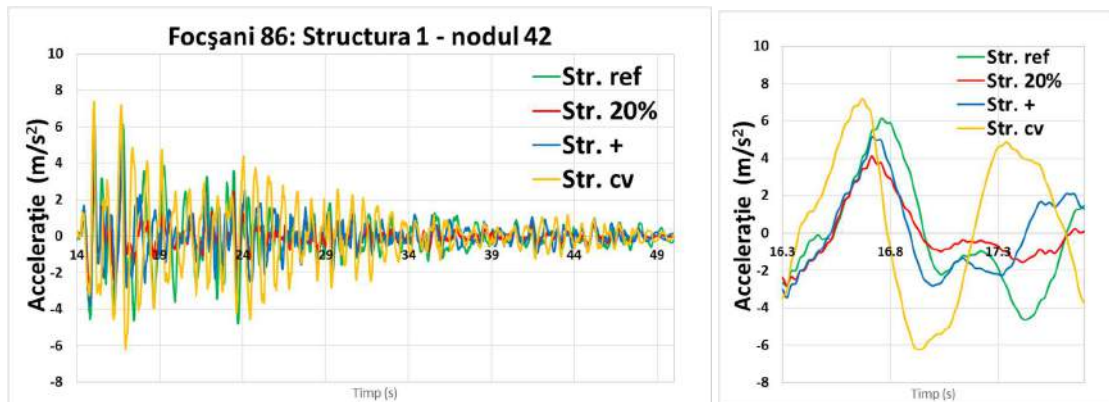


Figura 2.2-17 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 1. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Focșani 1986

Prima structură acționată de accelerograma Focșani 1986 – structura 1 – produce valorile maxime ale accelerației laterale în varianta contravântuită – 7,39 [m/s²]. Valoarea de

vârf a structurii de referință – 6,15 [m/s²] - se reduce prin rigidizare laterală cu secțiuni transversale crescute și prin suplimentarea amortizării, la valorile 6,13, respectiv 4,12 [m/s²].

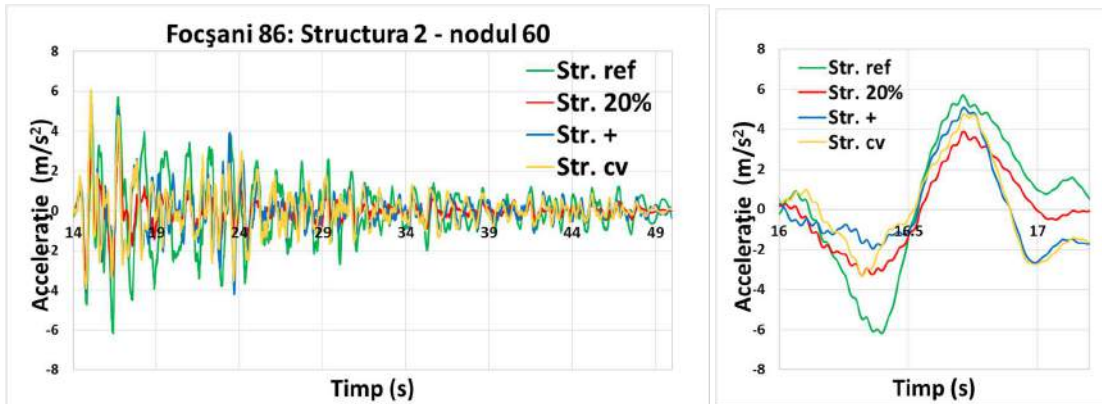


Figura 2.2-18 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 2. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Focșani 1986

Variația accelerației laterale de nivel a structurii 2, acționată seismic de cutremurul Focșani 1986, atinge maximum în varianta de referință, cu valoarea 6,15 [m/s²]. Echiparea structurii cu un sistem de contravântuiri, produce o valoare maximă a accelerației laterale de nivel aproape egală cu cea a cadrului de referință, anume: 6,08 [m/s²]. Rigidizarea laterală prin creșterea secțiunilor transversale, și amortizarea adăugată (cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=20\%$), conduc la reducerea acestui parametru la valoarea de 5,34 [m/s²], respectiv 3,89 [m/s²].

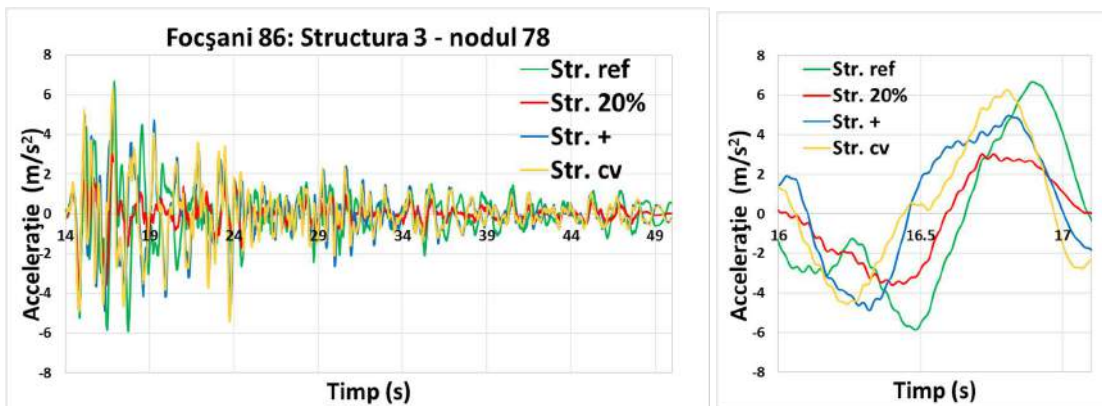


Figura 2.2-19 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 3. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Focșani 1986

Din nou, valoarea maximă a accelerației laterale de nivel este surprinsă în cadrul variației structurii de referință - 6.67 [m/s²]. Această valoare este foarte apropiată, însă, de maximum atins de structura rigidizată prin secțiuni transversale crescute, anume: 6,27 [m/s²]. Echiparea cu amortizare adăugată, și cu un sistem de contravântuiri produce un efect de reducere a accelerației, valorile maxime ale acestor variante structurale fiind: 3,99, respectiv 5,00 [m/s²].

Ultima accelerogramă utilizată în analiza structurală este Vrancea 1990:

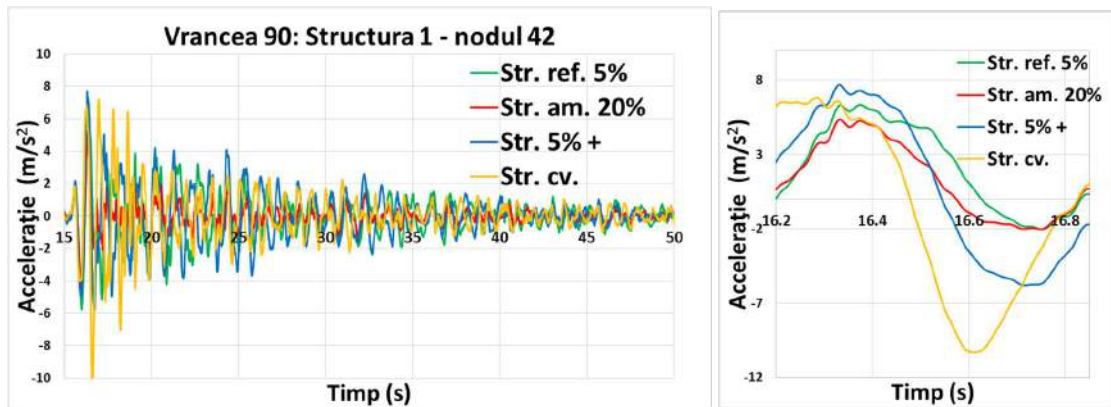


Figura 2.2-20 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 1. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1990

Intervalul cutremurului Vrancea 1990, selectat pentru surprinderea variației relevante a accelerației laterale de nivel, este $15 \div 50$ [s]. Valoarea maximă a accelerației, în cazul structurii 1 este dată de cadrul contravântuit – $10,31$ [m/s^2]. Prin rigidizare laterală cu secțiuni transversale crescute se obține amplificarea accelerației laterale de nivel de la valoarea $6,35$ [m/s^2] a structurii de referință, la valoarea $7,70$ [m/s^2]. Se constată că ridicarea nivelului de amortizare la fracțiunea de amortizare critică $\xi=20\%$, conduce la reducerea acestui parametru la valoarea de $5,35$ [m/s^2].

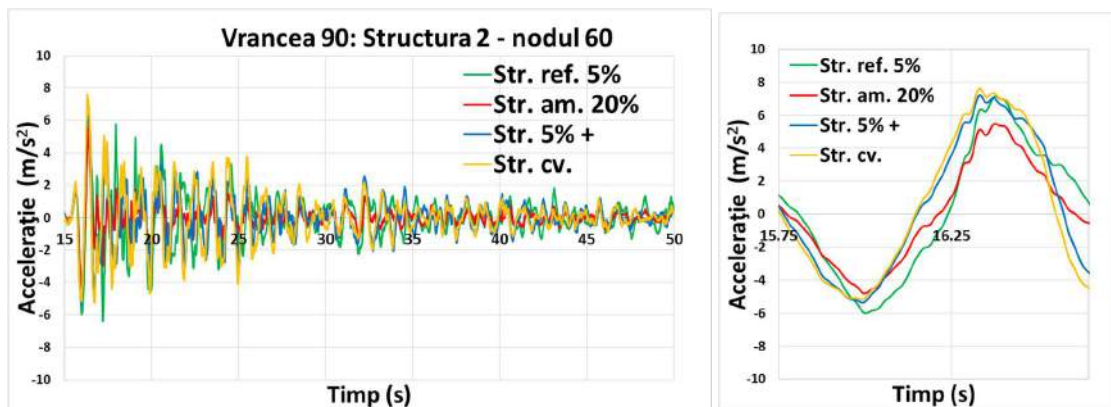


Figura 2.2-21 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 2. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1990

Valorile maxime ale accelerației laterale de nivel a structurii 2, acționată seismic de Vrancea 1990, sunt produse în variantele rigidizate lateral, prin contravântuire și secțiuni transversale crescute: $7,60$ și $7,19$ [m/s^2]. În cazul structurii de referință, valoarea maximă este egală cu $6,37$ [m/s^2], valoare care este redusă prin amortizare adăugată ($\xi=20\%$) la $5,49$ [m/s^2].

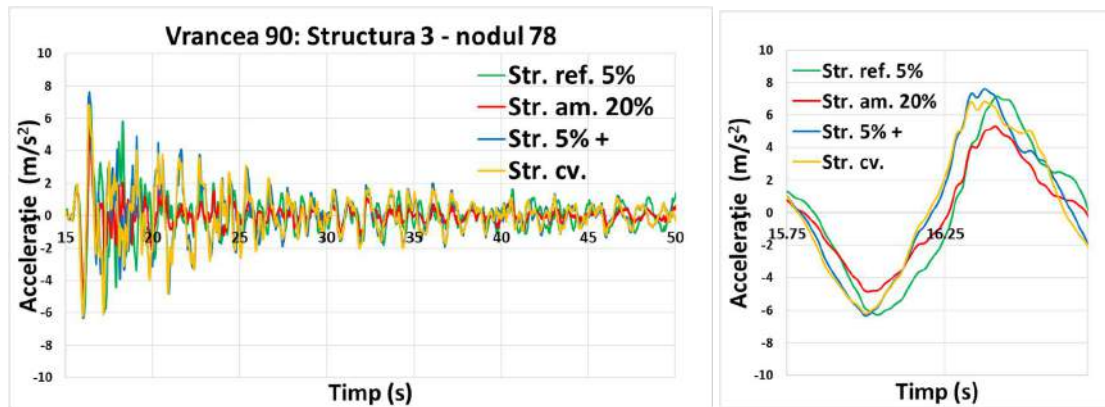


Figura 2.2-22 Variația accelerației laterale de nivel: Structura 3. (A)Interval complet. (B)Interval perioadă. Vrancea 1990

În cazul structurii 3 acționată seismic prin cutremurul Vrancea 1990, valoarea maximă a accelerației laterale de nivel este dată de varianta rigidizată lateral prin secțiuni transversale crescute – 7,62 [m/s²]. Prin echiparea cu amortizare adăugată și cu un sistem de contravântuiri se obține reducerea acestui parametru de la valoarea de referință 7,16 [m/s²], la valorile 5,32 [m/s²], respectiv 6,84 [m/s²].

Îndeplinirea obiectivelor Capitolului 2. Scopul cercetării întreprinse în acest capitol, propus în introducere, este de a compara efectele rigidizării laterale cu cele ale amortizării adăugate în încercarea de a controla răspunsul seismic al structurilor metalice multi-etajate. Rezultatele prezentate ulterior introducerii teoretice referitoare la fenomenul amortizării, au fost procesate în urma a 54 de analize seismice care tratează: trei conformații geometrice structurale, trei acțiuni seismice și șase ipostaze structurale de rigiditate laterală / amortizare adăugată. Componentele răspunsului seismic determinate prin aceste studii numerice sunt cele tradiționale: deplasări relative de nivel, accelerații laterale de nivel și forța tăietoare seismică de bază. În continuarea reprezentărilor grafice ale acestor parametri, sunt realizate comentarii și concluzii relevante, referitoare la opțiunea duală de echipare cu rigiditate laterală sau amortizare adăugată.

Capitolul 3. Capacitatea de absorbție energetică a structurii

După cum este bine știut, seismul este un eveniment produs de mișcarea plăcilor tectonice ce alcătuiesc scoarța pământului, provocând eliberări masive de energie, „materializate” în așa numitele unde sesimice. Acestea călătoresc prin pământ, iar la întâlnirea cu fundația, această stare energetică se transformă în starea statică (de eforturi), în starea cinematică (deplasări și deformații), iar o a treia parte se disipează prin amortizare. Evenimentul seismic din 1994, localizat în Northridge, California a dus la distrugerii majore a peste 150 de structuri metalice de tip cadre. Intensitatea cutremurului a provocat fisurarea sudurilor din conexiuni, chiar și în primele momente ale evenimentului. Comportamentul seismic ineficient al acestor structuri a fost cauzat de capacitatea lor de absorbție a energiei induse de cutremur cu mult depășită de cantitatea de energia indusă seismic. Analiza și proiectarea structurilor prin considerarea parametrilor energetici asociați atât cutremurului cât și structurii dezvăluie astfel de aspecte ale răspunsului seismic. Normele de proiectare moderne prevăd măsuri constructive pentru evitarea situației în care capacitatea de absorbție energetică a structurii este depășită de cantitatea de energie indusă seismic: prin direcționarea zonelor cu potențial plastic, prin echiparea cu sisteme de disipare a energiei seismice, prin contravântuire, rigidizare. În același timp structurile de construcții posedă un anumit nivel de amortizare (amortizare inerentă) care asigură disiparea unei anumite cantități a energiei seismice de input. Normele curente de proiectare [6], [55], [54] recomandă ca această amortizare inerentă (exprimată ca fracțiune de amortizare critică ζ) să fie între 2% și 8%.

Obiectivul principal al Capitolului 3 este prezentarea și dezvoltarea conceptului de capacitate de absorbție energetică asociat structurilor metalice multi-etajate în contextul dualității rigiditate - amortizare adăugată. Abordarea energetică a efectelor rigidizării laterale dezvăluie și alte efecte ale creșterii rigidității laterale decât reducerea deplasărilor (absolute, relative) laterale. Evidențierea acestor efecte a necesitat definirea și dezvoltarea unor obiective secundare: capacitate de absorbție energetică versus rigiditate laterală, capacitate de absorbție energetică versus amortizare adăugată, introducerea unor parametri de exprimare, măsurare, și comparare a nivelurilor de capacitate de absorbție versus rigiditate și, respectiv versus amortizare adăugată.

Transformări energetice într-o structură acționată seismic

În cele ce urmează, prin energie de input seismic E_I se înțelege energia introdusă de cutremur în structură. Din punct de vedere energetic, structura acționată seismic are un triplu rol:

- De distribuire a energiei seismice de input. De la fundația structurii (care este elementul structural receptor de energie seismică) energia se distribuie tuturor elementelor structurale și nestructurale ale construcției.
- De transformare a energiei seismice. Energia seismică se transformă în componentele clasice ale energiei mecanice (energie cinetică și energie de deformație) și într-o formă specifică structurilor de construcții – energia disipată prin amortizare. Raportul dintre aceste trei forme de energie depinde de tipul structural (cadre, diafragme), de materialul structurii și de echiparea structurii cu sisteme de protecție seismică.
- De absorbție a energiei seismice de input. Energia cinetică și energia potențială – menționate mai sus - se exteriorizează printr-o mișcare vibratorie. Dacă se consideră, pentru referință, un ciclu de vibrație, se constată că suma celor două componente (energie cinetică + energie potențială) nu este constantă de-a lungul ciclurilor succesive de vibrație. În general, se constată o scădere a acestei cantități de energie. Diferența este energia absorbită de structură. Fiecare structură are o capacitate proprie de absorbție a energiei seismice de input. Multe dintre prevederile de alcătuire structurală și de dimensionare în secțiuni (a elementelor structurale) au ca obiectiv asigurarea unei capacități cât mai mari de absorbție energetică. Numeroase astfel de prevederi de proiectare au rolul de a dirija posibilitatea formării unor zone plastice la capetele grinzilor: secțiunile de tip „dog-bone” ale grinzilor cadrelor metalice, armarea stâlpilor vs. armarea grinzilor din beton armat, etc.

Introducere în abordarea energetică a răspunsului seismic

Preocupările pentru sintetizarea răspunsului energetic datează de la jumătatea secolului trecut, mai exact din 1956, când Housner [9] propune ca structurilor să li se asigure capacitatea de a absorbi energia seismică introdusă în structură. Dezvoltarea ulterioară a abordării energetice nu se referă, totuși, la *capacitatea de absorbție energetică* ci a urmat calea calculului cantităților de energie seismică indusă de un cutremur dat în structură și a cantităților componentelor (energie cinetică, energie de deformare elastică, energie disipată prin

amortizare liniar-vâscoasă) [68], [17]. S-a introdus, astfel, bine-cunoscuta ecuație de bilanț energetic al unei structuri acționată seismic:

$$E_I = E_K + E_{S,e} + E_D + E_{S,h} + E_{AD} \quad (3.1.0)$$

Utilizând conceptele energetice, cercetătorii preocupați de proiectarea anti-seismică, deci de prevenirea deformațiilor structurale provocate de seism au elaborat metode pentru a înțelege mai bine comportamentul seismic și rolul energiei de input în răspunsul structural [17], [69], [70]. Importanța energiei de input indusă seismic unei structuri a fost confirmată prin multitudinea de studii realizate în încercarea formulării unor metode de estimare a acesteia [71], [11], [31]. Printre metodele de evaluare a energiei seismice de input propuse se numără și corelarea acesteia cu spectrul vitezelor. Alți cercetători, precum Ordaz în anul 2002, au propus metode de calcul al unui spectru al energiei de input [72].

Modul în care conceptul energetic este folosit în proiectare depinde de reperul folosit. Energia se definește în două modalități: absolută și relativă. La fel ca și în cazul răspunsului seismic formulat prin deplasări, conceptul de absolut și relativ diferă prin definiția reperului considerat în calculul valorilor. Astfel, deplasarea absolută reprezintă deplasarea totală a unei structuri, pe o anumită direcție, iar deplasarea relativă ia în considerare doar componenta deplasării față de baza structurii. Se exclude astfel, din calculul deplasării relative mișcarea de corp rigid a structurii. Energia relativă a fost folosită în majoritatea studiilor pentru modelele cu un grad de libertate suspuse la încărcare seismică până în 1990, când Uang și Bertero [17] au readus interesul pentru folosirea energiei de input ca și parametru pentru determinarea răspunsului seismic. De asemenea, aceștia au observat că ecuația energiei absolute este mai relevantă din punct de vedere fizic, decât cea a energiei relative. De atunci, au apărut multe studii care s-au ocupat cu estimarea capacității necesare de absorbție energetică și a mecanismelor de disipare a acesteia rezultând în proiectarea bazată pe energie [39], [73], [16].

Un alt reper în cercetarea răspunsului seismic energetic al structurilor a fost anul 2000, când Decanini [74] a folosit sistemele cu un singur grad de libertate pentru determinarea unei metode care permite încorporarea efectelor mai multor parametri (structurali și ne-structurali) în calculul necesarului de capacitate energetică a structurilor suspuse la cutremure puternice. Autorul a elaborat, folosind o serie de înregistrări seismice importante, un spectru de proiectare inelastic al energiei seismice de input, în funcție de ductilitate, tipul de sol și distanța dintre epicentru și punctul de înregistrare.

În 2006 Kalkan [75] a elaborat un studiu care ataca problema energetică a structurilor acționate seismic situate în apropierea epicentrului. Acesta a introdus o nouă metodă pentru

determinarea gravității mișcării seismice prin conceptul de capacitate energetică a unei structuri pe perioada unui ciclu de vibrație. Conceptul duce la o mai bună estimare a necesarului de capacitate energetică pentru evaluarea nivelului de performanță al structurii. Un alt studiu elaborat de Chou și Uang [16] în 2003 propune o metodă de evaluare a energiei absorbite de către structurile cu mai multe grade de libertate printr-un spectru energetic. Aceștia au mai elaborat o procedură de distribuție a energiei de-a lungul cadrului, bazată pe forma modurilor de vibrație. O altă contribuție a acestei cercetări a fost realizarea că al doilea mod de vibrație este necesar în anumite cazuri pentru a surprinde concentrațiile de energie de la nivelurile superioare. Există multe alte cercetări nemenționate aici care au contribuit la extinderea domeniului teoretic al seismologiei spre înțelegerea dependenței dintre spectrul energiei de input și alți parametri care reprezintă evenimentul seismic, precum magnitudinea sau distanța față de epicentru.

3.1 Abordarea energetică. Bilanțul energetic

Determinarea bilanțului energetic structural semnifică obținerea unei imagini de ansamblu a răspunsului seismic al structurii prin analiza componentelor energetice. Modul în care aceasta este distribuită diferă în funcție de tipul recipientului, care implică existența multor variabile, din cauza multitudinii de materiale, metodelor de proiectare, încărcărilor etc. existente. Deși elementul de energie pare un termen mai abstract, s-au dezvoltat modele matematice capabile să determine energia de input și componentele sale. Este important de determinat în proiectarea structurală cantitatea de energie introdusă în sistem și de asemenea, efectele pe care le poate avea asupra construcției. Distribuția acesteia în cadrul sistemului denotă însăși capacitatea structurii de absorbție a energiei de input. Astfel, dacă structura nu este proiectată corespunzător riscă disiparea energiei induse de cutremur prin deformații plastice care pot duce la dărâmarea structurii.

Astfel se definește *energia seismică de input* E_I , cantitatea totală de energie introdusă într-o structură în timpul unui eveniment seismic. Acest parametru reflectă atât caracteristicile structurii cât și ale cutremurului. Intensitatea și durata evenimentului seismic au o influență majoră asupra aspectului energiei de input. De asemenea, capacitatea structurii de a limita deformațiile provocate de seism sunt relevate de energia de input, mai exact caracteristicile elastice, inerțiale și de amortizare a acesteia. Energia de input este distribuită în structură, transformată și disipată. Distribuția energiei în structură conduce la identificarea componentelor acesteia, și a caracteristicilor lor.

Astfel se poate diferența energia disipată față de cea înmagazinată, definite ca:

- Energia înmagazinată E_{ND} : este energia nedisipată a structurii, mai exact energia potențială elastică și energia cinetică, în funcție de starea de mișcare în care se află structura.
- Energia disipată E_{DS} : este energia procesată și evacuată de către sistem. Disiparea se poate face în mai multe moduri: prin amortizarea inherentă structurală, amortizarea prin deformații ne-elastice și amortizarea realizată prin dispozitive de protecție seismică.

$$E_I = E_{ND} + E_{DS} \quad (3.1.1)$$

Energia înmagazinată reprezintă cantitatea de energie stocată în sistem, compusă din energia de deformare elastică și energia cinetică. În funcție de starea de mișcare / repaus a structurii procentele celor două componente diferă. Simplificând modelul structural cu un pendul, se consideră maximumul energiei de deformare elastică $E_{S,e}$, atunci când pendulul este forțat într-o stare de deformare, iar maximumul energiei cinetice E_K , când aceasta este eliberat, și deci, în stare de mișcare. Aceste două mărimi sunt complementare în totalul de energie.

$$E_{ND} = E_{S,e} + E_K \quad (3.1.2)$$

Energia cinetică E_K se definește ca lucrul mecanic necesar pentru schimbarea vitezei unui corp aflat în repaus. Energia de deformare $E_{S,e}$, este conținută în material și sistemul structural pe măsură ce se desfășoară mișcarea ce provoacă deformația acestora. Această energie este activă când corpul este în stare de compresiune sau întindere.

A doua componentă a energiei de input, energia disipată E_{DS} , are un caracter nerecuperabil, față de energia înmagazinată care este păstrată în sistem. O structură încărcată cu energia indusă seismic nu poate supraviețui dacă nu are capacitatea de a transforma o parte din aceasta. Proprietățile structurii de a disipa energia, hotărăsc stadiul de deformare final al acesteia. Printre aceste proprietăți se numără: caracteristicile materialului, alcătuirea structurală, distribuția inerțială, existența articulațiilor plastice și nu în ultimul rând, echiparea cu dispozitive disipatoare de energie. În funcție de aceste proprietăți energia de disipare E_{DS} se împarte în mai multe subtipuri:

$$E_{DS} = E_D + E_{S,h} + E_{AD} \quad (3.1.3)$$

Energia disipată prin amortizare E_D : reprezintă energia disipată de structură prin amortizarea inherentă și structurală. Amortizarea inherentă este cauzată de structura microscopică a materialului, efectele termo-elastice, distribuția neuniformă a eforturilor. Amortizarea structurală este produsă în mare măsură de îmbinările la nivelul nodurilor structurale și

suprafețele supuse la frecare. Împreună, aceste două tipuri de amortizare însumează între 2% și 8%, valoare a procentului fracțiunii de amortizare critică.

Energia disipată prin deformații inelastice $E_{S,h}$: este energia consumată prin producerea de articulații plastice. Aceste puncte de plastifiere pot fi prevăzute pentru a dirija energia indusă de cutremur în structură. Astfel este posibilă menținerea conformației structurale și implicit, a protecției civile. În caz contrar, formarea aleatorie a acestor articulații plastice conduce la urmări dezastruoase atât pentru structură cât și pentru locuitorii acesteia. Considerarea acestui tip de proiectare impune, însă, nevoia de intervenții de reabilitare post-seismică, sau chiar de înlocuire a întregii structuri.

Energia disipată prin amortizare adăugată E_{AD} : constituie energia disipată de dispozitivele de control a vibrațiilor. Aceste dispozitive sunt concepute cu anumite proprietăți fizice care le conferă capacitatea de amortizare a vibrațiilor induse în structură de încărcările seismice, dar nu numai. Echipamentele sunt de tip izolatori în bază, amortizori vâscoși, amortizori cu masă acordată, etc., cu proprietăți de amortizare vâscoasă, de frecare sau chiar fluidă. Capacitatea de absorbție energetică a acestor dispozitive depășește cu mult pe cea a structurii, și în funcție de soluția aleasă vibrațiile pot fi amortizate complet.

Energia de input, indusă de cutremur, în cazul structurilor proiectate în domeniul elastic se distribuie astfel după schema din figură:

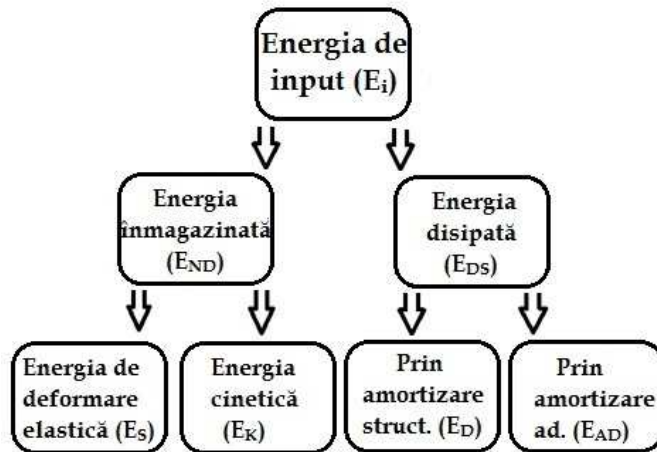


Figura 3.1-1 Distribuția energiei în structură

Pentru ca structurile să fie capabile să reziste vibrațiilor induse de cutremur, ele trebuie să îndeplinească condiția (3.1.4), adică energia de input să nu depășească suma energiei înmagazinate și disipate. Capacitatea de absorbție energetică a structurii trebuie să depășească cumulul energetic indus de cutremur.

$$E_{ND} + E_{DS} \geq E_I \quad (3.1.4)$$

3.1.1 Componentele răspunsului seismic energetic al sistemelor cu un singur grad de libertate

Parametrii bilanțului energetic, definiți mai sus, se pot determina prin integrarea ecuației de echilibru dinamic. Calculul termenilor energetici necesită, însă, înțelegerea componentelor mișcării masei. În cazul solicitării seismice a unei structuri, cantitatea de energie indusă este calculată în funcție de $\ddot{u}_g(t)$, accelerația terenului. Astfel, deplasarea totală a unui grad de libertate – $u_i(t)$ numită și deplasarea absolută - se împarte în deplasarea relativă $u(t)$, adică deplasarea față de baza structurii, și deplasarea bazei structurii $u_g(t)$ – Figura 3.1-2.

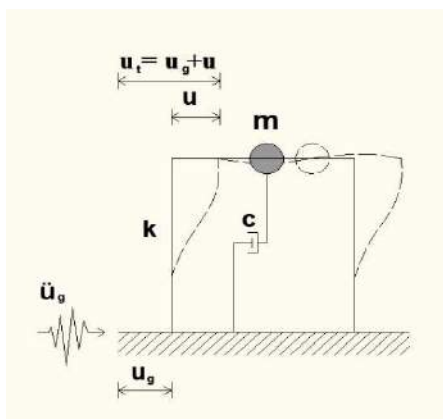


Figura 3.1-2 Sistem cu un singur grad de libertate

Prin integrarea ecuației de echilibru dinamic se obțin relațiile următoare care definesc componentele răspunsului seismic al sistemului cu un singur grad de libertate. Ecuația de mișcare, sau echilibru dinamic, este condiționată, bineînțeles de deplasarea u , și derivatele acesteia: viteza \dot{u} și accelerația \ddot{u} . Elementele m , c și k , sunt reprezentante ale forțelor participante în modelul de mișcare al sistemului cu un singur grad de libertate, anume: forța de inerție (m), forța elastică (k) și forța de amortizare (c). Acești termeni descriu masa, rigiditatea și amortizarea sistemului. Astfel, ecuația de echilibru dinamic al sistemului cu amortizare vâscoasă, în domeniul elastic:

$$m \cdot \ddot{u}(t) + c \cdot \dot{u}(t) + k \cdot u(t) = -m \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (3.1.5)$$

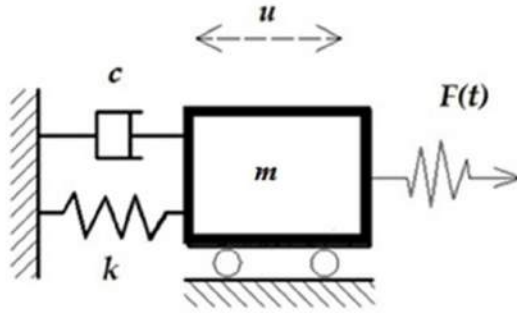


Figura 3.1-3 Sistem dinamic cu un singur grad de libertate

Prin integrarea acestei relații se obține:

$$\int_0^t m \cdot \ddot{u}_t(t) \cdot du + \int_0^t c \cdot \dot{u}(t) du + \int_0^t k \cdot u(t) \cdot du = 0 \quad (3.1.6)$$

Fiecare membru al expresiei (3.1.6) reprezintă unul din termenii bilanțului energetic al sistemelor cu un singur grad de libertate. Considerând termenul $du = du_t - du_g$, rezultă:

Energia de input absolută:

$$E_{I,a} = \int_0^u m \cdot \ddot{u}_t(t) \cdot du_g = \int_0^t m \cdot \ddot{u}_t(t) \cdot \dot{u}_g \cdot dt \quad (3.1.7)$$

Energia cinetică absolută:

$$E_{K,a} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\dot{u}_t)^2 \quad (3.1.8)$$

Energia disipată prin amortizarea vâscoasă:

$$E_D = \int_0^u c \cdot [\dot{u}(t)] \cdot \dot{u} \cdot du = \int_0^t c \cdot [\dot{u}(t)]^2 \cdot dt \quad (3.1.9)$$

Energia de deformare elastică:

$$E_{S,e} = \int_0^u k \cdot u(t) \cdot du = \int_0^t k \cdot u(t) \cdot \dot{u}(t) \cdot dt \quad (3.1.10)$$

Studiul sistemului cu un singur grad de libertate acționat seismic produce valori absolute ale răspunsului seismic energetic doar pentru două componente: energia de input și energia cinetică. Celelalte elemente sunt relative, adică depind doar de evoluția structurii și nu cuprind modificările la nivel de teren.

Relația energie absolută – energie relativă a sistemelor cu un singur grad de libertate

Implicarea cinematicii în calculul componentelor energetice, din ecuația bilanțului energetic a necesitat clarificarea conceptelor de energie absolută și, respectiv, relativă [75],

[76], [16]. Înțelegerea și deosebirea între energia absolută și relativă ajută la identificarea răspunsului seismic relevant pentru diferitele situații care apar în proiectarea structurală. Proiectarea unei structuri amplasate seismic implică considerarea faptului că baza acesteia nu mai este fixă, ca și în cazul celorlalte încărcări. Modelul de calcul nu include deplasarea de corp rigid a structurii (u_g). În funcție de nivelul de rigiditate / flexibilitate și de înălțime, deplasarea structurii la vârf diferă. Astfel rezultă cele două modalități de a considera deplasarea unei structuri, deplasarea absolută și cea relativă. Diferența între cele două, este că deplasarea relativă nu conține deplasarea realizată între structură și teren.

Ecuția de echilibru dinamic a sistemelor amortizate cu un singur grad de libertate este reprezentată în expresia de mai jos:

$$m \cdot \ddot{u}_t(t) + c \cdot \dot{u}(t) + k \cdot u(t) = 0 \quad (3.1.11)$$

$$u_t = u + u_g \quad (3.1.12)$$

Pentru reprezentarea sistemului structural supus la încărcarea seismică se adaugă termenul $m\ddot{u}_g$, \ddot{u}_g fiind accelerația terenului. Se obține astfel expresia (3.1.5):

$$m \cdot \ddot{u}(t) + c \cdot \dot{u}(t) + k \cdot u(t) = -m \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (3.1.5)$$

Prin integrarea primei ecuației (3.1.11) în funcție de u obținem relația pentru energia absolută a unui sistem cu un singur grad de libertate:

$$\begin{aligned} \frac{m[\dot{u}_g + \dot{u}]^2}{2} + \int_0^t c \cdot \dot{u}(t) du + \int_0^t k \cdot u(t) du &= \int_0^t m[\ddot{u}_g + \ddot{u}](t) du_g \\ &= \int_0^t m[\ddot{u}_g + \ddot{u}]\dot{u}_g dt \end{aligned} \quad (3.1.13)$$

Traducerea termenilor ecuației în componentele energetice duce la relația:

$$E_{K,a} + E_D + (E_{S,e} + E_{S,h}) = E_{I,a} \quad (3.1.14)$$

Unde $E_{K,a}$ este energia absolută cinetică, E_D este energia disipată prin amortizare structurală $E_{S,e}$ este energia de deformație elastică, iar $E_{S,h}$ este energia de deformație inelastică. $E_{I,a}$ reprezintă lucrul mecanic dL efectuat de către forța inerțială $m\ddot{u}_t$ ce acționează asupra structurii.

Prin integrarea ecuației de echilibru dinamic a sistemului cu bază fixă (3.1.5), rezultă componentele relative ale bilanțului energetic:

$$\begin{aligned} \frac{m\dot{u}^2}{2} + \int_0^t c \cdot \dot{u}(t) du + \int_0^t k \cdot u(t) du &= - \int_0^t m \cdot \ddot{u}_g(t) du \\ &= - \int_0^t m \cdot \ddot{u}_g \cdot \dot{u} dt \end{aligned} \quad (3.1.15)$$

Identificarea componentelor energetice din ecuația anterioară conduc la relația următoare.

$$E_{K,r} + E_D + (E_{S,e} + E_{S,h}) = E_{I,r} \quad (3.1.16)$$

Termenii $E_{K,r}$ și $E_{I,r}$ reprezintă valorile relative ale energiei cinetice și de input. Diferența dintre termenii absoluți și cei relativi este excluderea mișcării de corp rigid a structurii. Nefiind relaționate cu mișcarea terenului, ci doar cu deplasarea, relativă a structurii, energia de deformație elastică, plastică și cea de amortizare structurală își păstrează forma exprimată în ecuația energiei absolute. Rezultă că diferența dintre energia de input absolută și cea relativă este egală cu diferența dintre cei doi termeni ai energiei cinetice (energia cinetică absolută și relativă).

$$E_{I,a} - E_{I,r} = E_{K,a} - E_{K,r} = \frac{1}{2}m \cdot \dot{u}_g^2 + m \cdot \dot{u}_g \cdot \dot{u} \quad (3.1.17)$$

Această relație determină diferența dintre valoarea absolută și relativă a energiei cinetice, care poate să fie negativă, adică energia relativă să depășească energia absolută.

Gama de aplicare a acestor doi parametri diferă de asemenea, pentru că valorile lor se modifică în funcție de rigiditatea sau flexibilitatea sistemului. În cazul structurilor flexibile, unde perioada mare a vibrațiilor depășește perioada cutremurului, energia relativă de input are o valoare mare pe când cea absolută se apropie de zero. În celălalt caz, al structurilor rigide, mișcarea structurii față de bază converge spre zero, astfel, energia relativă este aproape nulă, iar cea absolută atinge valori mari.

3.1.2 Componentele răspunsului seismic energetic al sistemelor cu număr finit $n > 1$ de grade de libertate

După cum este specificat anterior, echivalarea unui model structural cu un sistem cu un singur grad de libertate, pentru simplificarea calculului, conduce la o rezolvare mai rapidă. În proiectare, însă, este important ca fiecare element al structurii și al încărcării să fie inclus în calcul, pentru a ridica nivelul de acuratețe a rezultatelor.

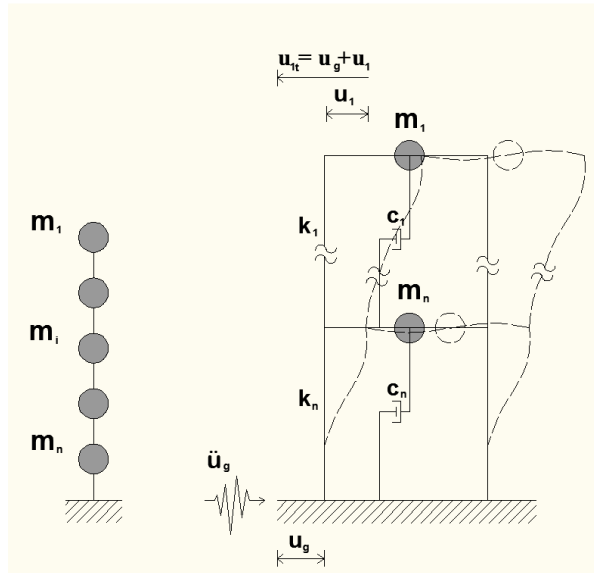


Figura 3.1-4 Sistem cu număr finit de grade de libertate

La fel ca și în cazul sistemelor cu un singur grad de libertate rezolvarea energetică a sistemelor cu număr finit de grade de libertate are la bază ecuația echilibrului dinamic.

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}_u \cdot \mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (3.1.18)$$

unde: \mathbf{M} – este matricea inerțială ($n \times n$), asociată vectorului $\ddot{\mathbf{u}}(t)$;

\mathbf{C} – este matricea de amortizare liniar-vâscoasă ($n \times n$) asociată vectorului $\dot{\mathbf{u}}(t)$;

\mathbf{K}_u – este matricea de rigiditate condensată ($n \times n$) asociată vectorului $\mathbf{u}(t)$;

$\ddot{\mathbf{u}}(t)$, $\dot{\mathbf{u}}(t)$ și $\mathbf{u}(t)$ – ca și în cazul sistemelor cu un singur grad de libertate această ecuație depinde de vectorii accelerație, viteză și deplasare - dependenți de timp (t), de formă ($n \times 1$) – al celor n grade de libertate dinamică;

$\mathbf{F}(t)$ – vectorul acțiunilor dinamice ($n \times 1$) ;

Varianta ecuației de echilibru dinamic pentru sistemele supuse la vibrații forțate, cu comportament liniar inelastic, al căror forțe de reacțiune au forma $\mathbf{f}(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u}(t)$, este:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{f}(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (3.1.19)$$

Pentru o mai bună înțelegere a demonstrațiilor ce urmează, se menționează relația dintre cei trei vectori: deplasare, viteză și accelerație, în particular, formele derivate ale acestora:

$$d\mathbf{u}(t) = \dot{\mathbf{u}}(t)dt \quad (3.1.20)$$

$$d\dot{\mathbf{u}}(t) = \ddot{\mathbf{u}}(t)dt \quad (3.1.21)$$

De asemenea este important de menționat relația dintre elementele răspunsului energetic, absolute și relative. Acestea depind de tipul deplasării: deplasarea la nivel de structură – deplasarea relativă, și deplasarea la nivel de teren – deplasarea absolută. Astfel, se

definește deplasarea totală \mathbf{u}_t ca suma vectorului deplasare relativă \mathbf{u} și a produsului vectorului coeficienților de influență \mathbf{r} și a scalarului u_g :

$$\mathbf{u}_t = \mathbf{u} + \mathbf{r} \cdot u_g \quad (3.1.22)$$

La fel și vectorii viteză și accelerație se împart în cele două componente:

$$\dot{\mathbf{u}}_t = \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{r} \cdot \dot{u}_g \quad (3.1.23)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_t = \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{r} \cdot \ddot{u}_g \quad (3.1.24)$$

Expresiile (3.1.22), (3.1.23) și (3.1.24) devin:

$$d\mathbf{u}_t = d\mathbf{u} + \mathbf{r} \cdot du_g \quad (3.1.25)$$

$$d\dot{\mathbf{u}}_t = d\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{r} \cdot d\dot{u}_g \quad (3.1.26)$$

$$d\ddot{\mathbf{u}}_t = d\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{r} \cdot d\ddot{u}_g \quad (3.1.27)$$

Vectorul \mathbf{r} al coeficienților de influență, asociat cu \ddot{u}_g – accelerația terenului, rezultă în vectorul $\mathbf{r} \cdot \ddot{u}_g = \ddot{\mathbf{u}}_g$. Acest vector $\ddot{\mathbf{u}}_g$ reprezintă forța de inerție asociată masei m_i generată de accelerația $\ddot{u}_g = 1$. Ecuația de echilibru dinamic pentru sistemul liniar este conform relației (3.1.28):

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}_u \cdot \mathbf{u}(t) = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{r} \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (3.1.28)$$

iar pentru sistemul neliniar conform relației (3.1.29):

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{f}(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u}(t) = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{r} \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (3.1.29)$$

Se explicitează a doua parte a relației (3.1.28) prin înlocuirea vectorului coeficienților de influență \mathbf{r} cu $\mathbf{1}$, ambii vectori fiind de forma $(n \times 1)$:

$$-\mathbf{M} \cdot \mathbf{r} \cdot \ddot{u}_g(t) = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{1} \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (3.1.30)$$

Astfel:

$$-\mathbf{M} \cdot \mathbf{r} \cdot \ddot{u}_g(t) = \begin{bmatrix} m_1 \cdot \ddot{u}_g \\ \vdots \\ m_i \cdot \ddot{u}_g \\ \vdots \\ m_n \cdot \ddot{u}_g \end{bmatrix} \quad (3.1.31)$$

$$-\mathbf{M} \cdot \mathbf{r} \cdot \ddot{u}_g(t) = -\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_g \text{ unde } \mathbf{r} \cdot \ddot{u}_g = \ddot{\mathbf{u}}_g \quad (3.1.32)$$

Relația echilibrului dinamic al sistemelor cu număr finit $n > 1$ de grade de libertate și explicarea termenilor acesteia este necesară pentru calculul parametrilor energetici. De asemenea, introducerea termenilor de deplasare relativă și absolută prin componentele deplasare totală sau de teren conduce la diferențierea elementelor absolute și relative, a bilanțului energetic. Astfel, prin transpunerea elementelor deplasare, viteză și accelerație a ecuației (3.1.28) considerând simetria matricelor \mathbf{M} , \mathbf{C} și \mathbf{K}_u , rezultă:

$$(\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} + \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{C} + \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{K} = 0 \quad (3.1.33)$$

Se înmulțește ecuația (3.1.33) cu diferențiala $d\mathbf{u}$, obținându-se:

$$(\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot d\mathbf{u} + \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{C} \cdot d\mathbf{u} + \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{K} \cdot d\mathbf{u} = 0 \quad (3.1.34)$$

Aplicând relația (3.1.21), ecuația (3.1.34) devine:

$$(\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{K} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt = 0 \quad (3.1.35)$$

Ecuția de echilibru, în forma descrisă de relația (3.1.35) se integrează de la 0 la t pentru obținerea expresiilor de calcul a parametrilor energetici:

$$\int_0^t (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \int_0^t \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \int_0^t \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{K} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt = 0 \quad (3.1.36)$$

Folosind din nou expresia (3.1.20), dar în sens invers, și apoi expresia (3.1.22) care explicitează relația dintre deplasarea totală, cea a structurii și cea a terenului, se prelucrează primul termen al ecuației (3.1.37):

$$\begin{aligned} \int_0^t (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt &= \int_0^u (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot d\mathbf{u} \\ &= \int_0^u (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot d\mathbf{u}_t - \int_0^u (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot d\mathbf{u}_g \end{aligned} \quad (3.1.37)$$

Transpunerea vectorului accelerație totală se aplică și sumei $\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{r} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_g$:

$$(\ddot{\mathbf{u}}_t)^T = (\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{r} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_g)^T = \ddot{\mathbf{u}}^T + (\ddot{\mathbf{u}}_g)^T \quad (3.1.38)$$

Ecuția (3.1.37) devine astfel:

$$\begin{aligned} \int_0^u (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot d\mathbf{u}_t + \int_0^t \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \int_0^t \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{K} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt \\ = \int_0^u (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot d\mathbf{u}_g \end{aligned} \quad (3.1.39)$$

Se integrează direct primul termen al relației, și se obține:

$$\int_0^u (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot d\mathbf{u}_t = \frac{1}{2} \cdot \left[\int_0^u (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot (\dot{\mathbf{u}}_t) \right] \quad (3.1.40)$$

Astfel, ecuația totală (3.1.39) se scrie:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \left[\int_0^u (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot (\dot{\mathbf{u}}_t) \right] + \int_0^t \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \int_0^t \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{K} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt \\ = \int_0^u (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot d\mathbf{u}_g \end{aligned} \quad (3.1.41)$$

Forma (3.1.41) a ecuației de echilibru dinamic a sistemelor cu număr finit de grade de libertate permite formularea matematică a termenilor bilanțului energetic:

- Energia absolută cinetică dezvoltată de mișcarea maselor:

$$E_{K,a} = \frac{1}{2} [(\dot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot (\dot{\mathbf{u}}_t)] \quad (3.1.42)$$

- Energia disipată prin amortizare vâscoasă:

$$E_D = \int_0^t \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt \quad (3.1.43)$$

- Energia de deformație elastică, a sistemului liniar-elastic:

$$E_{S,e} = \int_0^t \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} \cdot dt \quad (3.1.44)$$

- Energia de deformație în domeniul inelastic:

$$E_S = \int_0^t \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{f}^T(\mathbf{u}) \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt \quad (3.1.45)$$

Pe lângă energia de deformare elastică, termenul E_S conține și energia disipată prin deformații plastice $E_{S,h}$:

$$E_S = E_{S,e} + E_{S,h} \quad (3.1.46)$$

- Energia absolută de input:

$$\begin{aligned} E_{I,a} &= \int_0^t (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot d\mathbf{u}_g = \int_0^t (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{1} \cdot d\mathbf{u}_g \\ &= \int_0^t (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{u}}_g(t) \cdot dt \end{aligned} \quad (3.1.47)$$

Astfel, ecuația bilanțului energetic se scrie:

$$E_{K,a} + E_S + E_D = E_{I,a} \quad (3.1.48)$$

$$E_{K,a} + [E_{S,e} + E_{S,h}] + E_D = E_{I,a} \quad (3.1.49)$$

În continuare se prezintă formularea în termeni relativi a bilanțului energetic și a componentelor sale. Se folosește din nou relația (3.1.32) care se înmulțește cu $d\mathbf{u}(t) = \dot{\mathbf{u}}(t)dt$. Prin integrarea de la 0 la t , se obține:

$$\int_0^t (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T \cdot \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \int_0^t \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \int_0^t \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{K} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt = 0 \quad (3.1.50)$$

Se descompune accelerația totală prin expresia $\ddot{\mathbf{u}}_t(t) = \ddot{\mathbf{u}}(t) + \ddot{\mathbf{u}}_g(t)$ și rezultă astfel relația:

$$\begin{aligned} \int_0^t (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T(t) \cdot \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \int_0^t (\dot{\mathbf{u}})^T(t) \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \int_0^t (\mathbf{u})^T(t) \cdot \mathbf{K} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt \\ = - \int_0^u (\dot{\mathbf{u}})^T \cdot \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{u}}_g(t) dt \end{aligned} \quad (3.1.51)$$

Se obțin termenii bilanțului energetic relativ, exprimați astfel:

- Energia relativă de input:

$$E_{I,r} = \int_0^u (\dot{\mathbf{u}})^T \cdot \mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_g(t) dt = \int_0^u (\dot{\mathbf{u}})^T \cdot \mathbf{M} \cdot d\dot{\mathbf{u}}_g(t) \quad (3.1.52)$$

- Energia relativă cinetică:

$$E_{K,r} = \int_0^t (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T(t) \cdot \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt = \int_0^t (\ddot{\mathbf{u}}_t)^T(t) \cdot \mathbf{M} \cdot d\mathbf{u} = \frac{1}{2} \cdot (\dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{u}}) \quad (3.1.53)$$

- Energia disipată prin amortizare vâscoasă:

$$E_D = \int_0^t (\dot{\mathbf{u}})^T(t) \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt \quad (3.1.54)$$

- Energia de deformare elastică și plastică

$$E_S = \int_0^t (\mathbf{u})^T(t) \cdot \mathbf{K} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt = \int_0^t (\mathbf{u})^T(t) \cdot \mathbf{K} \cdot d\mathbf{u} \quad (3.1.55)$$

Rezultă astfel, ecuația bilanțului energetic relativ:

$$E_{K,r} + E_D + E_S = E_{I,r} \quad (3.1.56)$$

Se observă faptul că nu toate elementele bilanțului energetic au forma relativă diferită, ci doar energia de input E_I și energia cinetică E_K . Termenii energie disipată prin amortizare E_D , și prin deformație E_S (elastică sau plastică) sunt relaționați doar cu structura propriu-zisă, și nu cu mișcarea terenului.

Identificarea separată a energiei absolute față de cea relativă este foarte importantă pentru determinarea potențialului distructiv al evenimentelor seismice. O altă caracteristică ce diferențiază tipurile de energie este instantaneitatea, sau opusul acesteia - capacitatea de cumulare. Parametrii energetici ce compun energia de input, indusă în sistem, sunt energia de deformare elastică și plastică, energia cinetică și energia disipată prin amortizare structurală sau adăugată. Dintre cele menționate mai sus, energia cinetică și cea de deformare elastică sunt de tip instantaneu, dependente de mărimea t . La sfârșitul evenimentului seismic acestea vor ajunge la valoarea 0. În schimb, energia de deformare plastică este o mărime cumulativă.

În cazul sistemelor cu protecție seismică relația fluxului de energie se modifică. $E_{S,e}$ și $E_{S,h}$ sunt componentele energiei disipate prin deformare, mai exact, prin deformare elastică, respectiv, prin deformare plastică. Pentru prezentul studiu nu se consideră energia disipată prin articulații plastice, structurile – protejate seismic prin amortizare adăugată - fiind analizate în domeniul elastic. Astfel, energia de input absolută ce se regăsește într-un sistem cu amortizare adăugată este compusă din energia cinetică, de deformație elastică, capacitatea de absorbție energetică, și bineînțeles, energia disipată de dispozitivele de control a vibrațiilor.

$$E_{K,a} + E_S + E_D + E_{AD} = E_{I,a} \quad (3.1.57)$$

Energia disipată prin amortizare adăugată are, bineînțeles, un caracter relativ. Majoritatea elementelor disipative adăugate sistemului structural, acționează pe suprastructură. O excepție de la această regulă reprezintă izolatorii în bază. Modalitatea acestora de disipare a energiei este separarea bazei de suprastructură pentru ca aceasta să se deplaseze liber în regim de corp rigid. În acest fel, mișcarea structurii va coincide cu mișcarea terenului, rezultând astfel caracterul absolut al energiei disipate prin amortizare structurală în cazul clădirilor echipate cu izolatori seismici (reazeme de cauciuc) [75].

3.2 Capacitatea de absorbție a energiei seismice

Începuturile abordării energetice și a folosirii conceptelor energetice în activitatea de proiectare a structurilor acționate seismic datează din 1956 când Housner [9] propune ca prin proiectare să li se asigure structurilor amplasate în zone seismice capacitatea necesară de absorbție a energiei seismice induse în structură. După mai bine de 30 de ani, conceptul de capacitate de absorbție energetică a început să fie abordat și dezvoltat din punct de vedere analitic [68], [17]. Definirea conceptelor energetice în proiectarea structurală necesită apelul la ecuația de bilanț energetic a unei structuri acționate seismic (3.1.0). Această ecuație implică calitativ și cantitativ componentele energetice – deja tradiționale – ale răspunsului seismic: energia de input seismic E_I , energia cinetică E_K dezvoltată de mișcarea maselor, energia de deformație elastică $E_{S,e}$ produsă prin deformațiile elastice ale componentelor structurale, energia E_D disipată prin amortizarea inerentă a structurii energia $E_{S,h}$ disipată prin eventualele deformații plastice, energia E_{AD} disipată prin echipamentele (izolatori în bază, amortizori, mase adăugate) de protecție seismică.

$$E_I = E_K + E_{S,e} + E_D + E_{S,h} + E_{AD} \quad (3.2.0)$$

În acest context a fost definit conceptul de capacitate de absorbție energetică [39], [31] E_{ABS} . Capacitatea de absorbție energetică E_{ABS} este conferită unei structuri acționate seismic de amortizarea inerentă a structurii, de deformațiile plastice produse elementelor structurale și nestructurale de acțiunea seismică și de echipamentele de protecție seismică cu care este echipată structura. Analitic, capacitatea necesară de absorbție energetică se exprimă astfel:

$$E_{ABS} = E_D + E_{AD} + E_{S,h} \quad (3.2.1)$$

În termeni de capacitate necesară de absorbție energetică, ecuația de bilanț energetic (3.1.0) devine:

$$E_I = E_K + E_{S,e} + E_{ABS} \quad (3.2.2)$$

Componentele energetice E_K (energie cinetică) și $E_{S,e}$ (energie de deformație elastică) sunt asociate mișcării vibratorii induse seismic. În lipsa amortizării, aceste două componente sunt asociate tradiționalei energii mecanice E_M din mișcarea sistemelor materiale:

$$E_M = E_K + E_{S,e} \quad (3.2.3)$$

cunoscută, mai ales, prin teorema ei de conservare.

În abordarea răspunsului seismic al structurilor de construcții, energia mecanică E_M este cunoscută și referită ca energie înmagazinată E_{ND} (Fig. 3.2-1). Cu acestea, ecuația de bilanț energetic (3.1.0) ia forma:

$$E_I = E_{ND} + E_{ABS} \quad (3.2.4)$$

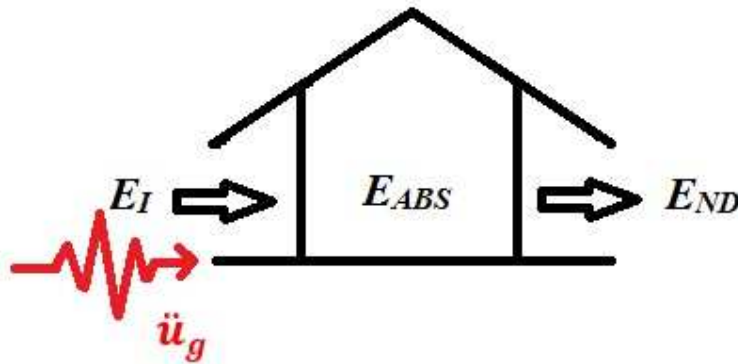


Figura 3.2-1 Circuitul energiei seismice

Forma (3.2.4) a bilanțului energetic evidențiază două aspecte fundamentale ale fenomenului energetic care însoțește răspunsul seismic:

1. Energia asociată răspunsului seismic este alcătuită dintr-o componentă E_{ND} necumulativă și dintr-o componentă E_{ABS} cumulativă;
2. Necesitatea echipării structurilor de construcții amplasate în zone seismice cu dispozitive de protecție seismică care să asigure o capacitate E_{ABS} de absorbție a energiei seismice astfel încât componenta E_{ND} asociată mișcării vibratorii să fie cât mai mică.

Relația (3.2.4) a ecuației de bilanț energetic exprimă – în același timp – faptul că răspunsul seismic (mișcarea indusă structurii) nu poate fi totalmente redus de structura însăși echipată sau ne-echipată cu dispozitive de protecție seismică. Matematic, termenul E_{ABS} definit prin (3.2.1) nu poate depăși în valoare termenul E_I . Rolul protecției seismice este – în acest context – dublu:

- Creșterea valorică a termenului E_{ABS} și reducerea, în același timp, a termenului E_{ND} (energia înmagazinată). Autorul tezei subliniază faptul că energia E_{ND} generată de mișcarea și deformarea în domeniul exclusiv elastic poate fi redusă ca valoare dar nu anulată. Chiar dacă o structură ar fi astfel echipată (pentru a fi protejată de efectele seismice) încât i se induce seismic o mișcare exclusiv de corp rigid (situație în care sub-componenta $E_{S,e}$ – energia de deformație în domeniul elastic – ar fi nulă), energia E_{ND} ar fi încă prezentă prin sub-componenta sa cinetică E_K (conferită de vibrațiile de corp rigid ale structurii izolate seismic);
- Creșterea termenului E_{ABS} este definit de (3.2.1) prin creșterea componentei E_{AD} (capacitatea de absorbție conferită de amortizarea adăugată) cu scopul reducerii simultane a termenului $E_{S,h}$ (capacitatea de absorbție energetică generată de deformațiile remanente).

O ilustrare a acestor considerente teoretice – dar cu implicații practice importante – este dată – în continuare - prin reprezentările grafice ale componentelor energetice prezentate mai sus.

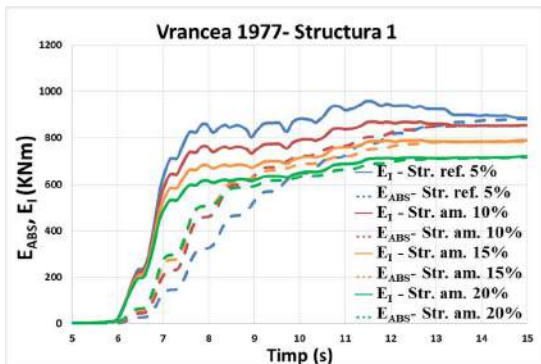


Figura 3.2-2 E_{ABS} vs. E_I structura 1. Vrancea 1977

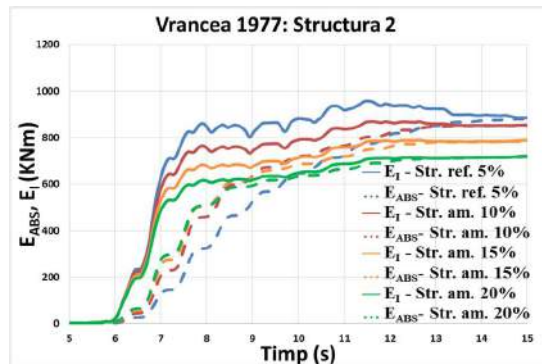


Figura 3.2-3 E_{ABS} vs. E_I structura 2. Vrancea 1977

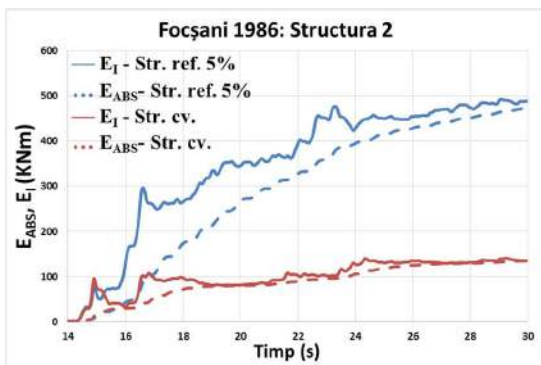


Figura 3.2-4 E_{ABS} vs. E_I structura 2. Focșani 1986

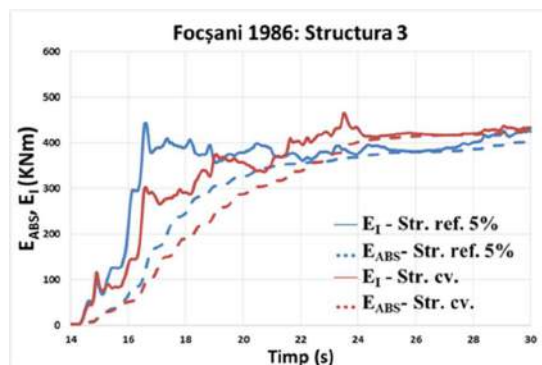


Figura 3.2-5 E_{ABS} vs. E_I structura 3. Focșani 1986

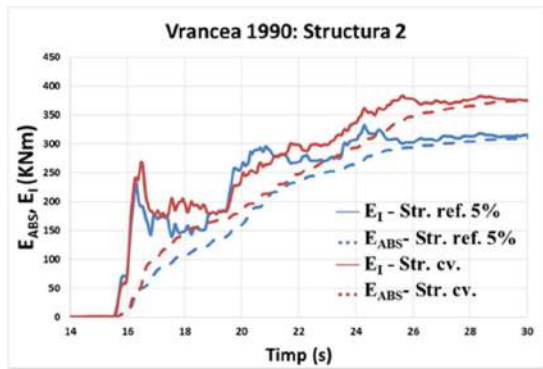


Figura 3.2-6 E_{ABS} vs. E_I structura 2. Vrancea 1990

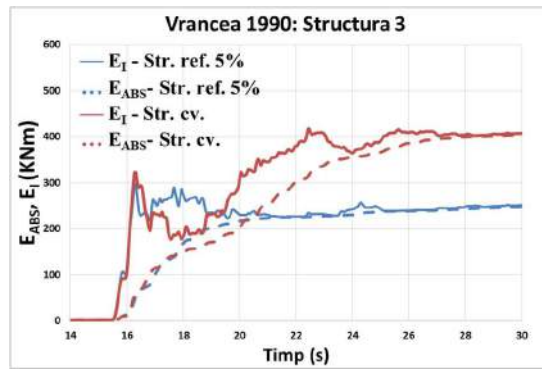


Figura 3.2-7 E_{ABS} vs. E_I structura 3. Vrancea 1990

Diagramele de mai sus evidențiază dependența stării energetice atât de acțiunea seismică – așa cum este de așteptat – cât și de starea de rigiditate laterală (număr de niveluri, contravântuiri). Rolul cel mai important în acest proces energetic îl are acțiunea seismică însăși. De asemenea, apropierea perioadei predominante a cutremurului de perioada (proprie fundamentală a) structurii influențează cantitatea de energie de input seismic E_I . Creșterea cantității de energie de input seismic E_I conduce în mod firesc la creșterea necesarului de capacitate de absorbție energetică E_{ABS} .

Autorul menționează că atât dezvoltările teoretice cât și analizele seismice și rezultatele lor numerice, se referă la comportarea exclusiv în domeniul elastic a structurilor studiate. În această situație, sub-componenta $E_{S,h}$ (capacitate de absorbție energetică conferită de deformațiile în domeniul plastic) este zero și, ca urmare, capacitatea necesară de absorbție energetică E_{ABS} a structurii este definită de relația:

$$E_{ABS} = E_D + E_{AD} \quad (3.2.5)$$

Dezvoltările și rezultatele din acest Capitol 3 constituie, în cea mai mare parte, aplicarea acestor concepte energetice într-o manieră comparativă care evidențiază rolul și efectele rigidității laterale versus amortizare adăugată. Includerea într-un astfel de studiu a comportării în domeniul plastic ar fi îngreunat nu numai analizele seismice propriu-zise dar și decelarea efectelor celor două opțiuni (rigidizare laterală / amortizare adăugată) și a concluziilor asociate.

Abordarea energetică a proiectării structurilor amplasate în zone seismice nu poate și nu trebuie să se substituie abordărilor tradiționale cum sunt abordarea statică (starea de eforturi SLU), abordarea cinematică (starea de deplasări și deformații SLS), starea de ductilitate, starea de stabilitate. Studiul răspunsului seismic energetic răspunde – prin cuprinderea sa – unui deziderat modern al activității de proiectare a structurilor amplasate în zone seismice: considerarea, în această activitate, a sistemului cutremur – structură. Acest concept nou „cutremur - structură” a fost propus, relativ recent, de profesorul Gioncu [77] și militează

pentru aprofundarea specificității cutremurelor (slabe/puternice, de adâncime/de suprafață) și a amplasamentului (aproape / departe) în activitatea de concepere și dimensionare a structurilor amplasate în zone seismice. Într-adevăr, componentele tradiționale (stare de eforturi, stare de deplasări/deformații) ale răspunsului seismic - odată calculate – nu mai țin seama de interacțiunea cutremur – structură. Ele, aceste stări, sunt rezultatul numeric al aplicării convenționale a unor parametri statici (valoarea de vârf a_g a acțiunii seismice, valoarea T_c a perioadei de colț) imuabili. Iată ce spun profesorul V. Gioncu și profesorul F. Mazzolani [77] într-una din cele mai recente apariții editoriale: comportarea seismică a structurii este, de fapt, „un proces prin care structura disipează energia seismică de input”. Un astfel de *proces* nu poate fi abordat prin considerarea exclusivă a unor valori statice ale acțiunii de input seismic. Abordarea energetică poate, însă, cuprinde instantaneu un astfel de proces interactiv cutremur – structură. Diagramele de mai sus (Fig. 3.2-2 ÷ 3.2-7) trebuie citite nu numai ca variație în timp a valorilor unor componente energetice ci și ca interacțiune cutremur – structură. O astfel de interacțiune se manifestă atât prin variația însăși a componentei energetice respective, cât și prin dependența valorilor acestei componente de acțiunea seismică și de parametrii elastici (starea de rigiditate), dinamici, inerțiali și de amortizare a structurii.

Prin cuprinderea aceasta și prin rezultatele obținute luând în considerare interacțiunea cutremur – structură, abordarea energetică poate contribui la îmbogățirea setului de performanțe seismice [78] și chiar a conceptului de proiectare pe bază de performanțe seismice [79].

O altă dimensiune a abordării energetice a răspunsului seismic constă în posibilitatea evaluării capacității de absorbție energetice necesare (a unei structuri date, amplasate într-o zonă seismică dată) pentru asigurarea comportării exclusiv elastice a structurii. În acest context, inginerul proiectant poate anticipa analitic tipul și caracteristicile sistemului de protecție seismică (amortizare adăugată, izolatori în bază, masă adăugată, etc.) adecvat atât structurii cât și acțiunii seismice și corespunzător nivelului de performanță seismică impus prin prevederile normative de proiectare. Posibilitatea vizualizării variației în timp (de-a lungul duratei acțiunii seismice) a capacității de absorbție energetice necesare conferă *stării energetice* un caracter practic, de instrument analitic instantaneu și adaptabil.

Aceste aspecte au determinat recent atenția aprofundată a cercetătorilor asupra potențialului parametrilor energetici (input energetic, energie absorbită, energie înmagazinată) în analiza și modificarea răspunsului seismic al structurilor.

Deși există, în comunitatea inginerescă, tendința conservatoare de a folosi uneltele tradiționale de proiectare bazată pe forțe sau pe deplasări, acestea nu oferă complexitatea de

informații pe care o oferă răspunsul energetic. Avantajul acestor parametri este extinderea dimensiunii vizualizării comportamentului structural, prin includerea aspectelor legate de durată a efectelor seismice [16]. De asemenea, abordarea energetică ia în considerare și efectul cumulativ al componentelor răspunsului seismic. Astfel, prin interpretarea energiei seismice de input se poate sintetiza intensitatea evenimentului seismic. Deși și alte variabile precum accelerația de vârf a terenului sau intensitatea spectrală au capacitatea de a surprinde intensitatea cutremurului, acestea nu iau în considerare influența duratei. Energia seismică de input însă, consideră nu numai durata ci și proprietățile structurii, întrecând astfel, celelalte mărimi folosite în proiectarea seismică, în eficiența măsurării intensității cutremurelor. De asemenea, asocierea parametrilor bilanțului energetic cu variația energiei de input, permite vizualizarea directă a inputului seismic. Îmbogățirea proiectării structurale cu calculul componentelor energetice, în special a capacității necesare de absorbție energetică oferă un instrument simplu în încercarea de atenuare a răspunsului seismic.

Situația ideală în care s-ar putea regăsi o structură poziționată într-o zonă cu potențial seismic este descrisă de relația:

$$CAPACITATEA DE ABSORBȚIE ENERGETICĂ \geq ENERGIA SEISMICĂ DE INPUT$$

Bineînțeles că nici o structură nu poate atinge performanța de a disipa întreaga cantitate a energiei de input, dar după cum demonstrează studiile numerice prezentate în Subcapitolul 3.3, capacitatea de absorbție energetică a unei structuri se poate apropia mult de inputul energetic. Relația cutremur – capacitate de absorbție energetică poate fi pusă într-o formă de tip cerere - ofertă. Cantitatea E_I de energie de input seismic indusă de cutremur structurii este ceea ce cutremurul „cere” structurii. Capacitatea de absorbție energetică E_{ABS} a structurii este ceea ce structura „oferă”. Cu alte cuvinte, capacitatea de absorbție E_{ABS} reprezintă necesarul de capacitate de absorbție pe care un cutremur dat îl cere unei structuri date pentru ca răspunsul seismic al acesteia să se înscrie în totalitate în domeniul elastic. Folosind relaționarea de tip „cerere - ofertă”, se pot evidenția mai simplu următoarele aspecte asociate:

- Cantitatea de energie de input seismic E_I depinde atât de specificitatea seismică a amplasamentului cât și de structura propriu-zisă și de echiparea acesteia. De exemplu, aceleași structuri având diferite echipări de rigidizare laterală sau de amortizare adăugată i se vor induce cantități de energie seismică E_I diferite (Fig. 3.2-8, 3.2-9);
- Necesarul de capacitate de absorbție energetică E_{ABS} depinde – la rândul său - de cantitatea E_I de energie și de structură și echiparea acesteia (Fig. 3.2-10, 3.2-11).

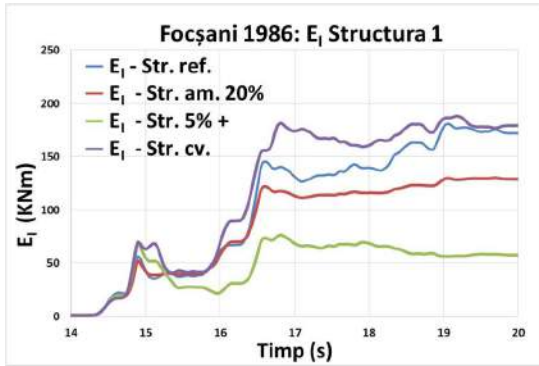


Figura 3.2-8 E_1 structura 1. Focșani 1986

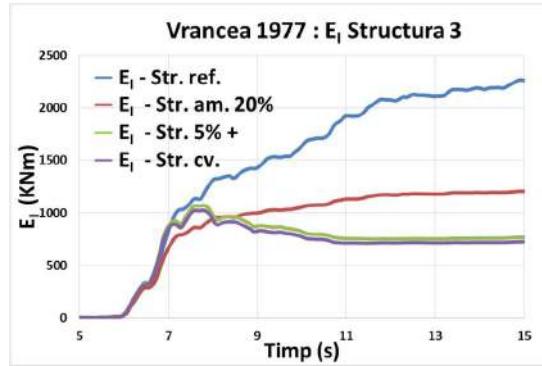


Figura 3.2-9 E_1 structura 3. Vrancea 1977

Energia seismică de input este un parametru care depinde atât de acțiunea seismică cât și de structură și de echiparea structurii. Aceiași acțiune seismică induce aceleași structuri cantități diferite de energie seismică în funcție de fracțiunea de amortizare critică și de rigiditatea laterală. În cazul acțiunii seismice Focșani 1986 (Fig. 3.2-8) aplicată structurii 1 se constată o variație mare a cantității de energie induse astfel: rigiditatea laterală mare este asociată unei cantități reduse de energie de input seismic în timp ce rigiditatea laterală scăzută conduce la o cantitate mare de energie seismică. Amortizarea adăugată reduce nivelul de energie indusă seismic.

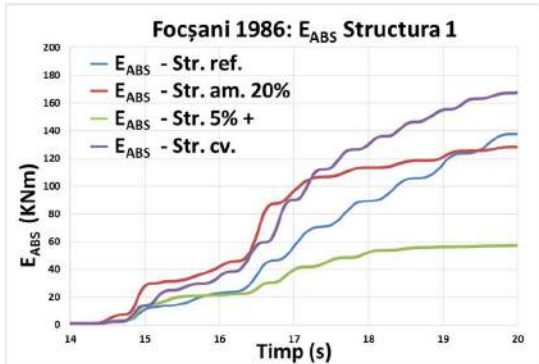


Figura 3.2-10 E_{ABS} structura 1. Focșani 1986

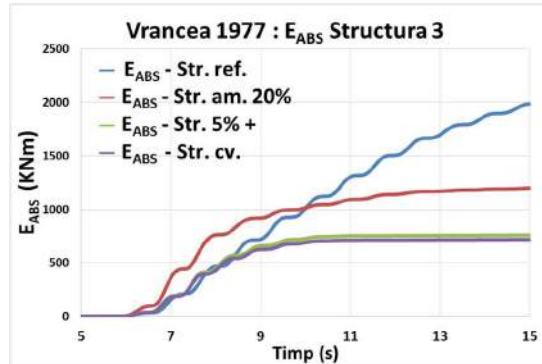


Figura 3.2-11 E_{ABS} structura 3. Vrancea 1977

Starea de rigiditate laterală și de amortizare influențează și capacitatea de absorbție energetică. Din acest punct de vedere, se constată o reducere a capacității de absorbție în cazul structurilor rigide și o creștere a acestei capacități, în cazul structurilor cu amortizare adăugată.

O modalitate expresivă de evidențiere a dependenței cantității E_I de cutremur și structură și a necesarului energetic E_{ABS} de cutremur, structură și echipare constă în exprimarea raportului E_{ABS}/E_I adică, a necesarului de capacitate de absorbție energetică ca procentaj din cantitatea de energie seismică induse structurii (Fig. 3.2-12, 3.2-13).

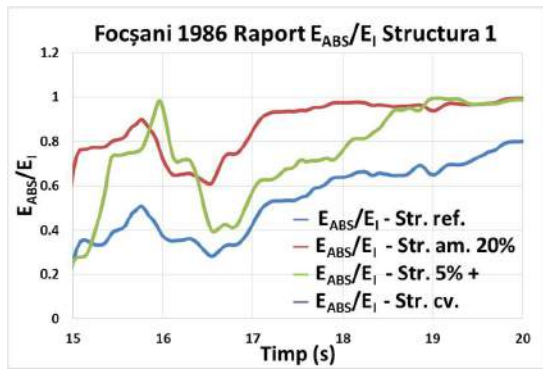


Figura 3.2-12 E_{ABS}/E_I structura 1. Focșani 1986

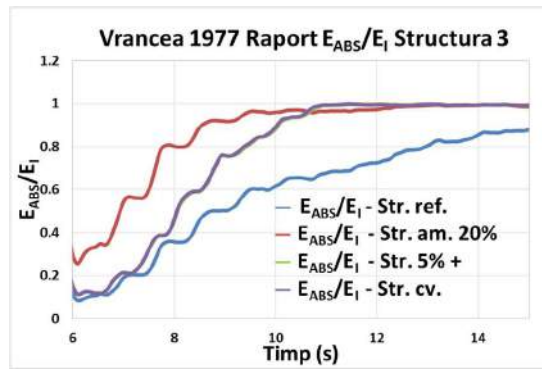


Figura 3.2-13 E_{ABS}/E_I structura 3. Vrancea 1977

Având în vedere că acțiunea seismică, structura propriu-zisă, nivelul de amortizare și rigiditatea laterală influențează atât cantitatea de energie seismică de input cât și capacitatea de absorbție energetică, corelarea acestor două cantități exprimă realist starea energetică a structurii. Variația raportului E_{ABS}/E_I (Fig. 3.2-12, 3.2-13) oferă o gradare utilă și concluzii relevante privind starea energetică a unei structuri. În ambele situații, dar, mai ales, în cazul acțiunii Vrancea 1977 se constată că raportul are valori mici pentru structura de referință, iar valorile raportului cresc pentru ipostazele rigidizate și devin cele mai mari pentru structura echipată cu amortizare adăugată.

Prezentul studiu prezintă o multitudine de cazuri asociate capacității necesare de absorbție energetică pentru structuri metalice multi-etajate. Situațiile studiate se încadrează în trei mari categorii: *rigiditatea laterală*, *amortizarea structurală inerentă*, și *amortizarea adăugată prin dispozitive de disipare a energiei*.

O altă dimensiune a abordării energetice – în care conceptul de capacitate de absorbție energetică este fundamental - este proiectarea bazată pe performanță. Această metodă de proiectare seismică propune un set de indici – parametri ai calculului structural – care situează o structură într-un anumit nivel predefinit de performanță seismică. Conceptul proiectării bazate pe performanță este definit în prevederile, normativele sau codurile existente în câteva țări avansate din punct de vedere al realizărilor în domeniul construcțiilor [6], [8], [54]. Există mai multe clasificări ale nivelurilor de performanță, dar, în general se definesc niveluri de performanță structurale sau nestructurale. Aceste niveluri de performanță sunt strâns legate de activitatea seismică a zonei de amplasament. Nivelul dorit de performanță seismică este stabilit luând în considerare intensitatea și recurența evenimentelor seismice, după cum se poate observa în figura de mai jos (Fig. 3.2-14) [22], dar și clasa de importanță a structurii proiectate.



Figura 3.2-14 Relația nivel de performanță seismică – intensitate seismică

Potențialul abordării energetice, atât în partea de analiză cât și în cea de proiectare, a condus la crearea unor tehnici noi în calculul structural cum este cea a curbei de capacitate. Tradiționala curbă de capacitate exprimată prin relația forță tăietoare seismică de bază – deplasare laterală a ultimului nivel, poate fi augmentată cu o nouă curbă de capacitate exprimată prin relația capacitate de absorbție energetică – deplasare laterală a ultimului nivel [80], [81], [82], [83]. Necesitatea asigurării prin proiectare a unei capacități adecvate de absorbție energetică a condus, chiar, la elaborarea spectrelor seismice energetice de proiectare [74]. Aceste spectre energetice completează tabloul tradițional al spectrelor de proiectare exprimate în deplasări, viteze și accelerații prin prezentarea – ca parametru spectral – energiei de input seismic. În acest fel, spectrul (energetic) de proiectare devine mai cuprinzător prin abordarea simultană a seismicității terenului, a parametrilor structurali și a efectelor echipării cu sisteme de protecție seismică.

O dezvoltare rapidă și cuprinzătoare – din punct de vedere al structurilor incluse – o are abordarea energetică în domeniul cuantificării stării de degradare / avariere a construcțiilor afectate de acțiunile seismice. Au fost propuși indici energetici care exprimă starea de degradare (articulații plastice, fisurare) a unei structuri acționate seismic. Indicii exprimă procentual cantitatea de energie absorbită prin deformațiile remanente relativ la cantitatea de energie seismică de input [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91].

Cercetarea întreprinsă și cuprinsă în teza de doctorat se referă la acest concept – capacitate de absorbție energetică – și îl dezvoltă cu referire la starea de rigiditate și cea de amortizare a structurilor metalice multi-etajate.

3.3 Capacitate de absorbție energetică vs. amortizare adăugată. Studii numerice

Așa cum este definită mai sus, capacitatea de absorbție a energiei seismice a unei structuri denotă eficiența acesteia în disiparea energiei introduse în sistem. Structurilor amplasate în zone cu activitate seismică intensă trebuie să li se asigure această capacitate de absorbție energetică care să depășească inputul seismic. Pentru depistarea proprietăților energetice ale structurilor analizate în acest studiu, se propune reprezentarea variației raportului E_{ABS}/E_I care cuprinde atât capacitatea de absorbție energetică a structurii cât și inputul seismic și relația dintre acestea. De asemenea este prezentată variația energiei cinetice și a energiei potențiale – sau de deformare elastică. Energia cinetică E_K se definește ca lucrul mecanic necesar pentru schimbarea vitezei unui corp aflat în repaus, iar energia de deformare $E_{S,e}$, este conținută în material și sistemul structural pe măsură ce se desfășoară mișcarea ce provoacă deformarea acestora. Deși, mai sus, referirea la energia de deformare elastică se realiza prin notația $E_{S,e}$, în continuare se va renunța la mențiunea "e" care denotă caracterul elastic al deformăției. Notația utilizată pentru exprimarea energiei de deformare elastice este E_S . Analizele numerice prezentate, fiind realizate pentru surprinderea efectului amortizării adăugate asupra răspunsului seismic în domeniul elastic, nu necesită studiul energiei de deformare plastică, sau histeretică, notată cu $E_{S,h}$.

Se reamintesc sistemele structurale folosite în acest studiu pentru prezentarea componentelor energetice ale răspunsului seismic, anume structurile 1, 2 și 3 cu 5 deschideri și 6, 9 și 12 niveluri. Structurile studiate se încadrează în patru ipostaze: structura de referință cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=5\%$ și structurile cu amortizare adăugată $\xi=10\%$, $\xi=15\%$ și $\xi=20\%$. Astfel se poate observa evoluția treptată a răspunsului seismic pe măsură ce crește nivelul de amortizare. Valoarea maximă de 20% a procentului de amortizare adăugată a fost ales pentru a reprezenta mai bine performanțele reale ale amortizorilor vâscoși. De asemenea, o valoare mai mare ar implica costuri materiale mai mari decât permite implementarea unui sistem de protecție seismică, eficient din punct de vedere economic.

Astfel se prezintă rezultatele parametrilor energetici obținute prin solicitarea structurilor la acțiunile seismice reprezentate de accelerograma Vrancea 4 Martie 1977, și cele două accelerograme scalate la valoarea 0,24g (a accelerației terenului): Focșani 31 August 1986 și Vrancea 30 Mai 1990, în Figurile 3.3-1 ÷ 3.3-9. Primul parametru prezentat este raportul

E_{ABS}/E_I al structurilor solicitate la cutremurul Focșani 1986. Pentru compararea eficienței structurilor în reducerea răspunsului seismic se extrag valorile raportului E_{ABS}/E_I în punctul de maxim de intensitate al cutremurului analizat (Focșani 1986 – 14,84 [s], Vrancea 1977 – 6,08 [s] și Vrancea 1990 16,03 [s]).

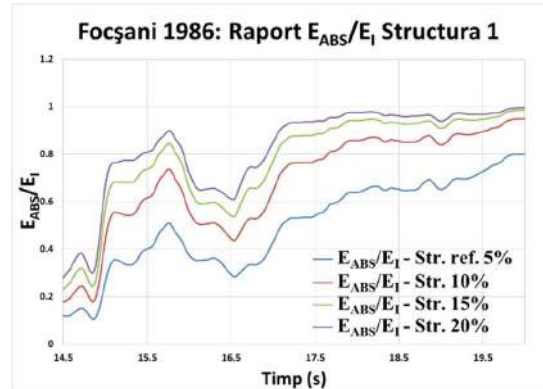


Figura 3.3-1 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 1. Focșani 1986

Variația raportului E_{ABS}/E_I a structurii 1 cu 5 deschideri și 6 niveluri este prezentată în Figura 3.3-1. Se observă că valoarea acestui raport crește pe măsură ce nivelul de amortizare impus structurii este majorat. Valoarea acestui raport indică proporția de energie seismică de input pe care structura o absoarbe, astfel, cu cât acest raport este mai aproape de valoarea 1, cu atât este mai eficientă structura în disiparea energiei seismice. Se constată amplificarea raportului energetic prin amortizare adăugată, de la valoarea de referință 0,125 la valorile 0,206, 0,269, și respectiv, 0,321 pentru nivelurile de amortizare reprezentate de fracțiunea de amortizare critică $\xi=10\%$, $\xi=15\%$ și $\xi=20\%$.

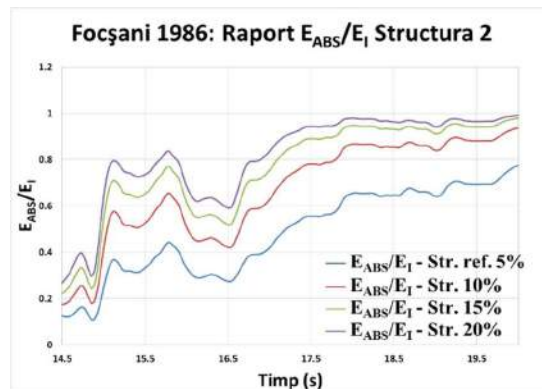


Figura 3.3-2 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 2. Focșani 1986

În cazul structurii 2, acționate seismic prin cutremurul Focșani 1986, se observă majorarea variației raportului E_{ABS}/E_I odată cu creșterea nivelului de amortizare critică. Între diferitele niveluri de amortizare se constată o diferență mai pregnantă a raportului energetic. Dacă între structura de referință și cea cu nivelul de amortizare $\xi=10\%$, diferența dintre valorile

obținute în momentul de vârf al cutremurului (în acest caz 14,84 [s]) (0,113 și, respectiv 0,185) este 0,072, valorile raportului pentru structurile cu nivel superior de amortizare sunt mai apropiate: 0,247 (structura cu $\xi=15\%$) și 0,301 (structura cu $\xi=20\%$).

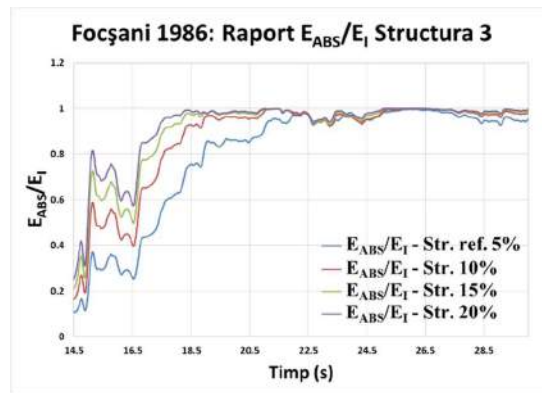


Figura 3.3-3 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 3. Focșani 1986

Structura 3 cu 5 deschideri, și 12 niveluri, acționată seismic de Focșani 1986, prezintă aceeași variație a raportului capacității de absorbție energetică și a energiei seismice de input E_{ABS}/E_I , sporită, pe măsură ce crește procentul de amortizare impus structurilor. Se observă, de asemenea faptul că diferența variației raportului, dintre două structuri cu nivel consecutiv de amortizare scade de la structura de referință spre nivelul maxim de amortizare. Valorile raportului energetic obținute în momentul de intensitate maximă a cutremurului (14,84 [s]) în ordinea nivelului de amortizare (începând cu fracțiunea de amortizare critică a structurii de referință $\xi=5\%$ și continuând cu nivelurile superioare $\xi=10\%$, $\xi=15\%$ și $\xi=20\%$) sunt 0,106, 0,179, 0,242 și 0,297.

În continuare se prezintă variația raportului E_{ABS}/E_I în cazul structurilor acționate seismic prin cutremurul Vrancea 1977:

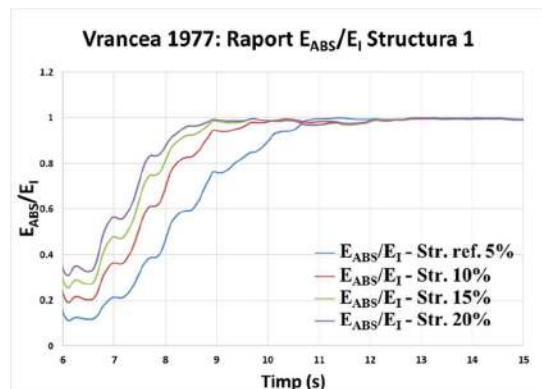


Figura 3.3-4 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 1. Vrancea 1977

Structura 1 cu 5 deschideri și 6 niveluri prezintă o variație a raportului capacității de absorbție energetică și a energiei de input E_{ABS}/E_I similară cu structurile acționate seismic de

cutremurul Focșani 1986. Variația acestui raport crește cu ridicarea nivelului fracțiunii de amortizare impusă structurii. Ca și în cazurile celorlalte structuri ritmul amplificării raportului E_{ABS}/E_I descrește la nivelurile superioare de amortizare. Valoarea înregistrată la momentul de vârf al cutremurului (6,08 [s]) la structura de referință este 0,113. Prin ridicarea nivelului de amortizare valoarea acestui raport crește la 0,192 pentru structura cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=10\%$, la 0,255 pentru structura cu $\xi=15\%$ și la 0,307 pentru structura cu $\xi=20\%$.

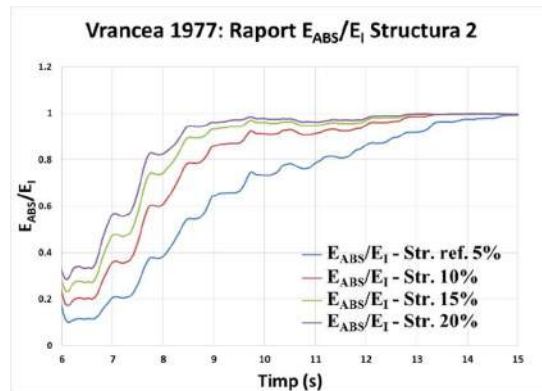


Figura 3.3-5 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 2. Vrancea 1977

Similar, structura 2 acționată de cutremurul Vrancea 1977, a cărei variație a raportului E_{ABS}/E_I este reprezentată în Figura 3.3-5, prezintă o amplificare a acestui parametru pe măsură ce crește fracțiunea de amortizare critică a structurii. Eficiența unui surplus de 5 procente în amortizarea structurii, descrește pe măsură ce nivelul de amortizare se îndepărtează de valoarea de referință. Valorile raportului E_{ABS}/E_I cresc, bineînțeles, de la structura de referință 0,107, în funcție de gradul de amortizare. Astfel structura cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=10\%$ are valoarea raportului energetic egală cu 0,175, structura $\xi=15\%$ - valoarea 0,233, iar structura cu $\xi=20\%$ - valoarea 0,284.

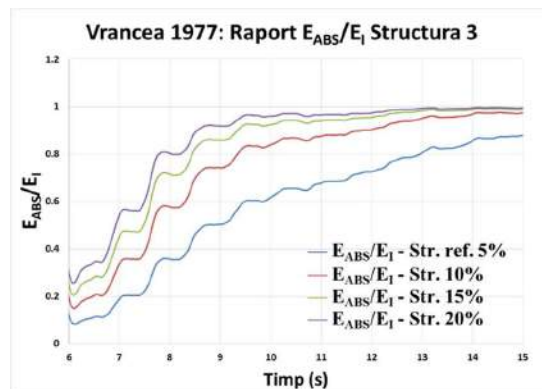


Figura 3.3-6 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 3. Vrancea 1977

Variația capacității de absorbție a energiei în raport cu energia indusă, a structurii 3, suferă modificări în funcție de nivelul de amortizare critică. Impunerea unui grad mai mare de

amortizare conduce la amplificarea raportului E_{ABS}/E_I . Astfel, valoarea acestui parametru crește treptat de la valoarea structurii de referință 0,085 la valorile 0,150, 0,206 și 0,255 pentru structurile cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=10\%$, $\xi=15\%$ și, respectiv, $\xi=20\%$.

Ultima accelerogramă prin care se prezintă variația raportului dintre capacitatea de absorbție energetică și energia de input, este Vrancea 1990:

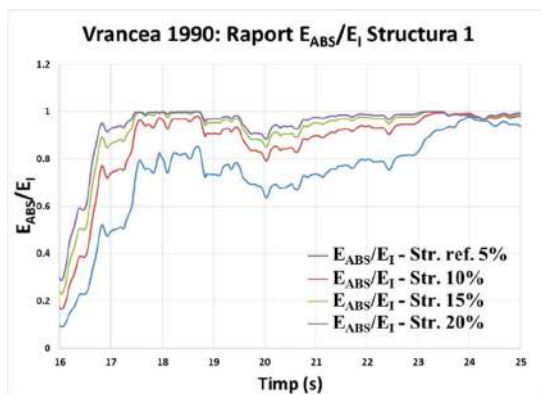


Figura 3.3-7 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 1. Vrancea 1990

Similar analizelor realizate cu ajutorul celorlalte două accelerograme, rezultatele obținute prin solicitarea structurilor la cutremurul Vrancea 1990, prezintă amplificarea capacității de absorbție energetică a structurilor cu amortizare adăugată. Amplificarea raportului energetic E_{ABS}/E_I se produce treptat, odată cu ridicarea nivelului de amortizare de la structura de referință, la treptele superioare, cu fracțiunea de amortizare critică egală cu $\xi=10\%$, $\xi=15\%$ și $\xi=20\%$. În ordinea enunțării nivelurilor de amortizare, structurile au valoarea raportului E_{ABS}/E_I în momentul de vârf al cutremurului (16,03 [s]) egală cu 0,091, 0,165, 0,229 și 0,285.

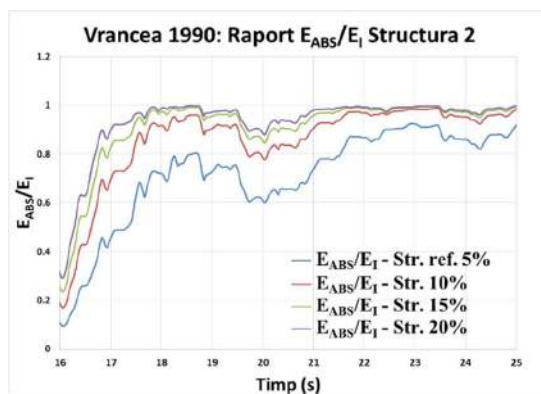


Figura 3.3-8 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 2. Vrancea 1990

A doua structură, solicitată seismic de Vrancea 1990, prezintă următoarele valori ale raportului E_{ABS}/E_I , în momentul de vârf al intensității seismice: 0,097, 0,173, 0,237 și 0,293, pentru structura de referință, structura cu amortizare adăugată $\xi=10\%$, $\xi=15\%$ și, respectiv,

$\xi=20\%$. Se constată că, raportul energetic se amplifică, deci și capacitatea structurii de a absorbi energia seismică de input.

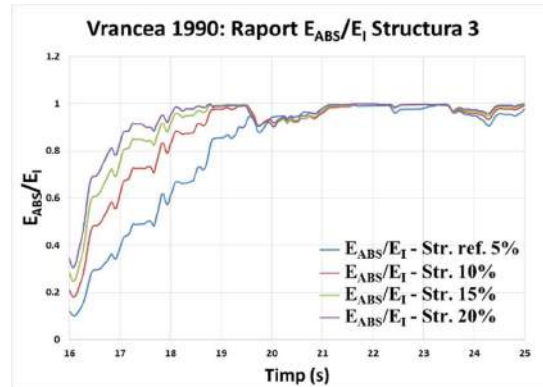


Figura 3.3-9 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 3. Vrancea 1990

Și în cazul structurii 3 acționată seismic prin cutremurul Vrancea 1990, se constată efectul amortizării adăugate. Structura de referință are valoarea capacității de absorbție a energiei induse, reprezentată de raportul E_{ABS}/E_I , egală cu 0,109 la momentul de vârf al cutremurului. Valoarea acestui raport se amplifică pe măsură ce crește nivelul de amortizare. Astfel, pentru structura cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=10\%$, raportul E_{ABS}/E_I este egal cu 0,192, pentru nivelul de amortizare $\xi=15\%$ - 0,260 – iar pentru nivelul de amortizare $\xi=20\%$ - 0,316.

A doua categorie de parametri prezentați sunt energia cinetică E_K și energia de deformație elastică E_S (potențială). Acestea sunt prezentate în paralel pentru fiecare structură analizată. Prima parte a rezultatelor reprezintă variația energiei cinetice și de deformație elastică induse structurii de acțiunea seismică Focșani 1986 (Figurile 3.3-10 ÷ 3.3-27):

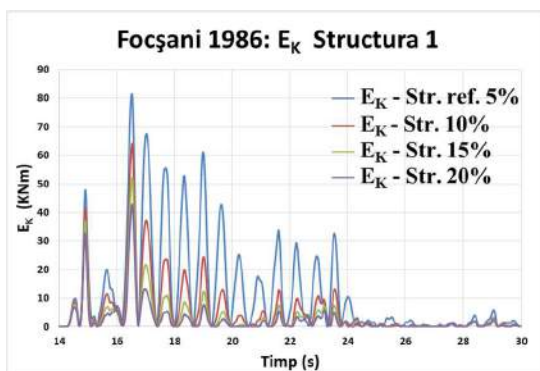


Figura 3.3-10 E_K structura 1. Focșani 1986

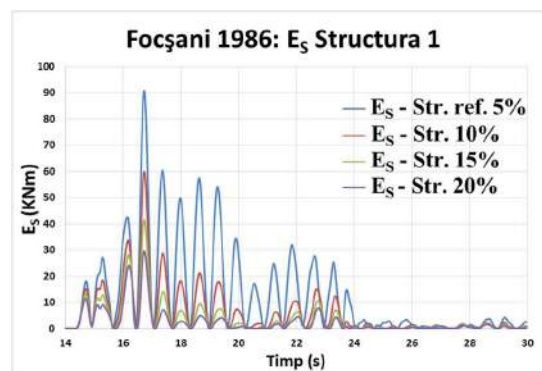


Figura 3.3-11 E_S structura 1. Focșani 1986

Prima structură prezentată pentru a evidenția efectul amortizării adăugate asupra variației energiei cinetice E_K și a energiei de deformație elastică E_S este structura 1. Se observă că ridicarea nivelului de amortizare conduce la reducerea acestor doi parametri. În cazul

energiei cinetice, valorile la momentul de vârf a cutremurului variază de la 81,45 [KNm] – pentru structura de referință - la valoarea 42,93 [KNm] – a structurii cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=20\%$. Variația energiei de deformație elastică parcurge intervalul $90,80 \div 29,55$ [KNm], între valorile structurii de referință și a celei cu nivelul maxim de amortizare adăugată ($\xi=20\%$).

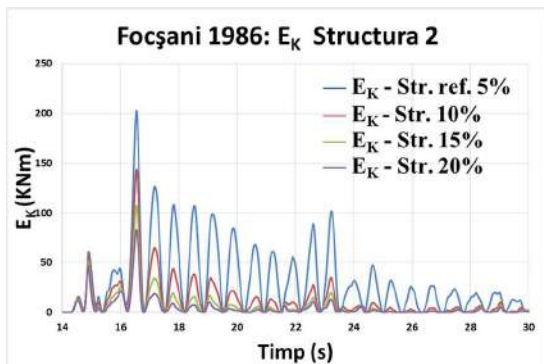


Figura 3.3-12 E_K structura 2. Focșani 1986

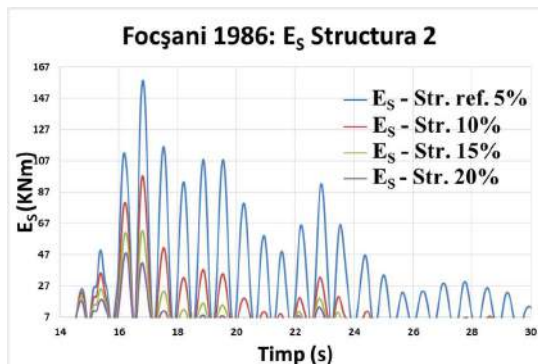


Figura 3.3-13 E_S structura 2. Focșani 1986

Structura 2, acționată seismic de cutremurul Vrancea 1977, prezintă aceeași variație a energiei cinetice E_K și a energiei de deformație elastică E_S redusă pe măsură ce crește procentul de amortizare impus structurilor. Se observă, de asemenea, faptul că diferența variației acestor doi parametri, dintre două structuri cu nivel consecutiv de amortizare scade de la structura de referință spre nivelul maxim ($\xi=20\%$). Intervalul de valori al energiei cinetice este $202,71 \div 83,15$ [KNm], iar cel al energiei de deformație elastică $158,46 \div 46,18$ [KNm].

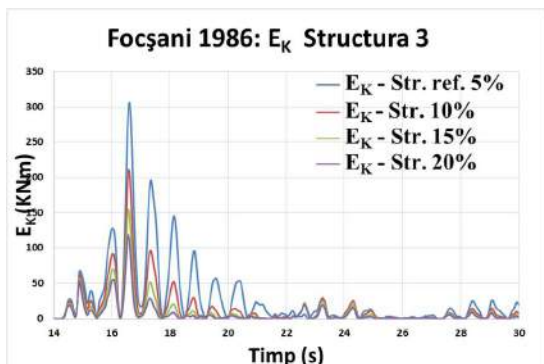


Figura 3.3-14 E_K structura 3. Focșani 1986

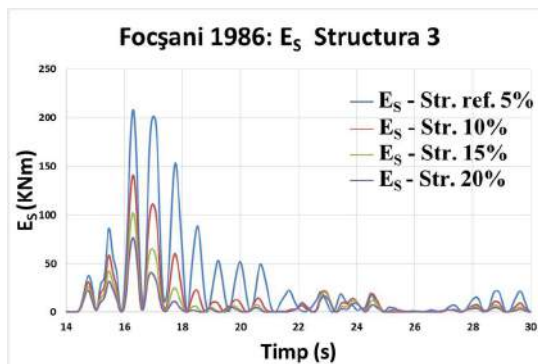


Figura 3.3-15 E_S structura 3. Focșani 1986

În cazul structurii 3, solicitată seismic de Focșani 1986, variația celor doi parametri studiați – energia cinetică E_K și energia de deformație elastică E_S - se încadrează în intervalul $305,81 \div 118,57$ [KNm], respectiv $208,17 \div 76,82$ [KNm]. Cele două intervale sunt, bineînțeles, delimitate de structura de referință și cea amortizată cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=20\%$.

În continuare se reprezintă variația energiei cinetice și a energiei de deformație elastică rezultate prin solicitarea structurilor la acțiunea seismică Vrancea 1977:

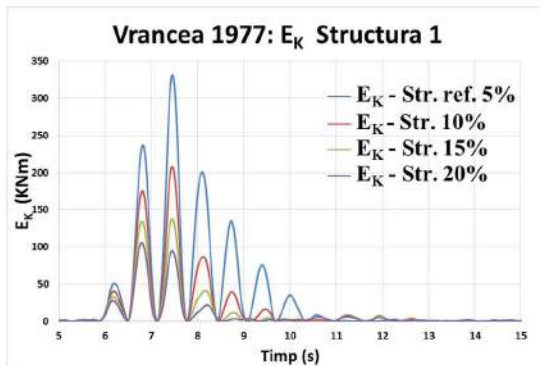


Figura 3.3-16 E_K structura 1. Vrancea 1977

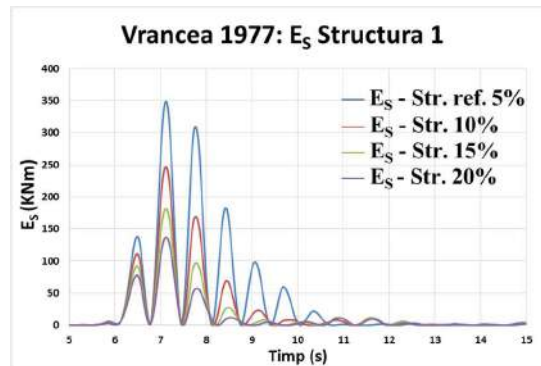


Figura 3.3-17 E_S structura 1. Vrancea 1977

În cazul accelerogramei Vrancea 1977, se observă amplificarea valorilor parametrilor energetici - energia cinetică E_K și energia de deformație elastică E_S . Amplitudinea crescută a mărimilor rezultate, și reducerea lor prin amortizare adăugată, este astfel mai bine vizualizată. Cele patru niveluri de amortizare $\xi=5\%$, $\xi=10\%$, $\xi=15\%$ și $\xi=20\%$ produc valori ale energiei cinetice E_K și ale energiei de deformație elastică E_S care variază de la valorile (structurii de referință) 331,69 [KNm], respectiv 348, 94 [KNm] la valorile (structurii cu nivel maxim de amortizare adăugată $\xi=20\%$) 105,64 [KNm], respectiv 136,06 [KNm].

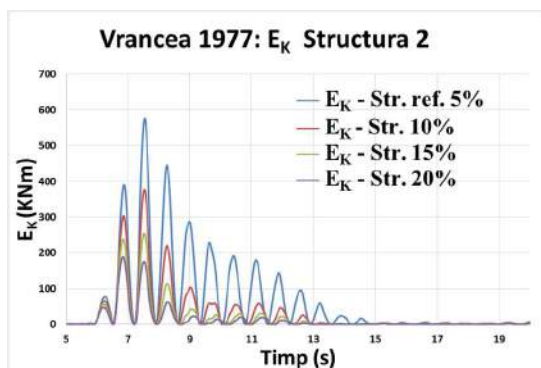


Figura 3.3-18 E_K structura 2. Vrancea 1977

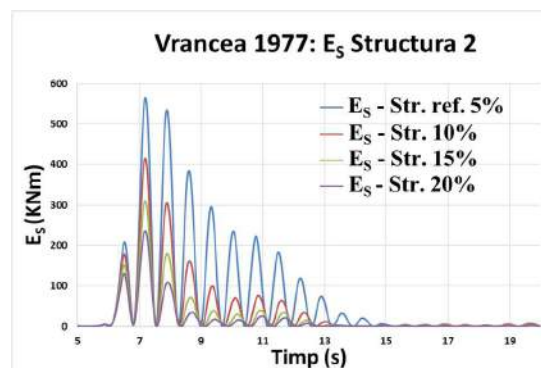


Figura 3.3-19 E_S structura 2. Vrancea 1977

Efectul de reducere a parametrilor energetici, produs în urma echipării cu amortizare adăugată este evident și în cazul structurii 2, solicitată seismic de cutremurul Vrancea 1977. Valorile între care se încadrează energia cinetică și energia de deformație elastică sunt 576,58 ÷ 189,73 [KNm], respectiv 565,42 ÷ 236,08 [KNm]. Se constată că același nivel de amortizare ($\xi=20\%$) produce o reducere mai consistentă a energiei cinetice, anume de 67% (E_K) față de 58% (E_S).

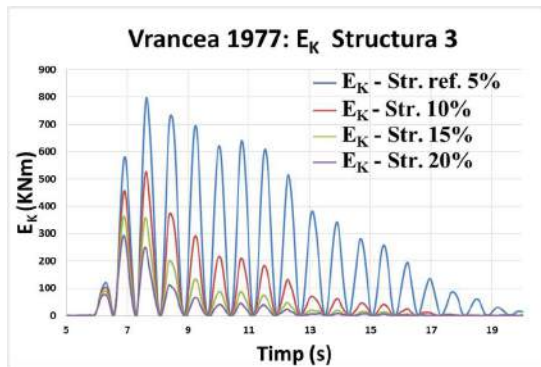


Figura 3.3-20 E_K structura 3. Vrancea 1977

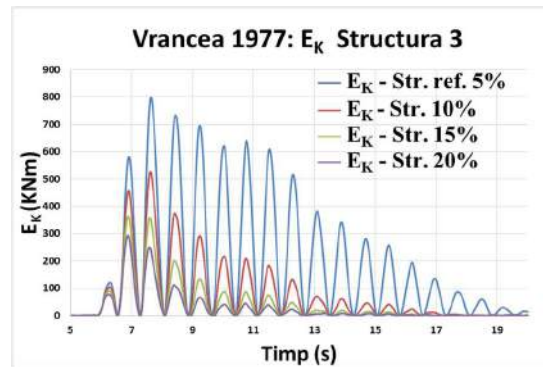


Figura 3.3-21 E_S structura 2. Vrancea 1977

Variația parametrilor energetici, energia cinetică E_K și energia de deformație elastică E_S a structurii 3 acționată seismic de cutremurul Vrancea 1977 oferă cea mai bună vizualizare a efectului de reducere ai răspunsului energetic pe care îl are echiparea cu amortizare adăugată. Valorile parametrilor energetici a structurii de referință – 797,65 [KNm] (E_K) și 855,06 [KNm] (E_S) - se reduc prin adăugarea a doar 5 procente la fracțiunea de amortizare critică a structurii, rezultând astfel valorile 526,38 [KNm], respectiv 605,82 [KNm]. Valorile finale, rezultate din analiza structurii cu nivelul de amortizare $\xi=20\%$ sunt 293,19 [KNm] – energia cinetică – și 348,05 [KNm] – energia de deformație elastică.

Ultima accelerogramă folosită pentru surprinderea evoluției în timp, a parametrilor energetici - energia cinetică și de deformație elastică - este Vrancea 1990:

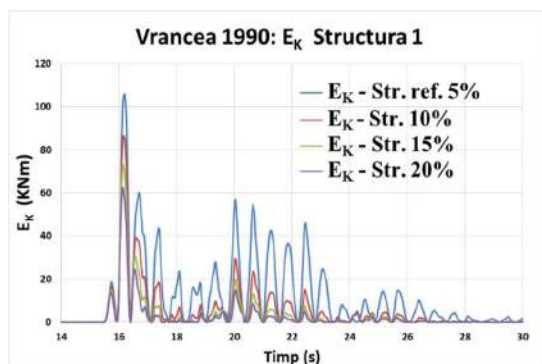


Figura 3.3-22 E_K structura 1. Vrancea 1990

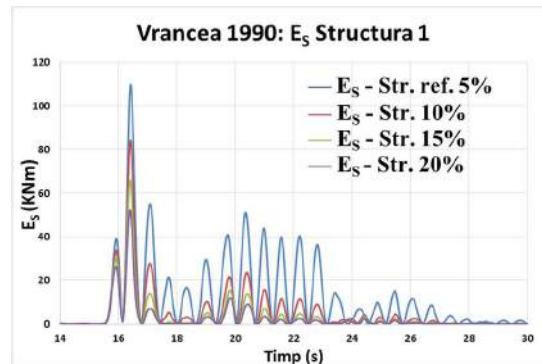


Figura 3.3-23 E_S structura 1. Vrancea 1990

Ridicarea nivelului de amortizare a structurii 1, acționată seismic prin cutremurul Vrancea 1990, conduce la scăderea parametrilor energetici analizați. Variația energiei cinetice E_K cuprinde intervalul de valori 105,87 ÷ 62,66 [KNm]. Se constată astfel, că un nivel de amortizare $\xi=20\%$ conduce la reducerea energiei cinetice cu 41%. Variația energiei de deformație elastică E_S cuprinde un interval mai larg 109,92 ÷ 52,22 [KNm]. Aceeași valoare a fracțiunii de amortizare critică ($\xi=20\%$), conduce la reducerea energiei de deformație elastică cu 52%.

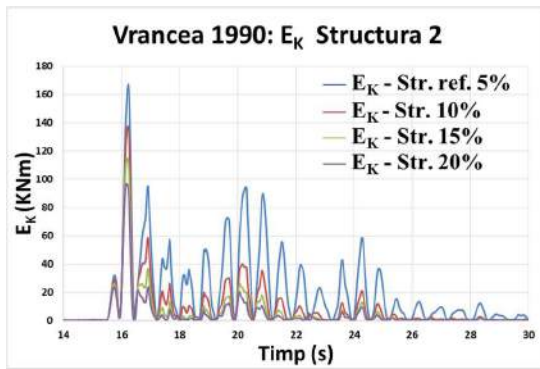


Figura 3.3-24 E_K structura 2. Vrancea 1990

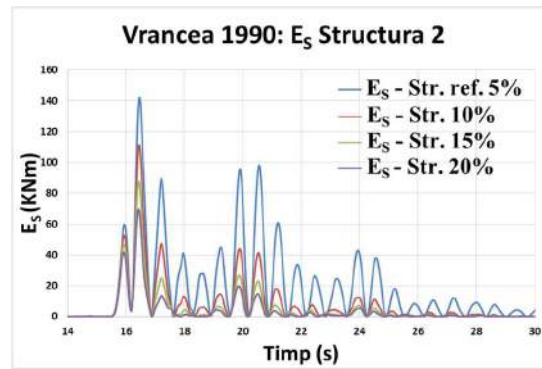


Figura 3.3-25 E_S structura 2. Vrancea 1990

Variația parametrilor energetici, în cazul structurii 2, acționată de cutremurul Vrancea 1990 parcurge următoarele intervale: energia cinetică E_K - 167,44 ÷ 96,73 [KNm] - și energia de deformație elastică E_S - 142,01 ÷ 69,46 [KNm]. Se observă, din nou, efectul de reducere a energiei cinetice și a energiei de deformație elastică, odată cu adăugarea amortizării. Procentul cu care cei doi parametri se reduc sunt 42%, respectiv 51%.

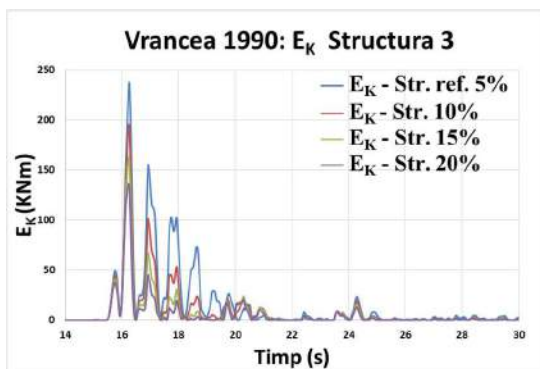


Figura 3.3-26 E_K structura 3. Vrancea 1990

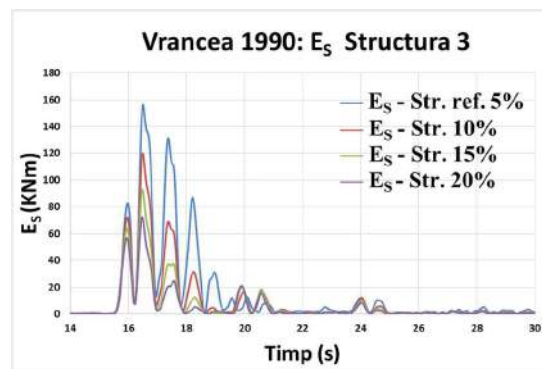


Figura 3.3-27 E_S structura 3. Vrancea 1990

Prin echiparea cu amortizare adăugată a structurii 3, solicitată la acțiunea seismică Vrancea 1990, se obține reducerea parametrilor energetici - E_K și E_S . Astfel, energia cinetică E_K se încadrează într-un interval 237,50 ÷ 136,72 [KNm], delimitat de cadrul de referință și cel cu amortizare adăugată $\xi=20\%$, iar energia de deformație elastică E_S - 156,53 ÷ 72,54 [KNm].

3.4 Capacitate de absorbție energetică vs. rigiditate laterală. Studii numerice

Reprezentarea capacității structurale de absorbție a energiei seismice relevă multe informații importante necesare pentru obținerea unui răspuns seismic satisfăcător. Abordarea energetică, și calculul elementelor componente ale bilanțului energetic oferă o viziune diferită, mai bogată, a influenței seismice asupra sistemului structural. Deși metodele de proiectare nu folosesc, de cele mai multe ori, această abordare, cercetarea în domeniu confirmă eficiența

calculului parametrilor energetici prin multitudinea studiilor elaborate despre acest subiect. Astfel, prezentul studiu propune elaborarea de analize asupra unor structuri metalice multi-etajate, care să prezinte parametrii energetici. Mărimile alese pentru a fi reprezentate sunt raportul E_{ABS}/E_I , variația energiei cinetice și a energiei de deformație elastică. Cei doi parametri – energia cinetică E_K și cea de deformație elastică E_S – sunt prezentați în paralel pentru fiecare tip de structură.

Structurile analizate sunt variate din punct de vedere geometric, pentru a cuprinde o gamă cât mai mare a cadrelor folosite în proiectare. Astfel, structurile prezintă 5 deschideri, sunt dispuse pe înălțime în 6, 9 și 12 niveluri. Spre deosebire de Subcapitolul precedent, unde structurile erau prevăzute cu diferite niveluri ale fracțiunii de amortizare critică, aceste rezultate prezintă variația componentelor bilanțului energetic prin considerarea a trei metode de protecție seismică: rigidizarea prin creșterea secțiunilor transversale ale elementelor structurii, contravântuirea sau amortizarea adăugată. Toate aceste trei variante de structuri sunt reprezentate în comparație cu structura de referință, cu amortizarea inerentă egală cu 5%. Valoarea fracțiunii de amortizare critică a structurii cu amortizare adăugată este 20%.

Din nou, structurile analizate sunt solicitate prin acțiunile seismice, cele mai puternice înregistrate în România, anume: Vrancea 4 Martie 1977, Focșani 31 August 1986, și Vrancea 30 Mai 1990 – ultimele două accelerograme fiind scalate la valoarea 0,24g.

Perioada de vibrație reprezintă durata necesară pentru ca sistemul pendul să parcurgă un ciclu de mișcare. Mai exact, perioada reprezintă intervalul dintre două intersecții consecutive ale graficului accelerației unei structuri cu abscisa. Determinarea perioadei fundamentale de vibrație a unei structuri este esențială în proiectare, aceasta fiind un important indicator al capacității de rezistență a unei structuri. La fel și în cazul cutremurelor perioada predominantă de vibrație este un indicator important, folosit pentru definirea intensității și a adâncimii focarului. Astfel, se prezintă în continuare tabelul 3.4-1 al perioadelor fundamentale de vibrație pentru cele trei structuri în cele patru ipostaze studiate: structura de referință / cu amortizare adăugată, structura contravântuită și cea rigidizată prin secțiuni transversale crescute. Se observă reducerea perioadei structurilor protejate seismic prin secțiuni transversale crescute (structura rigidizată) și prin contravântuire. Rigidizarea laterală, fie prin secțiuni transversale crescute fie prin contravântuiri conduce la reducerea perioadei, în cazul primei structuri cu 20%, respectiv 34%. Metodele de rigidizare laterală în cazul structurii 2, sunt la fel de eficiente în reducerea perioadei, cele două valori – 1,09 și 1,04 fiind aproape egale. Procentul cu care se reduce acest parametru este 19% - prin secțiuni crescute – și 23% - prin

contravântuire. Variantele rigidizate ale structurii 3, însă, prezintă aceeași perioadă de vibrație, anume 1,25, redusă cu 19%, față de structura de referință.

Tabel 3.4-1 Perioada de vibrație a structurilor 1 ÷ 3, și a cutremurelor Focșani 1986, Vrancea 1990 și Vrancea 1977

Structura	Str. 1	Str. 2	Str. 3	Focșani 86	Vrancea 90	Vrancea 77
Referință/Am.	1.25	1.36	1.55			
Rigidizată	1.00	1.09	1.25	0.50	0.66	1.16
Contravântuită	0.82	1.04	1.25			

În continuare se prezintă variația raportului E_{ABS}/E_I a structurilor 1 ÷ 3 în reprezentările grafice 3.4-1 ÷ 3.4-9. Din nou, pentru compararea eficienței structurilor în reducerea răspunsului seismic se extrag valorile raportului E_{ABS}/E_I în punctul de maximă intensitate al cutremurului analizat (Focșani 1986 – 14,84 [s], Vrancea 1977 – 6,08 [s] și Vrancea 1990 16,03 [s]). Prima categorie de rezultate sunt obținute prin solicitarea structurilor la cutremurul Vrancea 1977:

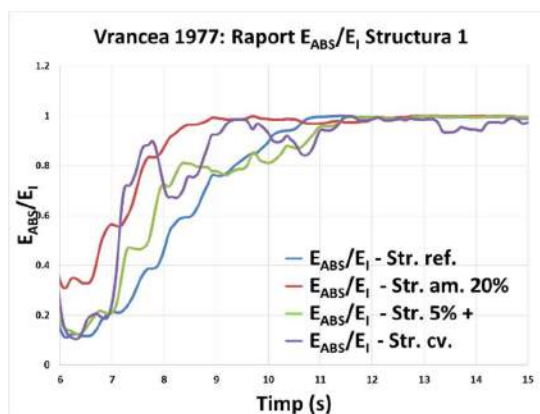


Figura 3.4-1 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 1. Vrancea 1977

Prima structură acționată de cutremurul Vrancea 1977, este structura 1 cu 5 deschideri, și 6 niveluri. Situația ideală în care se poate regăsi o structură din punct de vedere energetic este cea în care valoarea raportului E_{ABS}/E_I este egală cu 1, rezultând că energia seismică de input E_I este egală cu capacitatea de absorbție a energiei seismice E_{ABS} . Deși această condiție este greu de îndeplinit, proiectarea structurilor trebuie să tindă spre această valoare. Evoluția raportului energetic a structurii 1 este prezentată pe intervalul 6 ÷ 35 [s] al cutremurului, care exclude variația monotonă a vibrațiilor induse de cutremur. Se observă că structura de referință are variația cea mai redusă a acestui raport. Valoarea în momentul de vârf de intensitate a cutremurului este 0,113. Structurile contravântuite și rigidizate prin secțiuni transversale

crescute au valori similare, superioare structurii de referință - 0,150 - iar structura cu amortizare adăugată are valoarea maximă – 0,307.

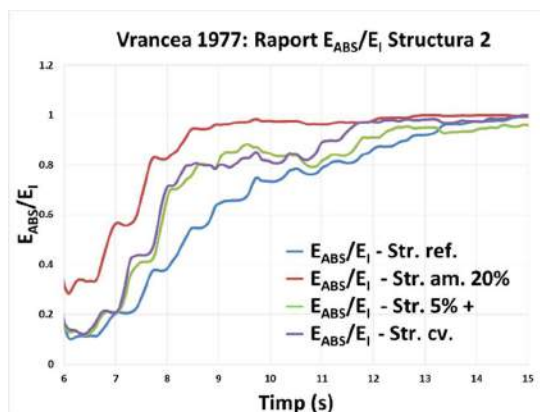


Figura 3.4-2 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 2. Vrancea 1977

Similar structurii 1, cadrul 2 prezintă o variație a raportului capacități de absorbție a energiei – energie seismică de input E_{ABS}/E_I favorabilă variantei cu amortizare adăugată. Pornind de la valoarea raportului cadrului de referință – 0,107 - se observă efectul produs de fiecare dintre cele trei metode de protecție seismică. Prin rigidizarea laterală a structurilor se obțin rezultate apropiate: 0,130 – prin creșterea secțiunilor transversale ale elementelor structurii și 0,142 prin contravântuire. Echiparea cu amortizare adăugată ($\xi=20\%$) conduce la amplificarea considerabilă a capacității de absorbție a energiei induse - 0,284.

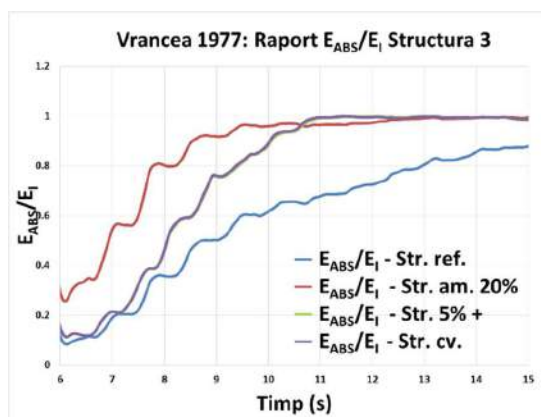


Figura 3.4-3 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 3. Vrancea 1977

Evoluția raportului capacității de absorbție – energie seismică de input E_{ABS}/E_I a structurii 3, acționată seismic de cutremurul Vrancea 1977 este prezentată în Figura 3.4-3 pentru toate cele patru ipostaze. Progresul față de cadrul de referință a structurilor rigidizate lateral, prin echiparea cu un sistem de contravântuiri și cu secțiuni transversale mărite, este considerabilă. Se constată că variația capacității de absorbție a energiei de input a celor două structuri aproape se confundă, valoarea la momentul de vârf, fiind 0,115 – la structura rigidizată

prin secțiuni crescute – și 0,114 – la structura rigidizată prin contravântuiri. Adăugarea unui nivel superior de amortizare conduce la amplificarea raportului E_{ABS}/E_I de la valoarea de referință 0,085 la valoarea 0,255.

Următorul cutremur folosit pentru analiza structurilor cu scopul de a surprinde variația raportului E_{ABS}/E_I este Focșani 1986:

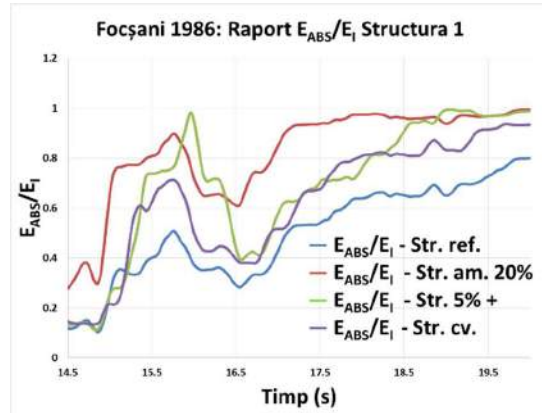


Figura 3.4-4 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 1. Focșani 1986

Situația structurii 1, acționată de cutremurul Focșani 1986 în privința răspunsului seismic energetic reprezentat prin raportul capacității de absorbție a energiei și energia seismică de input E_{ABS}/E_I este similară cu cea a structurilor solicitate de cutremurul Vrancea 1977. Se observă că, prin ridicarea nivelului de amortizare ($\xi=20\%$) variația raportului E_{ABS}/E_I se diferențiază considerabil față de variația structurii de referință cu fracțiunea de amortizare critică de 5%, valorile raportului la momentul de vârf al cutremurului fiind 0,125 (str. ref.), respectiv 0,321 (Str. am. 20%). Celelalte două variante structurale protejate seismic prin rigidizare laterală, prezintă o evoluție sensibilă a capacității de absorbție a energiei induse. Structura rigidizată prin contravântuiri are valoarea 0,135 iar structura cu secțiuni transversale crescute – 0,112.

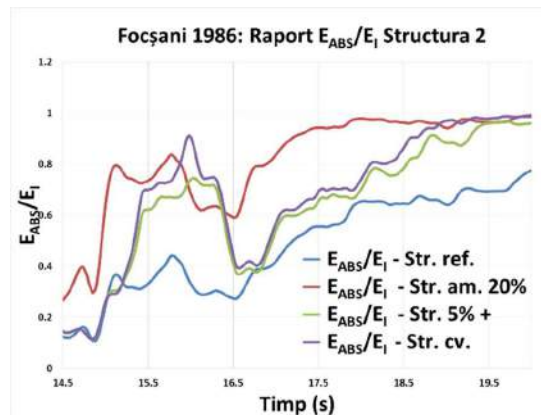


Figura 3.4-5 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 2. Focșani 1986

Evoluția raportului energetic - capacitate de absorbție a energiei / energie seismică de input - E_{ABS}/E_I a structurii 2 acționată seismic prin Focșani 1986 nu se diferențiază foarte mult de cea a structurii 1. Din nou, variația capacității de absorbție a energiei cadrelor rigidizate lateral este superioară cadrului de referință, chiar dacă valorile acestora în momentul de vârf al cutremurului - 0,111 (Str. +) și 0,113 (Str. cv.) - sunt aproape egale cu valoarea structurii de referință - 0,113. Echiparea cu amortizare adăugată conduce la rezultate care se diferențiază vizibil de structura de referință, atât prin variația generală, cât și prin valoarea la momentul de maxim al intensității seismice (14,84 [s]) anume 0,301.

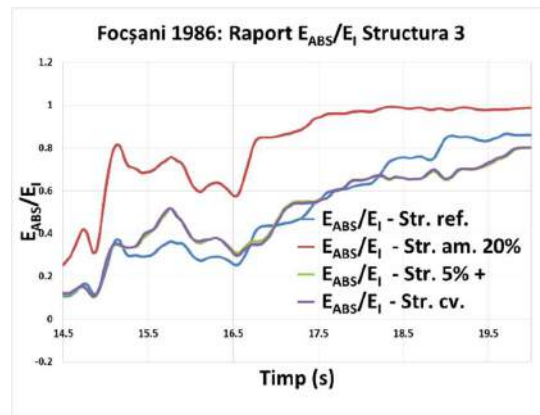


Figura 3.4-6 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 3. Focșani 1986

În urma analizelor seismice a celor patru ipostaze ale structurii 3, se observă eficiența energetică a acestora prin variația raportului E_{ABS}/E_I . În toate cele trei situații de protecție seismică, există un progres față de structura de referință în ceea ce privește evoluția raportului capacității de absorbție energetică – energie de input, dar varianta amortizată suplimentar iese în evidență ca fiind cea mai eficientă metodă. Varianta structurală contravântuită și cea cu rigidizare adăugată prin secțiuni transversale crescute prezintă o variație a raportului E_{ABS}/E_I aproape identică, valorile la momentul de vârf al cutremurului fiind 0,108, respectiv 0,106. Deși în secunda 14,84, valoarea raportului în varianta de referință a structurii este mai mare decât cea a structurilor rigidizate – 0,125 – evoluția generală a capacității de absorbție a acestora (str. cv. și str. +) variază atât negativ cât și pozitiv față de structura de referință, pe intervalul de timp ales. Echiparea cu amortizare adăugată a structurii ($\xi=20\%$) conduce la amplificarea raportului E_{ABS}/E_I la valoarea 0,321.

La fel de relevante, pentru studiul răspunsului energetic al structurilor metalice multi-etajate sunt și rezultatele obținute prin solicitarea structurilor la acțiunea seismică Vrancea 1990:

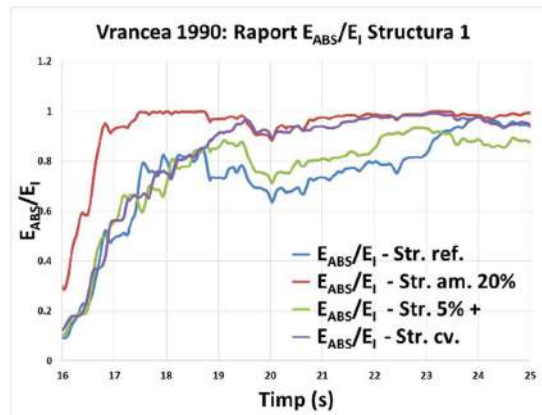


Figura 3.4-7 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 1. Vrancea 1990

Similar structurilor solicitate de cutremurele Vrancea 1977 și Focșani 1986, structurile acționate de Vrancea 1990, prezintă maximul variației capacității de absorbție a energiei induse, în varianta cu amortizare adăugată. Valoarea raportului E_{ABS}/E_I la momentul de vârf a intensității cutremurului (în acest caz 16,03 [s]) se amplifică sensibil, prin rigidizare laterală obținută prin creșterea secțiunilor transversale a elementelor structurii și prin contravântuire – 0,104 respectiv 0,136 - față de valoarea cadrului de referință – 0,091. Prin amortizare adăugată (fracțiunea de amortizare critică egală cu $\xi=20\%$), însă, amplificarea parametrului este considerabilă, valoarea raportului E_{ABS}/E_I fiind egală cu 0,285.

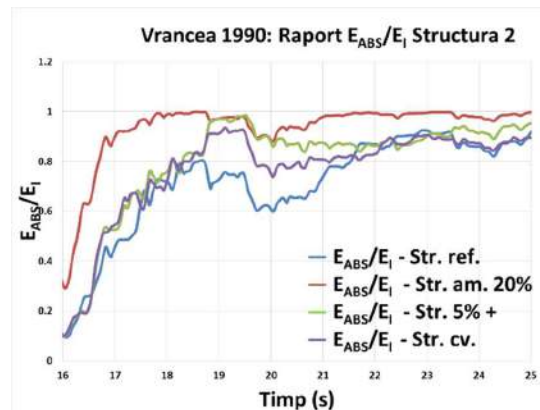


Figura 3.4-8 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 2. Vrancea 1990

Eficiența energetică a structurii 2 în cele patru variante de protecție seismică este evaluată prin capacitatea de absorbție a energiei induse de cutremurul Vrancea 1990. Se constată că variația raportului E_{ABS}/E_I este cea mai redusă în ipostaza de referință – 0,097. Structurile rigidizate lateral, prin secțiuni transversale crescute și prin contravântuiri prezintă valori similare structurii de referință, în momentul de vârf al cutremurului – 0,097, respectiv

0,101. Prin introducerea amortizării adăugate în proporție de 20%, se obține amplificarea acestui raport la valoarea 0,293.

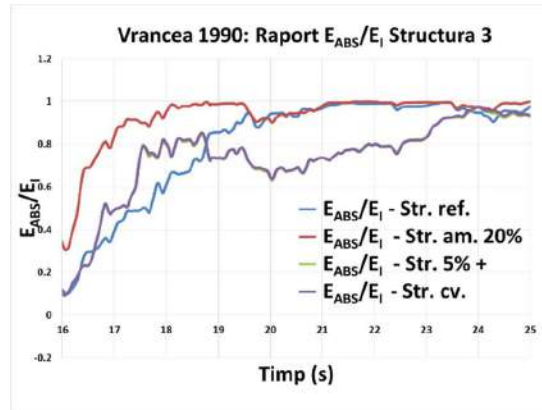


Figura 3.4-9 Raportul E_{ABS}/E_I al structurii 3. Vrancea 1990

În cazul structurii 3 acționată seismic de Vrancea 1990 se constată suprapunerea graficelor raportului E_{ABS}/E_I (capacitate de absorbție a energiei / energie de input) a structurilor rigidizate lateral – prin creșterea secțiunilor transversale ale elementelor stâlp și grindă - și prin contravântuire. La fel și valorile acestora, la vârful de intensitate seismică sunt aproape identice 0,0935 respectiv 0,0934. Variația capacității de absorbție a energiei induse ale acestor două structuri oscilează față de graficul structurii de referință. Valoarea raportului energetic a structurii de referință – 0,109 – este amplificată la 0,316 prin impunerea unui nivel superior de amortizare, caracterizat de fracțiunea de amortizare critică $\xi=20\%$.

Parametrii răspunsului energetic studiați în acest Subcapitol enumără și energia cinetică E_K și cea de deformație elastică E_S , reprezentate în Figurile 3.4-10 ÷ 3.4-27. Primul cutremur studiat pentru suprinderea variației acestor două mărimi este Focșani 1986. Energia cinetică și de deformație elastică sunt prezentate în paralel pentru fiecare din cele 3 structuri:

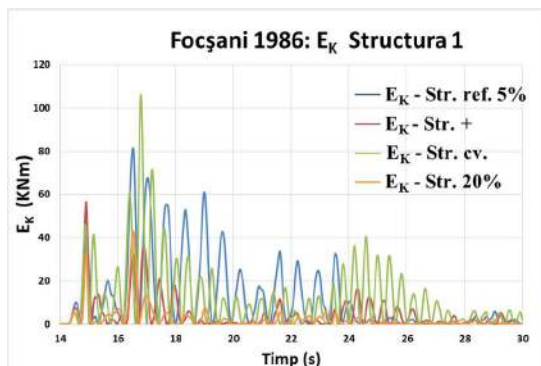


Figura 3.4-10 E_K structura 1 Focșani 1986

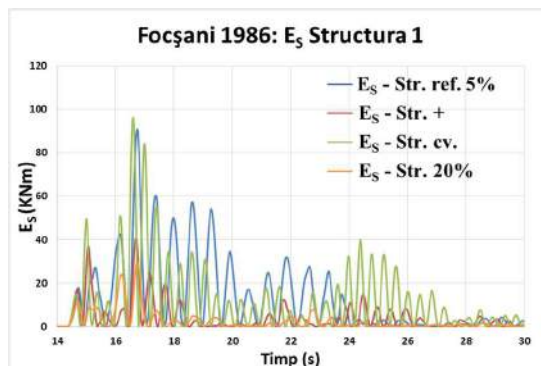


Figura 3.4-11 E_S structura 1. Focșani 1986

Variația celor doi parametri energetici – energia cinetică E_K și energia de deformație elastică E_S - a structurii 1 sunt asemănătoare în ceea ce privește ordonarea maximelor celor

patru ipostaze structurale analizate. Valorile maxime ale energiei cinetice și energiei de deformație elastică sunt înregistrate la structura contravântuită – 106,10, respectiv 96,07 [KNm]. Structura de referință produce rezultatele 81,45 (E_K), respectiv 90,80 (E_S) [KNm], valorile acestea fiind reduse prin rigidizare laterală cu secțiuni transversale crescute – 56,57 și 40, 64 [KNm] – și prin amortizare adăugată ($\xi=20\%$) – 42,93, repsectiv 29,55 [KNm].

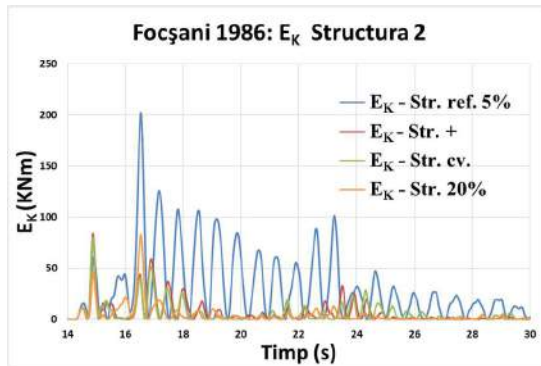


Figura 3.4-12 E_K structura 2 Focșani 1986

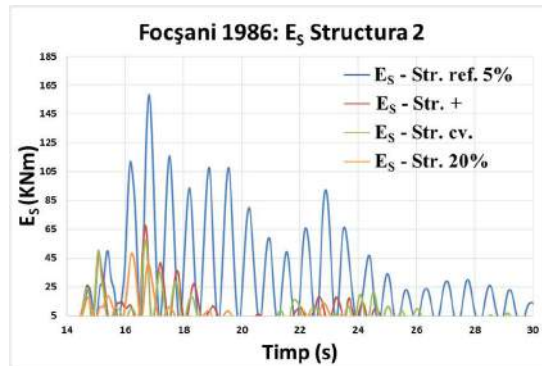


Figura 3.4-13 E_S structura 2. Focșani 1986

A doua structură studiată pentru determinarea valorilor energiei cinetice E_K și a energiei de deformație elastică E_S , este structura 2, cu 9 niveluri. Se observă în cazul acestei structuri că valorile parametrilor energetici a structurii de referință sunt mai mari decât pentru celelalte variante structurale – 202,71 (E_K), respectiv 158,46 (E_S) [KNm]. Aceasta este urmată de structura rigidizată – 83,93, respectiv 67,44 [KNm] - iar structura cu amortizare adăugată prezintă valori similare, cel puțin în ceea ce privește energia cinetică – 83,15 [KNm]. Variația energiei cinetice a structurii contravântuite – 80,57 [KNm] - este cea mai redusă, dar la o diferență mică față de cadrele rigidizate prin secțiuni crescute și prin amortizare adăugată. Energia de deformație elastică a cadrului contravântuit, atinge valoarea 57,28 [KNm], superioară numeric celei înregistrate de cadrul cu amortizare adăugată – 48,18 [KNm].

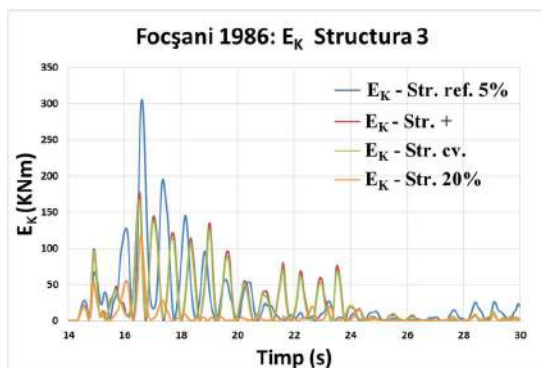


Figura 3.4-14 E_K structura 3 Focșani 1986

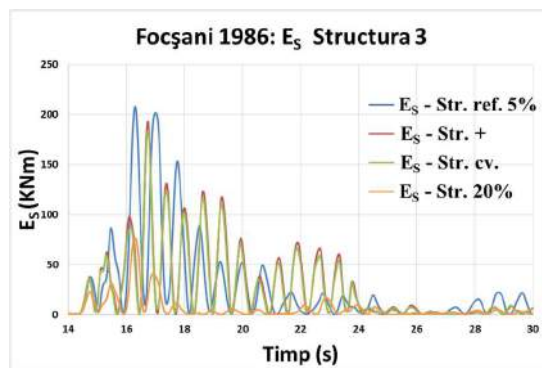


Figura 3.4-15 E_S structura 3. Focșani 1986

În cazul structurii 3 solicitată de acțiunea seismică Focșani 1986, valorile maxime ale energiei cinetice E_K și celei de deformație elastică E_S sunt înregistrate de cadrul de referință –

305,81, respectiv 208,17 [KNm] - acesta fiind urmat de cadrul cu rigidizare suplimentară prin secțiuni transversale crescute – 176,98 și 192,98 [KNm]. Structura cu amortizare adăugată are valorile minime ale acestor parametri energetici – 118,57 (E_K), respectiv 76,82 (E_S) [KNm] – în timp ce structura contravântuită are o variație a energiei cinetice redusă- 167,51 [KNm], iar a energiei de deformație elastică asemănătoare structurii rigidizate prin secțiuni crescute – 183,80 [KNm].

În continuare sunt reprezentate graficele variației energiei cinetice E_K și energiei de deformație elastică E_S , rezultate prin solicitarea structurilor la acțiunea seismică Vrancea 1977:

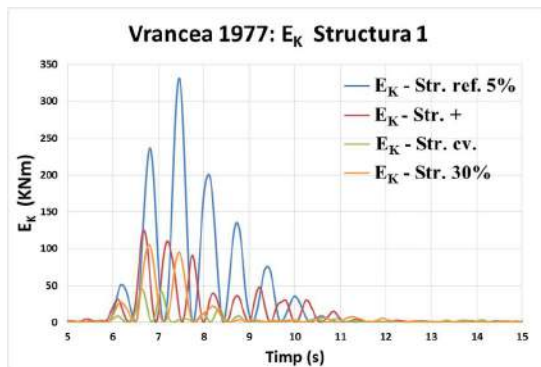


Figura 3.4-16 E_K structura 1. Vrancea 1977

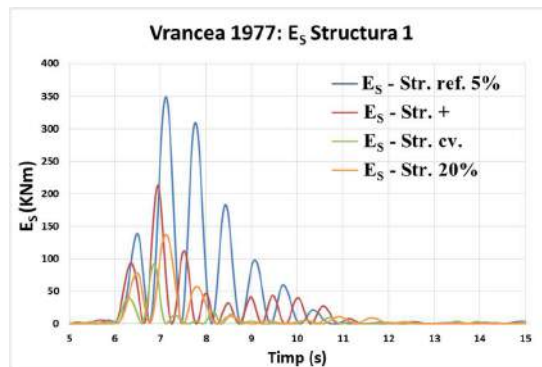


Figura 3.4-17 E_S structura 1. Vrancea 1977

Prima structură analizată seismic prin accelerograma Vrancea 1977, prezintă variații ale energiei cinetice E_K și a energiei de deformație elastică E_S , minime în ipostazele rigidizate lateral. Valorile maxime $E_K - E_S$, ale structurii de referință - 331,69 – 348,94 [KNm] - sunt reduse prin amortizare adăugată ($\xi=20\%$) la 105,64 – 137,06 [KNm], și prin echiparea cu rigidizare laterală prin creșterea secțiunilor transversale ale elementelor stâlp și grindă - 124,61, respectiv 212,78 [KNm]. Prin contravântuire, însă, reducerea parametrilor energetici este mai considerabilă, valorile obținute în această ipostază fiind: 45,58 (E_K) – 91,64 (E_S) [KNm].

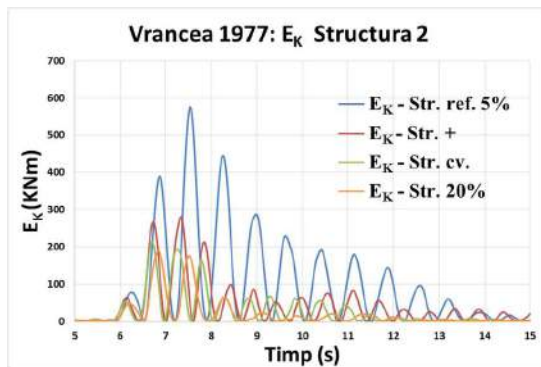


Figura 3.4-18 E_K structura 2. Vrancea 1977

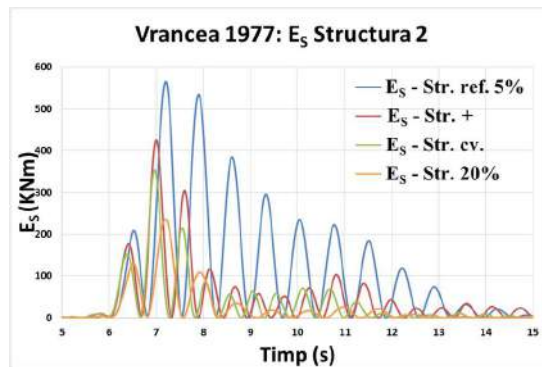


Figura 3.4-19 E_S structura 2. Vrancea 1977

În Figura 3.4-18 și Figura 3.4-19 este prezentată variația energiei cinetice E_K și a energiei de deformație elastică E_S a structurii 2 supusă la acțiunea seismică Vrancea 1977. Această structură înregistrează maximul celor doi parametri energetici în varianta de referință – 576,58 (E_K), respectiv 565,42 (E_S) [KNm]. Se constată că relația dintre cele două mărimi E_K și E_S se modifică de la o variantă structurală la alta. Astfel, în cazul ipostazei rigidizate prin secțiuni transversale crescute, valoarea maximă a energiei de deformație elastică - 425,50 [KNm] - este mai mare decât cea a energiei cinetice – 280,51 [KNm]. Similar, și structura contravântuită prezintă o capacitate de deformație elastică crescută, valorile celor doi parametri E_K și E_S fiind 213,40, respectiv 353,33 [KNm]. Variația minimă, însă, este înregistrată de cadrul cu amortizare adăugată – 189,73 (E_K) și 236,08 (E_S) [KNm].

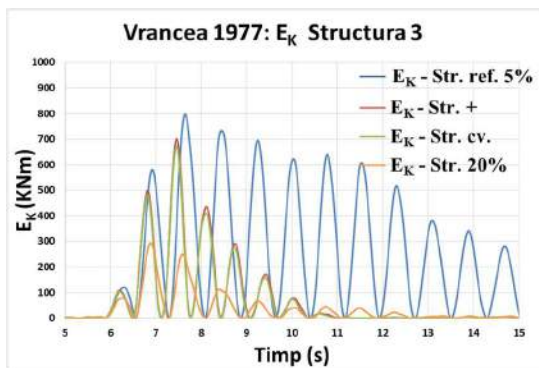


Figura 3.4-20 E_K structura 3. Vrancea 1977

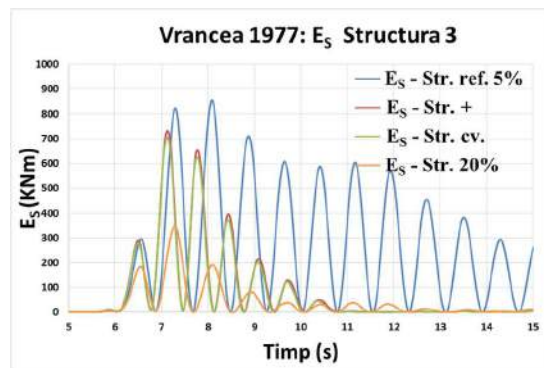


Figura 3.4-21 E_S structura 3. Vrancea 1977

În cazul structurii 3, cu 12 niveluri variația celor doi parametri energetici – energia cinetică E_K și energia de deformație elastică E_S – se amplifică față de structura 1 și 2. Valorile maxime ale parametrilor energetici a structurii de referință – 797,65 (E_K), respectiv 855,06 (E_S) [KNm] – sunt din nou, cele mai mari. Valorile structurii cu contravântuiri – 672,78 (E_K) și 706,29 (E_S) [KNm] - și a celei rigidizate prin secțiuni crescute – 702,27 (E_K), respectiv 730,76 (E_S) [KNm] - urmează, fiind foarte apropiate. În ceea ce privește structura amortizată suplimentar, aceasta prezintă variația minimă a acestor parametri – 293,19 (E_K), respectiv 348,05 (E_S) [KNm].

A treia accelerogramă folosită pentru surpinderea efectului diferitelor metode de protejare seismică, asupra răspunsului energetic al structurii este Vrancea 1990:

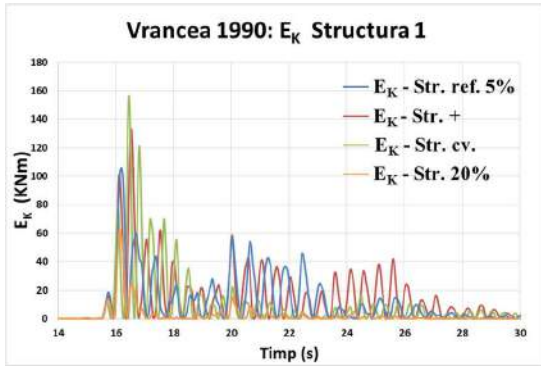


Figura 3.4-22 E_K structura 1. Vrancea 1990

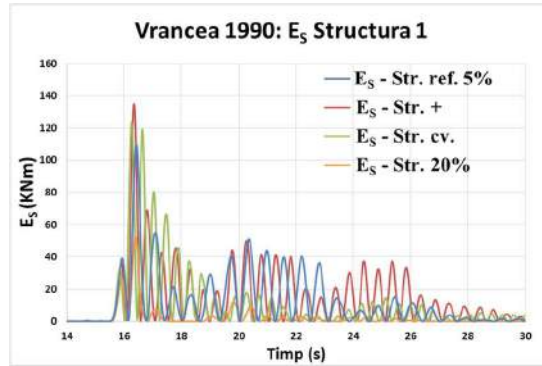


Figura 3.4-23 E_S structura 1. Vrancea 1990

Variația celor doi parametri energetici E_K și E_S a structurii 1 este diferită în ceea ce privește ordinea maximelor atinse de variantele structurale. De această dată, structurile rigidizate lateral înregistrează mărimile cele mai mari dintre cele patru ipostaze structurale – structura contravântuită în cazul energiei cinetice (156,28 [kNm]) și structura cu secțiuni transversale crescute în cazul energiei de deformație elastică (134,92 [kNm]). Structura de referință produce valorile ale E_K și E_S egale cu 105,87, respectiv 109,92 [kNm], valori reduse prin echiparea cu amortizare adăugată la 62,66, respectiv 52,22 [kNm].

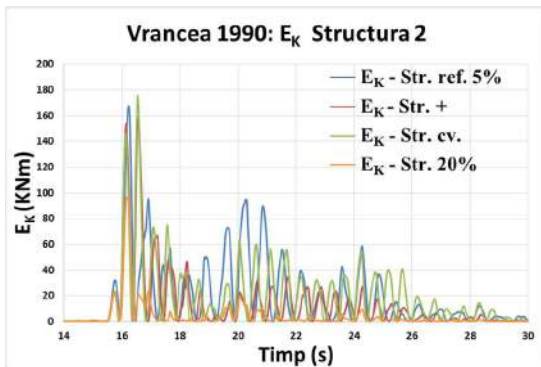


Figura 3.4-24 E_K structura 2. Vrancea 1990

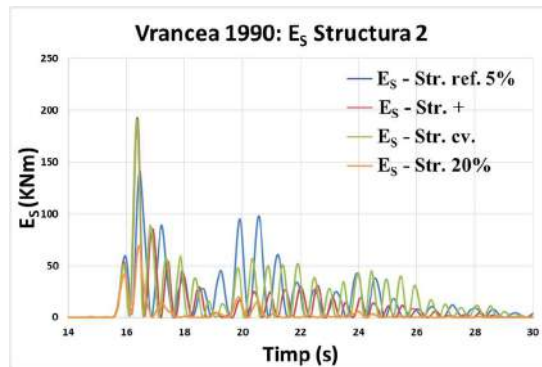


Figura 3.4-25 E_S structura 2. Vrancea 1990

Variația energiei cinetice și a energiei de deformație elastică a structurii 2, cu 9 niveluri este reprezentată în Figura 3.4-24, respectiv 3.4-25. Energia cinetică E_K a primei structurii atinge valorile maxime în varianta contravântuită – 175,62 [kNm] - această fiind urmată de structura de referință – 167,44 [kNm] - și de structura rigidizată prin secțiuni transversale crescute – 158,07 [kNm], varianta amortizată suplimentar având valoarea cea mai redusă – 96,73 [kNm]. Energia de deformație elastică E_S clasifică ipostazele structurale diferit. Astfel, maximul acestui parametru este înregistrat de structura rigidizată prin secțiuni transversale crescute – 193,07 [kNm] - următoarea ca valoare fiind maximul structurii contravântuite –

190,63 [KNm]. Valoarea minimă este produsă de structura cu amortizare adăugată – 69,46 [KNm].

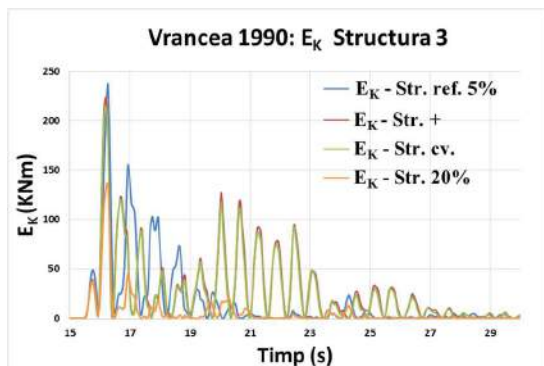


Figura 3.4-26 E_K structura 3. Vrancea 1990

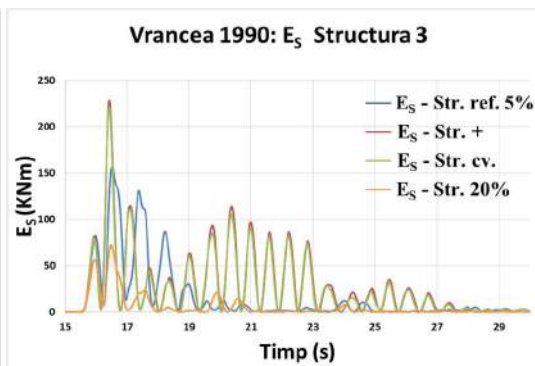


Figura 3.4-27 E_S structura 3. Vrancea 1990

Variația celor doi parametri energetici – energia cinetică E_K și energia de deformație elastică E_S – este la fel de relevantă pentru surprinderea răspunsului seismic al structurii 3, cu 12 niveluri. Valoarea maximă a energiei cinetice este atinsă de structura de referință- 237,50 [KNm] - urmată de structurile rigidizate lateral prin secțiuni transversale crescute – 223,87 [KNm] - și prin contravântuire – 214,78 [KNm]. Energia de deformație elastică maximă, însă, este produsă de structura rigidizată prin secțiuni transversale crescute – 228,41 [KNm] - iar valoarea aceasta este aproape egală cu maximum structurii contravântuite – 221,72 [KNm]. Prin amortizare adăugată ($\xi=20\%$) este redusă energia de deformație elastică de la valoarea de referință – 156,53 [KNm] - la 72,54 [KNm].

3.5 Coeficientul de modificare a capacității de absorbție energetică

Opțiunile duale rigiditate laterală versus amortizare adăugată în activitatea de concepere și dimensionare a structurilor metalice multi-etajate amplasate în zone seismice trebuie exprimate parametric pentru a se constitui în instrumente practice consistente. În dezvoltările cuprinse în acest Capitol, conceptul de capacitate de absorbție energetică a fost asociat cu cele două opțiuni. Starea de rigiditate laterală și, respectiv, de amortizare adăugată au fost, apoi, comparate și echivalate din punct de vedere al tradiționalului criteriu al deplasărilor (relative) și din punct de vedere al criteriului energetic (capacitate de absorbție energetică) propus. Adoptarea unei abordări energetice atât ca bază de proiectare seismică a structurilor necesită definirea și dezvoltarea unui criteriu – căruia să i se poată asocia valori numerice – care să exprime variația capacității de absorbție energetică în funcție de starea de amortizare și, respectiv, starea de rigiditate. Evaluarea reducerii răspunsului seismic prin sisteme de protecție

anti-seismică este un demers frecvent folosit și raportat în literatura de specialitate [92], [93], [94], [95], [78]. O generalizare a posibilității de exprimare a efectului amortizării adăugate o constituie raportul valorilor unei componente a răspunsului seismic asociată amortizării adăugate și, respectiv unei stări de amortizare de referință [96]. O formă a acestui raport pentru două niveluri de amortizare de 10% (amortizare adăugată) și 5% (nivel de referință) este:

$$R_{\zeta} = \frac{R_s(\xi = 10\%)}{R_s(\xi = 5\%)} \quad (3.5.1)$$

Unde R_{ζ} este coeficientul de reducere a răspunsului seismic iar R_s componenta răspunsului seismic. De exemplu – deplasări relative de nivel, forța tăietoare seismică de bază, etc. În general, se propune raportul dintre valoarea unei componente (statică, cinematică, energetică) a răspunsului seismic al structurii echipate cu un sistem de protecție anti-seismică și valoarea aceleiași componente asociate structurii de referință. Variația acestui raport în funcție de echiparea (cu sistem de protecție anti-seismică) structurii oferă proiectantului un instrument simplu și util de pre-dimensionare a viitoarei structurii.

Dar, exprimarea reducerii răspunsului seismic în funcție de sistemul anti-seismic de echipare, adică eficiența unui astfel de sistem, poate și trebuie să includă două aspecte: reducerea valorică a parametrului care exprimă răspunsul seismic, și în același timp, reducerea intervalului (duratei) de timp în care răspunsul seismic este activ.

În acest context, evaluarea capacității de absorbție energetică prin amortizare adăugată servește obiectivului propus de comparare a efectelor rigidizării cu cele ale amortizării. Acest demers necesită, la rândul său, definirea unui astfel de parametru pentru evaluarea aportului rigidității laterale la capacitatea de absorbție energetică. În literatura sunt raportate astfel de cuantificări ale stării energetice. Cele mai multe se referă la cuantificarea – pe baze energetice – a stării de degradare prin plastificarea secțiunilor. Iată câteva forme ale unor parametri energetici propuși pentru cuantificarea cantității de energie absorbită prin deformări plastice [84], [86], [87], [88], [85], [89], [90], [91]. Cuantificarea stării mecanice a unei structuri acționate seismic este un demers cu o istorie lungă și cu forme de exprimare variate.

- **Scurt istoric al exprimării stării mecanice a unei structuri acționate seismic**

A devenit o practică în activitatea de proiectare a structurilor ca starea mecanică indusă seismic să fie exprimată prin parametri statici, cinematici și, recent, de ductilitate. Un astfel de parametru, foarte popular, este raportul dintre deplasarea laterală de nivel și înălțimea nivelului – deplasarea relativă [6], [22], [8]. Direcția nouă – starea de ductilitate - de exprimare a stării mecanice indusă seismic folosește parametri asociați deformărilor remanente (plastice) pentru a compara performanțele seismice ale structurilor (proiectate sau existente) amplasate în zone

seismice [97], [98], [99], [100], [101], [102], [103]. Extinderea evaluării performanțelor seismice asupra structurilor existente a necesitat definirea unor parametri mecanici, care să exprime starea de degradare post-seism a acestor structuri. Exprimarea stării de degradare a fost inițial, conexată stării de rigiditate. Astfel au fost propuși – pentru exprimarea stării de degradare - parametri care, de fapt, exprimă degradarea rigidității (mai ales laterale) structurii [104], [105], [106]. Forma acestor indici de degradare a evoluat de la exprimarea unei stări (de degradare) instantanee la exprimarea efectului cumulativ de degradare. În această dezvoltare analitică a exprimării stării de degradare, „implicarea” unor componente energetice într-un astfel de demers a constituit o etapă firească și necesară. Cea mai folosită componentă energetică în exprimarea stării de degradare a structurilor (existente sau proiectate) este energia $E_{S,h}$ disipată exclusiv prin deformări plastice [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117], [86], [118]. Puterea acestor parametri de a cuprinde și de a exprima starea de degradare post-seism cumulată a condus chiar la propuneri de normare prin *spectre de degradare* a acestei stări [86]. Energia seismică de input precum și energia disipată de structură în timpul acțiunii seismice au, ambele, un caracter cumulativ atât în timp cât și din punct de vedere al componentelor structurale și nestructurale. Forma analitică scalară a energiei seismice de input și a energiei disipate de structură, caracterul cumulativ al acestor componente energetice precum și posibilitatea includerii în energia disipată a cantității $E_{S,h}$ de energie absorbită în secțiunile plastificate, sunt aspectele care au condus la popularitatea posibilității de definire a stării de degradare în forme energetice. Faptul că energia $E_{S,h}$ care poate fi disipată prin deformații plastice are o pondere mare în cantitatea totală de energie disipată a condus la exprimarea capacității de absorbție energetică a unei structuri exclusiv prin cantitatea $E_{S,h}$.

Referitor la exprimarea stării de degradare prin utilizarea unor componente energetice, o propunere larg acceptată care combină starea cinematică cu starea energetică are forma:

$$D = \frac{\delta}{\delta_u} + \beta \frac{E_{S,h}}{L_h} \quad (3.5.2)$$

(Park și Ang) [119] în care δ și δ_u se referă la starea de deplasări laterale (indusă și ultimă), coeficientul $\beta=0,025$ pentru structuri de oțel, $E_{S,h}$ este energia disipată prin deformații plastice iar L_h este lucrul mecanic efectuat prin deformațiile plastice. Valorile numerice ale indicelui de degradare D , definesc aceasta degradare. De exemplu domeniul $D \leq 0,4$ definește o stare de degradare reparabilă, intervalul $D = (0,4 \div 1,0)$ exprimă o stare de degradare nereparabilă, iar $D \geq 1,0$ înseamnă o stare de colaps [88].

O altă categorie, relativ largă, de forme ale indicilor de degradare utilizează valori normalizate $E_{S,h}/E_I$ ale energiei disipate prin deformații plastice induse seismic [90], [84]: $D =$

$E_{S,n}/E_I$. Într-o astfel de abordare, valoarea $D = 1,0$ corespunde, din nou, stării de colaps a structurii. În general indicii asociați stării de degradare exprimă o stare mecanică (statică, cinematică, de ductilitate, energetică) curentă, indusă seismic, raportată la starea mecanică respectivă ultimă / admisibilă. Cuprinderea în structura indicilor de degradare a unor parametri asociați stării mecanice ultime conferă acestor indici un caracter general prin posibilitatea utilizării indicilor atât în evaluarea stării de degradare post-seism cât și în activitatea de proiectare a structurilor amplasate în zone seismice. Această posibilitate – de folosire a indicelui de degradare în activitatea de proiectare – constituie un prim pas pentru echiparea structurii proiectate cu o capacitate adecvată de absorbție a energiei.

Recent, semnificația indicilor care exprimă starea de degradare a fost extinsă prin includerea în astfel de indici a eficienței amortizării adăugate

Toate propunerile referitoare la indici de degradare implică considerarea comportării exclusiv în domeniul post-elastic. Cum poate fi, atunci, cuantificată starea energetică a unei structuri acționată seismic și având o comportare exclusiv în domeniul elastic? În răspunsul la această întrebare rezidă exprimarea propusă în teză a capacității de absorbție energetică E_{ABS} a structurii. Dar, starea energetică nu poate fi cuprinsă doar în capacitatea de absorbție E_{ABS} având în vedere că și cantitatea de energie E_I indusă structurii se modifică odată cu E_{ABS} .

În aceste condiții, parametrul C_a propus poate exprima mai fidel variația stării energetice în raport cu acțiunea seismică și, în același timp, cu starea de rigiditate / amortizare a structurii. Coeficientul de modificare a capacității de absorbție energetică prin amortizare C_a propus are forma:

$$C_a = \frac{E_{ABS/a}}{E_{I/a}} \quad (3.5.3)$$

Iar coeficientul de modificare a capacității de absorbție energetică prin rigidizare C_r propus este:

$$C_r = \frac{E_{ABS/r}}{E_{I/r}} \quad (1.5.4)$$

În expresiile de mai sus sunt cuprinși următorii parametri:

$E_{ABS/a}$ – capacitatea de absorbție energetică a structurii cu amortizare adăugată

$E_{I/a}$ – energia de input seismic a structurii cu amortizare adăugată

$E_{ABS/r}$ - capacitatea de absorbție energetică a structurii rigidizate

$E_{I/r}$ - energia de input seismic a structurii rigidizate

Variația acestor coeficienți de modificare a capacității de absorbție energetică cu starea de rigiditate și, respectiv, cu starea de amortizare exprimă direct și simplu, efectul rigidizării

laterale și, respectiv a amortizării adăugate asupra capacității de absorbție a energiei seismice induse structurii (Fig. 3.5-1 ÷ 3.5-3). Valorile E_{ABS} și E_I au fost considerate la vârful maxim de intensitate a acțiunii seismice, identificate la secunda 6,08, secunda 14,84 și secunda 16,03 a celor trei acțiuni seismice: Vrancea 1977, Focșani 1986 și, respectiv Vrancea 1990. Ultimele două accelerograme sunt scalate la valoarea 0,24g a accelerației terenului. Dacă în cazul parametrului C_a , obținut prin impunerea diferitelor niveluri de amortizare critică aceleași structuri, reprezentarea variației nu necesită explicații suplimentare, variația C_r este însoțită de simbolurile laterale care semnalează valorile rigidității pentru fiecare variantă structurală – structura de referință, structura rigidizată în varianta I (Str. A+, B+ și C+), structura rigidizată în varianta II (Str. +) și structura contravântuită. Semnificația structurii de referință și a celei contravântuite este ușor de intuit, și identificat în studiile numerice din Capitolele și Subcapitolele precedente. Cele două variante rigidizate, însă, sunt cadrele rigidizate prin secțiuni transversale crescute, utilizate în analizele numerice anterioare și ulterioare (subcapitolul 4.3).

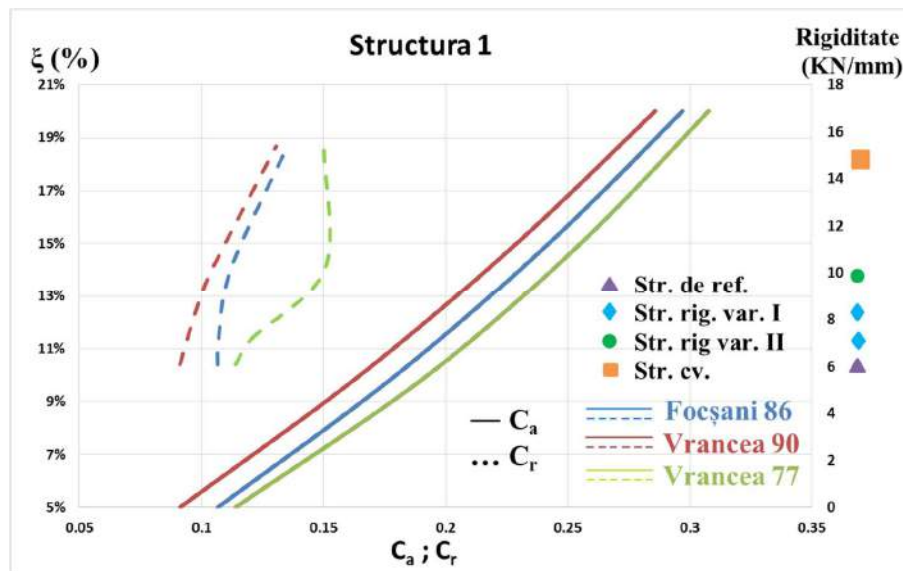


Figura 3.5-1 C_a și C_r a structurii 1 acționată seismic prin Focșani 86, Vrancea 90 și Vrancea 77

Primul grafic reprezintă variația celor doi coeficienți a capacității de absorbție a energiei - C_a prin amortizare și C_r prin rigidizare – pentru structura 1 cu 5 deschideri și 6 niveluri. Construcția reprezentărilor acestor coeficienți prezintă ambele variații - C_a și C_r , pentru toate cele 3 acțiuni seismice studiate în teză, anume: Vrancea 1977, Focșani 1986 și Vrancea 1990. În primul rând se observă dependența capacității de absorbție energetică de ζ – fracțiunea de amortizare critică, - respectiv rigiditate. Diferența dintre cei doi parametri propuși se manifestă

prin ritmul cu care aceștia variază pe măsură ce factorul determinant (amortizarea / rigiditatea) crește. În cazul coeficientului C_r , variația este bruscă și restrânsă pe un interval mic, rezultând astfel, valori mici ale raportului energetic. Efectul creșterii fracțiunii de amortizare, însă, este de amplificare a parametrului C_a într-un ritm proporțional cu ridicarea nivelului de amortizare.

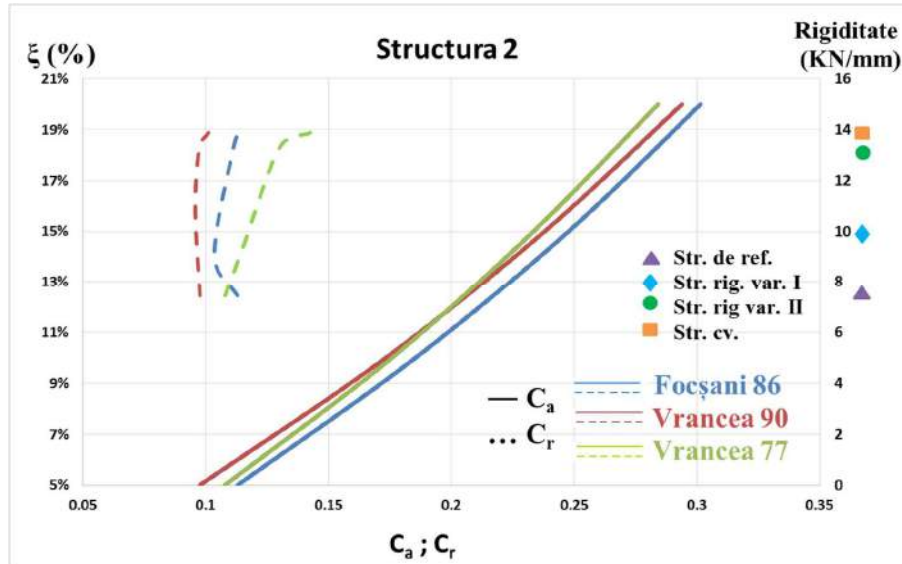


Figura 3.5-2 C_a și C_r a structurii 2 acționată seismic prin Focșani 86, Vrancea 90 și Vrancea 77

Evoluția parametrilor propuși este surprinsă și pentru structura 2, cu 5 deschideri și 9 niveluri, acționată de cele trei cutremure menționate anterior. Influența amortizării adăugate asupra răspunsului energetic, este evident pozitivă, în diferite măsuri în funcție de acțiunea seismică la care este supusă structura. Rigiditatea laterală suplimentară, însă, nu se dovedește a avea întotdeauna un efect pozitiv asupra capacității de absorbție energetică a structurii. În cazul cadrelor solicitate seismic de cutremurele Vrancea 1990 și Focșani 1986, variația coeficientului C_r este aproape inexistentă. Structura acționată seismic prin Vrancea 1977, este singura care prezintă amplificarea capacității de absorbție a energiei induse. Intervalul de creștere, însă, este limitat, reprezentând doar o fracțiune restrânsă față de cel parcurs de coeficientul de modificare a capacității de absorbție energetică prin amortizare C_a .

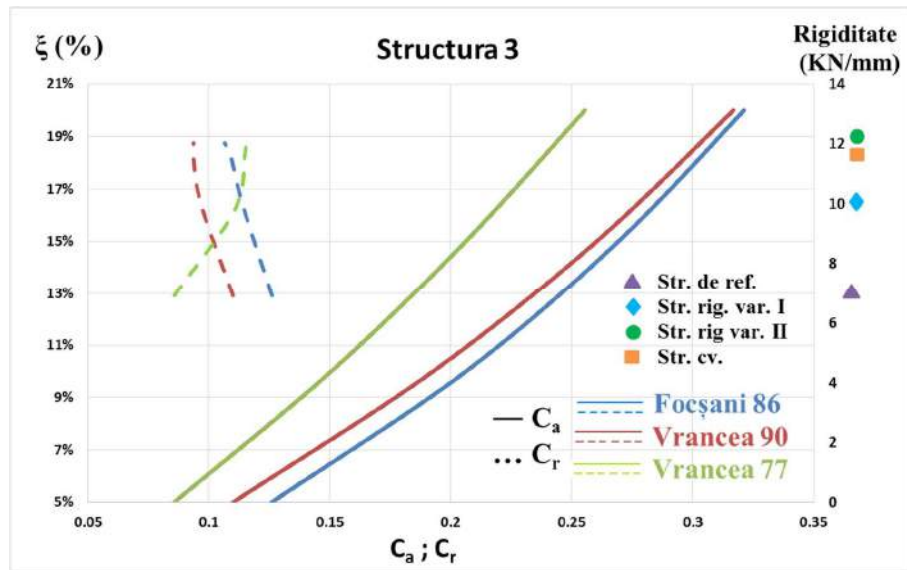


Figura 3.5-3 C_a și C_r a structurii 3 acționată seismic prin Focșani 86, Vrancea 90 și Vrancea 77

Ultima structură studiată pentru obținerea variației coeficienților C_a și C_r , prin care se analizează modificarea capacității de absorbție a energiei prin amortizare adăugată, respectiv prin rigidizare, este structura 3, cu 5 deschideri și 12 niveluri. Dacă parametrul C_a prezintă o evoluție similară celorlalte structuri – crește odată cu ridicarea nivelului de amortizare – coeficientul C_r indică o reducere a capacității de absorbție energetică a structurilor rigidizate, în cazul acțiunilor seismice Focșani 1986 și Vrancea 1990. Structurile rigidizate supuse la cutremurul Vrancea 1977 prezintă un progres modest al raportului energetic reprezentat de coeficientul C_r , infim, însă, în comparație cu progresul realizat prin amortizare adăugată. Este evidentă din nou, dependența răspunsului energetic de cutremur, valorile parametrului C_a fiind vizibil reduse în cazul structurilor acționate de Vrancea 1977. Se relevă versatilitatea parametrului propus C_a/C_r pentru evaluarea capacității de absorbție energetică. Prin urmare se poate afirma că parametrul propus decelează clar influența amortizării vs. influența rigidizării în proiectarea anti-seismică a structurilor metalice multi-etajate.

Îndeplinirea obiectivelor Capitolului 3. Obiectivul principal enunțat pentru Capitolul 3 al tezei de doctorat este prezentarea și dezvoltarea conceptului de capacitate de absorbție energetică asociat structurilor metalice multi-etajate în contextul dualității rigiditate - amortizare adăugată. Premergător definirii conceptului de capacitate de absorbție, se elaborează un cadru energetic pentru structurile multi-etajate acționate seismic prin definirea bilanțului energetic și a componentelor sale. Evidențierea efectelor rezultate prin suplimentarea rigidității laterale sau a amortizării adăugate s-a realizat prin studiile numerice comparative:

capacitate de absorbție energetică versus rigiditate laterală și capacitate de absorbție energetică versus amortizare adăugată. Cele 54 de analize seismice realizate în Capitolul 2 sunt reluate pentru determinarea parametrilor energetici: capacitatea de absorbție a energiei induse E_{ABS}/E_I , energia cinetică E_K și energia de deformație elastică $E_{S,e}$. Coeficientul de modificare a capacității de absorbție a energiei propus (C_a – prin amortizare adăugată și C_r – prin rigidizare laterală) este explicat prin reprezentări grafice a variației acestuia pentru cele trei structuri studiate, în toate ipostazele structurale. Maniera comparativă și sugestivă a expunerii celor doi coeficienți conduce la înțelegerea aprofundată a implicațiilor rigidității laterale / amortizării adăugate. Comentariile și concluziile aferente sunt redată în continuarea rezultatelor grafice obținute.

Capitolul 4. Dualitatea rigidizare versus amortizare

Proiectarea structurilor amplasate în zone seismice a fost și este guvernată de două aspecte care se cer îndeplinite simultan:

- asigurarea unei stări de rezistență adecvate care să consolideze continuitatea post-seism din punct de vedere funcțional, structural și arhitectural a construcției;
- eficiența economică a soluției constructive adoptate

Starea de rezistență – așa cum este evocată mai sus – este un concept complex care trebuie definit și abordat din mai multe puncte de vedere:

- al stării statice de eforturi (secționale și unitare);
- al stării cinematice (deplasări și deformații);
- al stării de stabilitate (generală și locală);
- al stării de ductilitate (comportare post-elastică);
- al stării energetice (capacitate de absorbție a energiei seismice).

Istoria proiectării structurilor acționate seismic evidențiază că aceste stări au fost incluse și normate succesiv și că stările nou-venite nu au substituit stările existente ci s-au adăugat acestora. Starea de ductilitate, de exemplu, este un concept relativ nou, pe deplin elaborat în normele de proiectare în vigoare, dar absent – în mare măsură – în normele de proiectare precedente. În același timp, asigurarea stării cinematice impune respectarea unor valori limitate ale deplasărilor relative de nivel. Respectarea prevederilor referitoare la deplasările relative de nivel implică încă apelul la starea de rigiditate. Dezbateră pe această temă a *rigidității excesive* este prezentă în comunitatea profesională a inginerilor și cercetătorilor din domeniul proiectării structurilor amplasate în zone seismice. Amortizarea adăugată poate rezolva, cel puțin din punct de vedere tehnic, respectarea prevederilor limitative referitoare la deplasările relative de nivel. Cu toate acestea, normele de proiectare în vigoare nu acceptă „reduceri” ale prevederilor (de armare, de exemplu) în ceea ce privește alcătuirea în secțiune a elementelor (stâlpi, grinzi) structurale chiar dacă printr-o echipare de protecție seismică sunt asigurate valorile deplasărilor relative de nivel.

În ceea ce privește aspectul economic al influenței în costurile asociate a opțiunii pentru rigidizare sau pentru echiparea cu un sistem de reducere a răspunsului seismic, studiile trebuie să includă atât componenta de investiții a costurilor rigidizării, respectiv a amortizării, cât și costurile de mentenanță asociate mai ales sistemului de amortizare. Autorul tezei subliniază faptul că studiile având ca tematică **rigidizare vs. amortizare** nu pot conduce la concluzii

unice nici în ceea ce privește costurile asociate uneia sau alteia dintre aceste două opțiuni și nici în ceea ce privește răspunsul seismic. Ambele aceste aspecte (eficiența economică / răspuns seismic) trebuie asociate atât structurii cât și amplasamentului (acțiunii seismice de proiectare). Studiul cuprins în teza de doctorat oferă un instrument analitic pentru o astfel de evaluare.

În acest Capitol 4, autorul tezei propune și dezvoltă câteva obiective:

- Compararea efectelor rigidității laterale și a amortizării adăugate asupra răspunsului seismic al structurii exprimat atât în termeni tradiționali (deplasări laterale, forțe tăietoare seismice de bază) cât și în termeni (propuși în teză) energetici. În primul rând, în termeni care includ capacitatea de absorbție energetică a structurii;
- Exprimarea și compararea în termeni economici a efectelor rigidizării laterale și amortizării adăugate. Acest obiectiv necesită o scurtă incursiune în consumuri materiale asociate structurii (din oțel, multi-etajată, cu amortizare inerentă și adăugată) și în exprimarea eficienței economice a unei astfel de structurii.
- Echivalarea rigidității laterale cu amortizarea adăugată. Autorul propune două criterii pentru echivalarea stării de rigiditate laterală cu starea de amortizare adăugată:
 1. criteriul deplasărilor laterale relative de nivel și
 2. criteriul capacității de absorbție energetică.

4.1 Rigiditate vs. amortizare în răspunsul seismic

Efectele (cinematice mai ales) ale rigidizării / amortizării depind, de asemenea, de specificitatea seismică a amplasamentului, de numărul de niveluri ale structurii și de nivelul de performanță avut în vedere. Dacă eficiența economică se reduce, în final, la costuri, evaluarea răspunsului seismic se poate conduce numai pe componente (statice, cinematice, energetice) ale acestuia. În mod tradițional, evaluarea răspunsului seismic implică parametri statici și cinematici și – recent parametri energetici [78], [120], [93], [96]. În acest subcapitol, dualitatea rigidizare vs. amortizare, este condusă prin evidențierea variației a doi parametri importanți:

- deplasări laterale (absolute) ale ultimului nivel și, respectiv
- forța tăietoare seismică de bază.

4.1.1 Gradarea rigidității laterale

Câteva rezultate referitoare la deplasările laterale ale ultimului nivel induse unui set de trei structuri de un cutremur sinusoidal, evidențiază simultan dependența eficienței rigidizării

și a amortizării adăugate (Fig. 4.1-1 ÷ 4.1-3). Se constată că pentru o structură de mică înălțime (6 niveluri), eficiența rigidizării (prin contravântuiri, prin creșterea secțiunilor) și, respectiv a amortizării adăugate este gradată foarte distinct în intervalul de regim tranzitoriu (deplasarea laterală a ultimului nivel este cca. 80% din deplasarea structurii de referință) și se estompează în regimul de vibrație stabilizat. În regim stabilizat, rigidizarea și amortizarea au un efect cvasi-identific, în timp ce o amortizare adăugată având fracțiunea de amortizare critică de 10% (un nivel mare de amortizare adăugată) conduce la o deplasare laterală având valoarea de cca. 80% din cea a structurii de referință (Fig. 4.1-1).

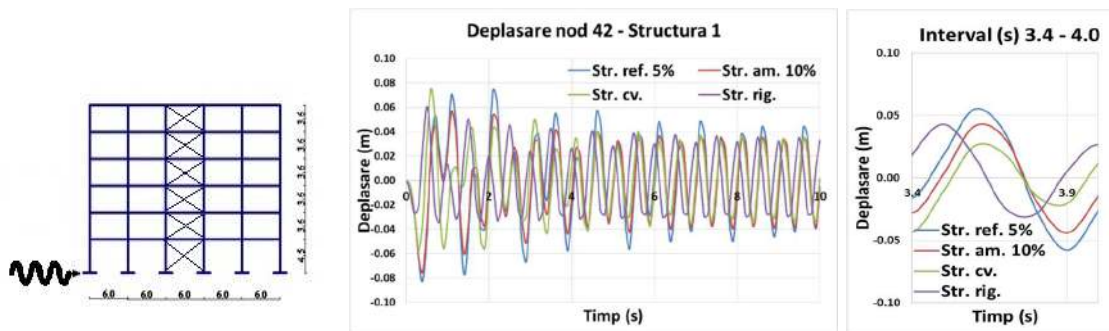


Figura 4.1-1 A. Structura 1. B. Deplasarea nodului 42 a structurii 1. C. Interval perioadă

Variația deplasării laterale a structurii 2 – cu regim de înălțime ridicat la 9 niveluri – acționată prin accelerograma sinusoidală, denotă efectul benefic al rigidizării laterale în reducerea (în deplasări laterale) a răspunsului seismic. Rigidizarea prin secțiuni transversale crescute conduce la reducerea deplasării cu cca. 50% din valoarea structurii de referință, iar rigidizarea prin contravântuire, produce rezultate aproape identice cu cele ale amortizării adăugate ($\xi=10\%$), aproximativ egale cu 70% din valoarea maximă a deplasării laterale a structurii de referință.

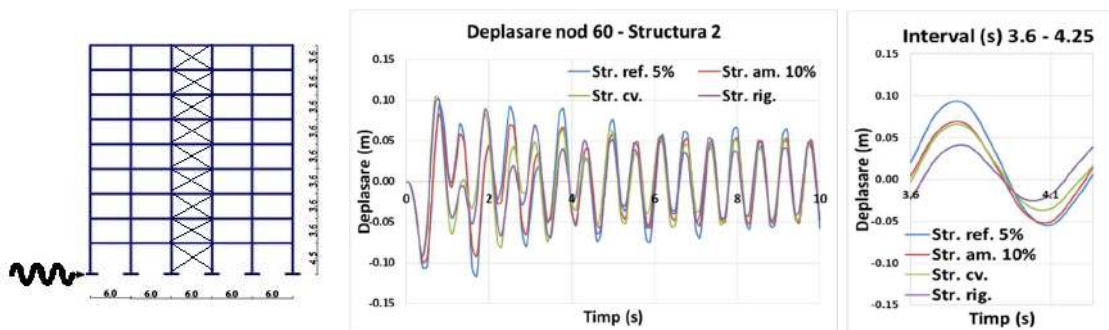


Figura 4.1-2 A. Structura 1. B. Deplasarea nodului 60 a structurii 2. C. Interval perioadă

În cazul structurii 3, cu 12 niveluri, variația deplasării structurilor rigidizate prin secțiuni transversale crescute și a celei contravântuite aproape că se confundă. Maximul

aproximativ atins de cele două – în ceea ce privește deplasarea laterală – reprezintă cca. 50% din cea a structurii de referință. Amortizarea adăugată însă, la un nivel de 10% a fracțiunii de amortizare critică, produce o reducere a deplasării egală cu 80% din valoarea structurii de referință.

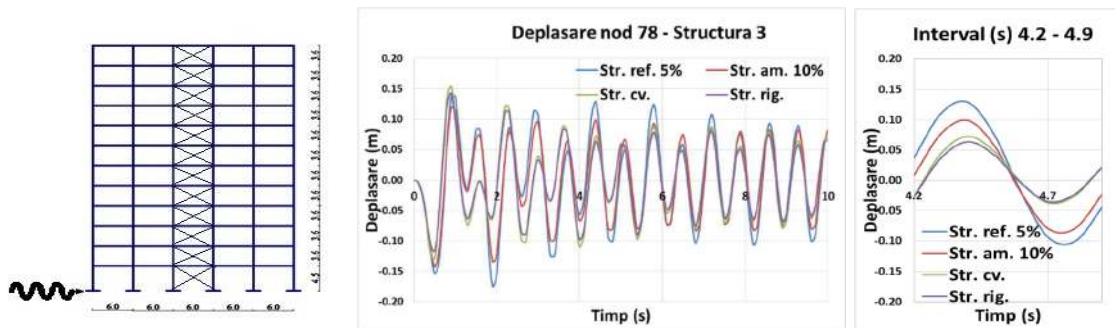


Figura 4.1-3 A. Structura 1. B. Deplasarea nodului 78 a structurii 3. C. Interval perioadă

Studiul răspunsului structurilor la acțiunea unui cutremur sinusoidal permite gradarea formală a rigidității laterale a structurilor studiate în funcție de valorile deplasărilor laterale induse ultimului nivel de un astfel de cutremur. Tabloul astfel obținut se completează cu valorile deplasărilor laterale ale ultimului nivel induse de aceeași acțiune sinusoidală structurilor echipate cu amortizare adăugată. Se obține (Fig. 4.1-4 ÷ 4.1-6), astfel, o scală a rigidităților laterale (exprimate în deplasări laterale) utilă pentru studiul propus (rigidizare vs. amortizare).

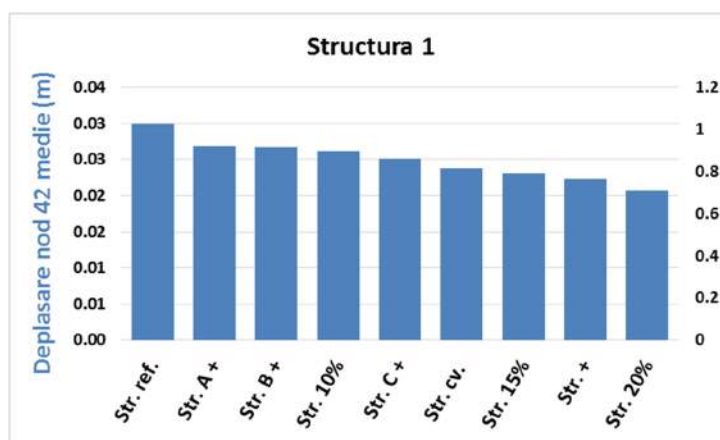


Figura 4.1-4 Ordonarea variantelor structurii 1 după rigiditate

Așa cum era de așteptat, structura de referință este cea mai flexibilă, iar structura echipată cu contravântuiri – printre cele mai rigide. Este util pentru concluzionarea rezultatelor numerice și pentru compararea rigiditate vs. amortizare să se evidențieze efectul amortizării

adăugate care – pentru valori de peste 15% - poate conferi structurii un nivel de „rigiditate” mai ridicat decât nivelul obținut prin contravântuire.

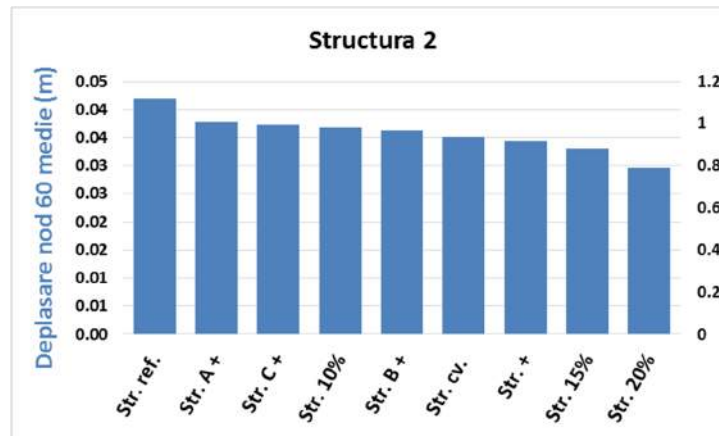


Figura 4.1-5 Ordonarea variantelor structurii 2 după rigiditate

Variantele de rigidizare a structurii 2 sunt supuse la încărcarea cu un cutremur sinusoidal, care determină ordonarea lor prezentată în Fig. 4.1-5, după deplasarea laterală de nivel medie. Structura de referință, prezintă din nou, cel mai mare nivel de flexibilitate. Variantele cu amortizare adăugată conduc la reducerea maximă a parametrului deplasare, în cele două cazuri în care fracțiunea de amortizare critică este egală cu 15% și 20%. Acestea din urmă depășesc în rigiditate laterală, chiar și variantele rigidizate prin secțiuni transversale crescute – „Str. +” – și contravântuite.

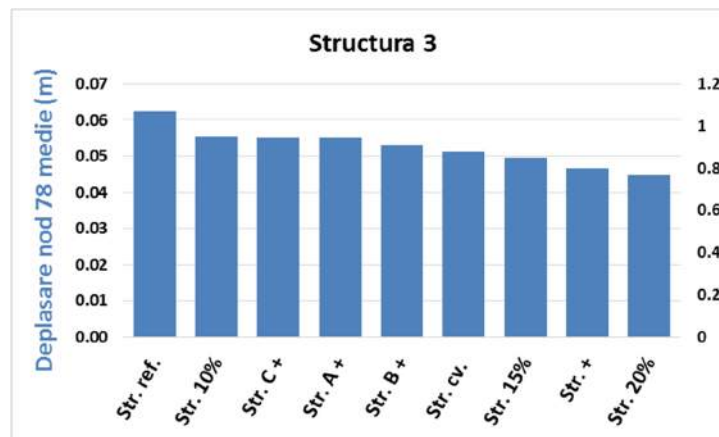


Figura 4.1-6 Ordonarea variantelor structurii 3 după rigiditate

În cazul structurii 3 (Fig. 4.1-6), ordonarea celor nouă ipostaze, după deplasarea laterală de nivel, indusă de cutremurul sinusoidal, se păstrează în mare măsură. Se constată că valoarea fracțiunii de amortizare necesară pentru îndeplinirea unui nivel de rigiditate laterală superior structurii rigidizate, crește în acest caz. Regimul ridicat de înălțime implică un caracter crescut

de flexibilitate, iar valoarea fracțiunii de amortizare egală cu 15% nu mai face față. Structura contravântuită, însă, prezintă valori ușor depășite de cea cu amortizare adăugată $\xi=15\%$.

4.1.2 Forța tăietoare seismică de bază vs. deplasări laterale

Forța tăietoare seismică de bază este, alături de deplasarea laterală un alt indicator pe cât de util (în activitatea de proiectare) pe atât de sugestiv în ceea ce privește efectul rigidizării sau al amortizării adăugate. Rigiditatea – laterală, în primul rând – formează împreună cu forța tăietoare seismică de bază (și, pe cale de consecință, cu forțele statice seismice echivalente de nivel) un sistem de tip feedback: rigiditate laterală mare (care, aparent, conferă „rezistență”) înseamnă perioade de vibrație mici și, deci, forțe tăietoare seismice de bază mari. În ce mai constă, atunci, ameliorarea răspunsului seismic prin creșterea rigidității laterale?

Rezultatele efectului rigidizării asupra forței tăietoare seismice de bază sunt prezentate mai jos (Fig. 4.1-7 ÷ 4.1-9). Autorul tezei consideră că este util și sugestiv ca variația forței tăietoare seismice de bază în raport cu rigiditatea laterală să fie evidențiată în paralel cu variația în raport cu fracțiunea de amortizare critică. Rezultatele de mai jos includ încă 3 niveluri de rigiditate laterală (notate cu A+, B+, C+, și detaliate în Subcapitolul 4.3) alături de ipostazele, menționate deja „Str. +” și „Str. cv”. Succesiunea ipostazelor de rigiditate laterală pe axa absciselor este asociată variației (descreștere graduală) forței tăietoare seismice de bază.

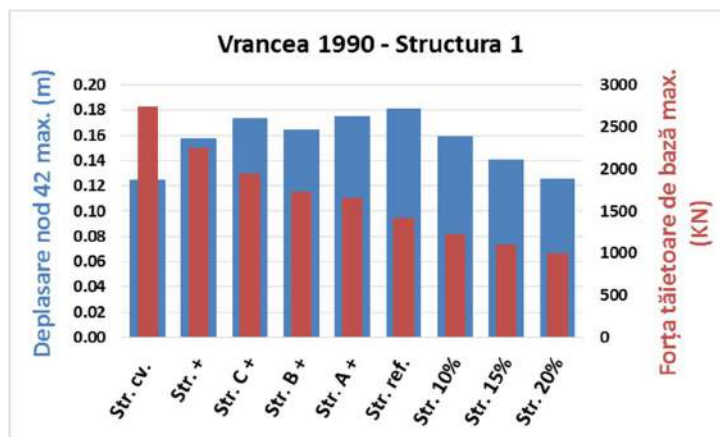


Figura 4.1-7 Variația forței tăietoare seismice de bază în funcție de rigiditatea laterală a structurii 1. Vrancea 1990

Prin variația forței tăietoare seismice de bază a structurii 1, acționată seismic de cutremurul Vrancea 1990, se observă o anumită ordonare a celor nouă ipostaze de rigiditate ale structurii, impusă de eficiența în reducerea răspunsului seismic - forței tăietoare seismice de bază. Alinierea structurilor în funcție de valoarea forței seismice de bază (Fig. 4.1-7), nu corespunde, însă, cu nivelul de rigiditate laterală asociat deplasării nodului 42 (Fig. 4.1-4).

Această constatare - și anume că nivelurile de rigiditate exprimate în „termeni de deplasări laterale” și, respectiv în „termeni de forță tăietoare seismică de bază” nu coincid – va fi evidențiată pentru fiecare caz numeric studiat. Acest rezultat se constituie, de asemenea, într-un argument puternic pentru abordarea energetică a stărilor de rigiditate / amortizare din moment ce starea cinematică (deplasările laterale) și, respectiv cea statică (forța tăietoare seismică de bază) conduc la concluzii diferite și, chiar, contradictorii.

Reprezentarea valorilor forței tăietoare seismice de bază și „ordonarea” acestora după rigiditatea formală a structurii evidențiază o adevărată capcană în opțiunea proiectantului pentru rigidizare vs. amortizare: rigidizarea structurii (având ca obiectiv reducerea răspunsului seismic în deplasări laterale) conduce – în același timp – la forțe tăietoare seismice de bază mari (deci la forțe seismice statice echivalente de nivel mari) care, la rândul lor, vor genera deplasări laterale mari.

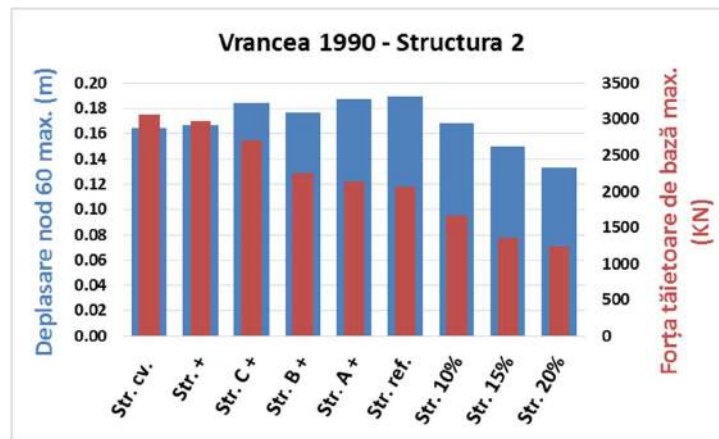


Figura 4.1-8 Variația forței tăietoare seismice de bază în funcție de rigiditatea laterală a structurii 2. Vrancea 1990

În cazul structurii 2 se constată că - din punctul de vedere al variației deplasării laterale - ipostazele de rigidizare prin contravântuiri („Str. cv.”), prin secțiuni transversale crescute (Str. +) și cele cu amortizare adăugată (având fracțiunea de amortizare critică $\xi=10\%$), conduc la stări cinematice foarte apropiate (Fig. 4.1-8). Se constată, de asemenea, o variație descendentă a forței tăietoare seismice de bază odată cu creșterea amortizării și o cvasi-stagnare a stării de deplasări laterale. Similar structurii cu 6 niveluri, structura 2, prezintă aceeași ordonare a maximului de forță seismică de bază, a structurilor. Ridicarea nivelului de înălțime implică, bineînțeles, un adaos de consum material, și prin urmare, creșterea valorilor forței tăietoare. Nu numai alinierea structurilor se păstrează, ci și raportul dintre nivelul de rigiditate al acestora și maximul de forță tăietoare. Astfel, structurile rigidizate – prin contravântuiri și secțiuni transversale crescute – produc din nou, valorile cele mai mari ale forței tăietoare, în timp ce, structurile amortizate sunt eficiente atât în reducerea deplasărilor laterale cât și în

reducerea forței tăietoare seismice de bază (Fig. 4.1-8). Și aici este validă constatarea conform căreia rigidizarea conduce nu numai la reducerea deplasărilor laterale ci și la creșterea forțelor seismice statice echivalente de nivel.

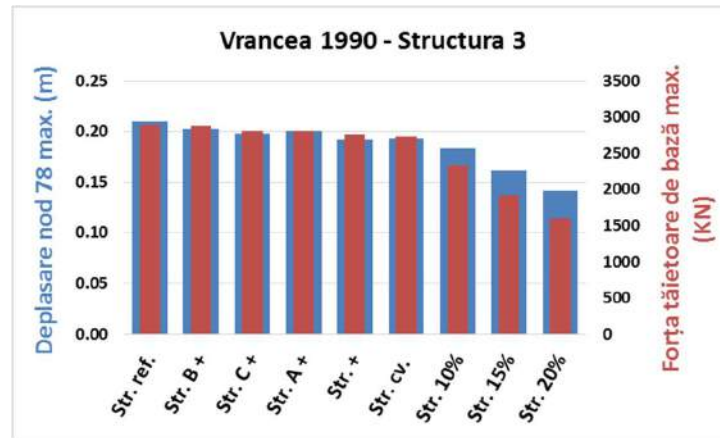


Figura 4.1-9 Variația forței tăietoare seismice de bază în funcție de rigiditatea laterală a structurii 3. Vrancea 1990

În cazul structurii 3, cu 12 niveluri, maximul forței tăietoare de bază, duce la schimbarea ordonării ipostazelor de rigiditate ale structurilor. Cu excepția structurilor cu amortizare adăugată, diferența valorilor maxime ale acestui parametru între cele șase variante de rigiditate laterală (referință, contravântuită, rigidizată „+”, A+, B+ și C+), este aproape insesizabilă. Amortizarea adăugată, însă, produce o reducere considerabilă a forței tăietoare, până la cca. 50% din valoarea structurii de referință (Fig. 4.1-9). Din nou, se constată rezultate contradictorii în eficiența celor două opțiuni (rigidizare / amortizare) când exprimarea răspunsului seismic se face prin deplasări laterale, respectiv, forța seismică tăietoare de bază.

Constatarea contradicției semnalate mai sus a efectelor (în deplasări laterale, respectiv în forțe tăietoare seismice de bază) constituie pentru autorul tezei un argument pentru o abordare sintetică a efectelor rigidizării / amortizării care să includă atât starea cinematică cât și starea statică induse seismic. Energia (în toate componentele sale) asociată unei structuri acționate seismic este o astfel de mărime sintetică. Într-adevăr, starea energetică a structurilor acționate seismic include starea statică de eforturi (în componenta energie de deformație elastică), starea cinematică de vibrație (în componenta energie cinetică), starea de amortizare (energia disipată prin amortizare), masa structurii / masele de nivel (energia de input) și acțiunea seismică (în energia de input). Abordarea energetică – adoptată în acest context – este în mare măsură obiectivul cercetării întreprinse și cuprinse în teza de doctorat.

4.1.3 Starea energetică vs. deplasări laterale

Așa cum s-a arătat în Capitolul 3, starea energetică în domeniul comportării elastice a unei structuri acționată seismic este definită de componentele: energie seismică de input E_I , energie de deformație elastică E_S , capacitate de absorbție energetică E_{ABS} . În același Capitol 3 este prezentată dependența stării energetice atât de acțiunea seismică cât și de starea de rigiditate / amortizare. O concluzie importantă rezultată din această dependență se referă la faptul că variația (de exemplu, scăderea) energiei seismice de input, trebuie analizată exclusiv în același timp cu variația capacității de absorbție energetică E_{ABS} . În continuare, starea energetică va fi exprimată prin același raport E_{ABS}/E_I asociat momentului de vârf (\ddot{u}_g) al acțiunilor seismice: Focșani 1986 (14,84 s), Vrancea 1990 (16,03 s) și Vrancea 1977 (6,08 s).

Pentru o expresivitate mai ridicată a evaluării rigidității laterale din punct de vedere energetic, starea energetică (raportul E_{ABS}/E_I) este prezentată în paralel cu tradiționala stare cinematică (deplasarea laterală a ultimului nivel) (Fig. 4.1-10 ÷ 4.1-18). Abordarea energetică a răspunsului seismic implică un tablou complex și variat al tuturor aspectelor asociate structurii, acțiunii seismice și răspunsului seismic. Din acest tablou, o componentă importantă este capacitatea structurii de a absorbi energia indusă seismic. Abordarea energetică în sine a fost declanșată în 1956 [9] chiar prin sublinierea necesității de a asigura structurile cu o capacitate suficientă de absorbție a energiei seismice. În termeni de proiectare bazată pe performanțe, structura este cu atât mai performantă seismic cu cât capacitatea de absorbție energetică E_{ABS} – și, implicit raportul E_{ABS}/E_I – sunt mai ridicate.

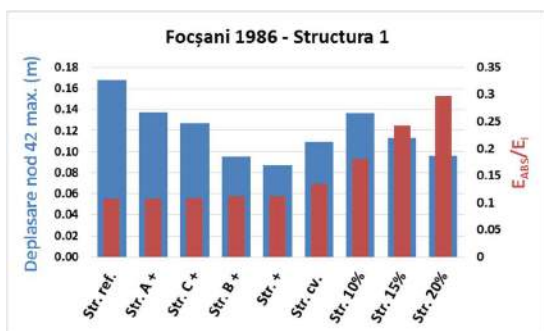


Figura 4.1-10 E_{ABS}/E_I - depl. nod 42, structura 1

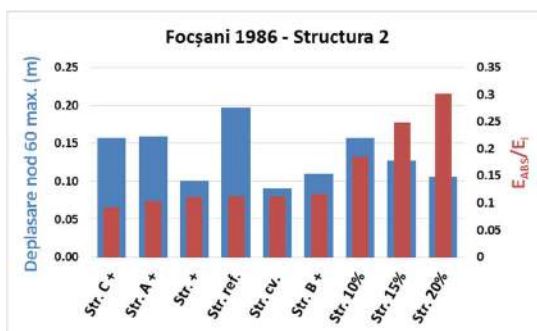


Figura 4.1-11 E_{ABS}/E_I - depl. nod 60, structura 2

Ordonarea celor nouă ipostaze de rigiditate a structurilor în funcție de raportul E_{ABS}/E_I în paralel cu deplasare laterală de nivel maximă oferă posibilitatea surprinderii efectului rigidizării asupra răspunsului energetic. În cazul structurii 1 acționată de cutremurul Focșani 1986, variația deplasărilor laterale de nivel diferă mult de variația raportului E_{ABS}/E_I . Se constată că o structură puternic rigidizată prin secțiuni transversale crescute, precum Str. +, are

un randament scăzut în ceea ce privește capacitatea de absorbție a energiei induse de acțiunea seismică. Pentru varianta contravântuită, a cărei răspuns cinematic (deplasarea laterală de nivel) se apropie de cel al structurii cu amortizare adăugată ($\xi=15\%$), raportul E_{ABS}/E_I atinge valoarea maximă la jumătatea structurii amortizate.

Variația raportului E_{ABS}/E_I al variantelor structurii 2, semnaleză structurile cu amortizare adăugată, ca fiind cele mai eficiente din punct de vedere energetic. Structurile rigidizate prin secțiuni crescute și prin contravântuiri produc rezultate scăzute ale acestui parametru. Este evident astfel că, rigidizarea crescută a acestor structuri, demonstrată prin nivelul redus al deplasărilor laterale de nivel al acestora, nu conduce în mod necesar la reducerea răspunsului seismic al structurii exprimat in termeni energetici.

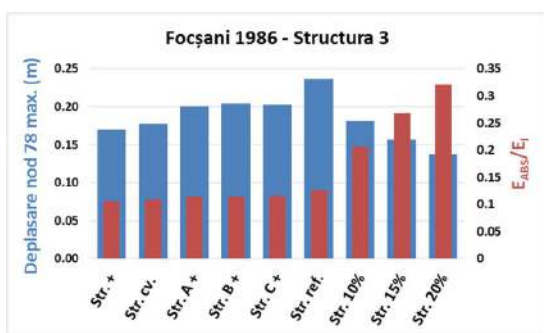


Figura 4.1-12 E_{ABS}/E_I - depl. nod 78, structura 3

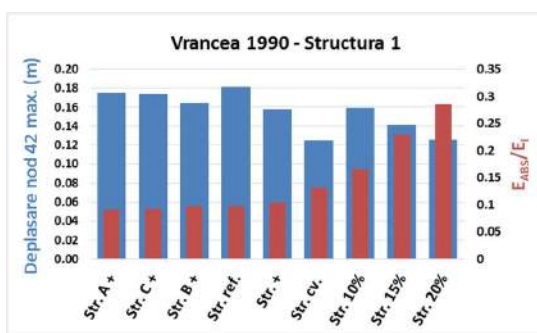


Figura 4.1-13 E_{ABS}/E_I - depl. nod 42, structura 1

Cea de-a 3 structură analizată, acționată de cutremurul Focșani 1986 (Fig. 4.1-12), prezintă o aranjare diferită ale celor nouă variante structurale. În cazul structurii cu 12 niveluri se constată că ipostazele cu nivelul cel mai crescut al rigidizării laterale (Str. + și Str. cv.) conduc la cele mai reduse valori ale raportului E_{ABS}/E_I . Reducerea nivelului de rigiditate duce la creșterea răspunsului energetic (Str. A+, B+ și C+), dar la scăderea răspunsului cinematic (deplasărilor relative de nivel).

Cutremurul Vrancea 1990, induce valori mai ridicate ale deplasării laterale de nivel structurii 1. Ipostaza rigidizată (Str. +) a structurii 1, prezintă un nivel similar de rigidizare cu structura cu amortizare adăugată ($\xi=10\%$), raportul energetic, însă, al acesteia (Str. +) este redus cu 50%. Nivelul de amortizare necesar pentru obținerea unei valori a deplasării laterale de nivel egală cu cea a structurii contravântuite, este în acest caz 20%. În ceea ce privește răspunsul energetic, raportul E_{ABS}/E_I al structurii din urmă, este cu cca. 250% mai mare decât al structurii contravântuite.

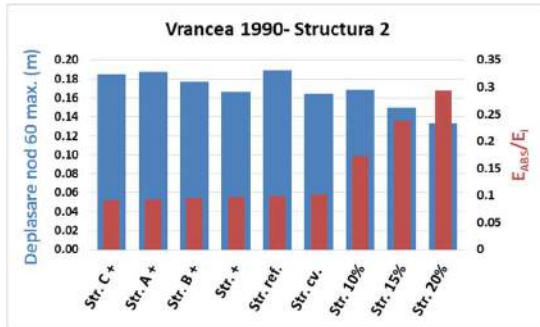


Figura 4.1-14 E_{ABS}/E_I - depl. nod 60, structura 2

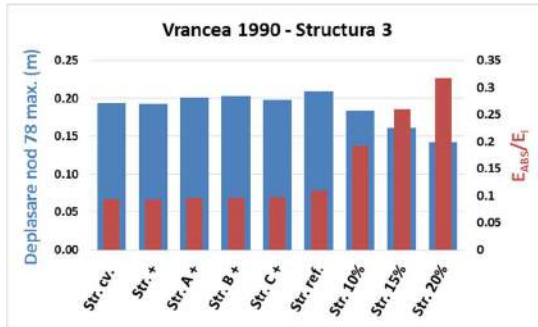


Figura 4.1-15 E_{ABS}/E_I - depl. nod 78, structura 3

Structurile 2 și 3 acționate de accelerograma Vrancea 1990 (Fig. 4.1-14, 4.1-15), nu prezintă variații mari ale deplasării de nivel a celor nouă ipostaze de rigidizare. Progresul în reducerea deplasării în cazul structurii 2 evoluează în fază cu progresul în amplificarea raportului E_{ABS}/E_I , exceptând structura de referință. Se observă astfel, că în cazul acestei structuri, amortizarea adăugată este benefică în ambele situații: atât în reducerea răspunsului cinematic cât și a celui energetic. Variația aproape liniară a deplasării laterale maxime, a celor nouă ipostaze ale structurii 3, este întreruptă în dreptul structurilor cu amortizare adăugată. Nivelul de rigiditate al acestora este superior celor două variante structurale rigidizate prin secțiuni transversale crescute și prin contravântuiri (Str. + și Str. cv.), care produc răspunsul energetic cel mai redus dintre toate structurile.

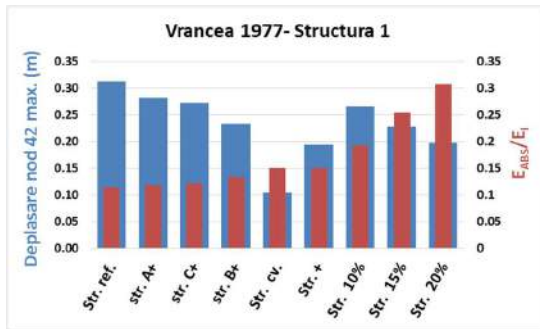


Figura 4.1-16 E_{ABS}/E_I - depl. nod 42, structura 1

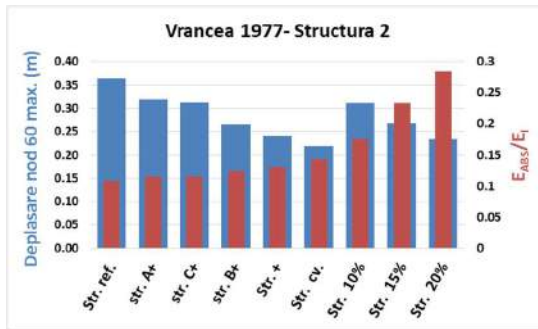


Figura 4.1-17 E_{ABS}/E_I - depl. nod 60, structura 2

Acțiunea seismică Vrancea 1977, induce structurilor deplasările laterale cele mai mari. În cazul primei structuri, variantele rigidizate prin secțiuni transversale crescute și prin contravântuiri produc rezultatele cele mai bune în ceea ce privește deplasarea laterală de nivel (Fig. 4.1-16). Doar structura cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=20\%$ atinge nivelul de rigiditate laterală al structurii „+”. Răspunsul energetic al structurilor cu amortizare adăugată este, însă, superior răspunsului structurilor cu contravântuiri și secțiuni transversale crescute.

Evoluția deplasării laterale de nivel a ipostazelor structurii 2, acționată seismic de Vrancea 1977, este mai puțin variată decât în cazul structurii cu 6 niveluri. Răspunsul cinematic

al structurii cu nivelul de amortizare adăugată de 20% este similar cu cel al structurii contravântuite. În ceea ce privește eficiența energetică, valoarea raportului E_{ABS}/E_I – a structurii amortizate suplimentar – este de două ori mai mare decât valoarea structurii rigidizate prin contravântuiri.

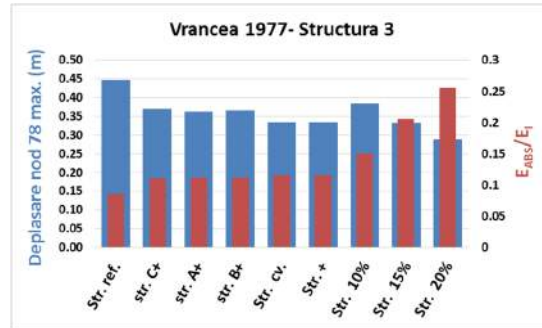


Figura 4.1-18 E_{ABS}/E_I - depl. nod 78, structura 3

În cazul structurii 3, deplasările laterale de nivel induse de cutremurul Vrancea 1977, s-au stabilizat într-o variație aproape liniară. Nivelul de rigiditate laterală, obținut prin contravântuire și secțiuni crescute (Str. cv. și Str. +) este aproape egal cu cel al structurii cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=15\%$. În ceea ce privește răspunsul energetic al acestor structuri (Str. cv. și Str. +), raportul E_{ABS}/E_I este redus cu jumătate față de cel al structurii amortizate suplimentar – ”Str. 15%”.

4.2 Starea de rigiditate și starea de amortizare din punct de vedere al eficienței economice

Creșterea rigidității (laterale, în primul rând) a unei structuri multi-etajate este cea mai bătută cale de adecvare structurală în conformitate cu prevederile normative de proiectare referitoare la deplasările laterale (absolute, relative). În codurile de proiectare a structurilor multi-etajate amplasate în zone seismice, prevederile referitoare la dimensionările în secțiune ale stâlpilor și grinzilor având ca obiectiv obținerea unor deplasări laterale relative mai mici decât limitele impuse sunt mult mai cuprinzătoare decât prevederile referitoare la echiparea structurii cu dispozitive de protecție seismică și – implicit – de reducere a deplasărilor laterale. Apelarea la rigiditate laterală – mai degrabă decât la amortizare suplimentară, de exemplu – este efectul a doi factori:

- Cunoașterea incompletă a efectelor rigidizării laterale. Abordarea energetică adoptată în teză pune în evidență și alte efecte structurale ale rigidizării pe lângă bine cunoscutul efect al reducerii deplasărilor laterale. Rezultatele numerice

obținute în urma analizelor seismice efectuate evidențiază – printre altele – efectul nedorit al rigidizării laterale asupra perioadelor de vibrație și, implicit asupra forței tăietoare seismice de bază. Aceeași abordare energetică „dezvăluie” efectele rigidității și a rigidizării asupra capacității de absorbție a energiei seismice a structurilor metalice multi-etajate.

- Cunoașterea incompletă a efectelor economice (costuri, în primul rând) comparate ale celor două opțiuni. Într-adevăr, echiparea unei structuri cu amortizare adăugată implică o tehnologie nouă, modernă și, într-o anumită măsură, prea puțin cunoscută din punct de vedere al costurilor asociate. Costurile aduse de echiparea cu amortizare adăugată sunt **costuri de investiții**, care influențează – și nu întru totul justificat – opțiunea în activitatea de proiectare. Numai o analiză completă a costurilor (investiție plus mentenanță) poate conduce la un tablou economic complet și corect asociat celor două opțiuni (rigidizare vs. amortizare). În acest subcapitol 4.2, este prezentată o analiză economică comparativă succintă în termeni de consum de oțel în structura multi-etajată propriu-zisă.

Autorul tezei, în acord cu conducătorul științific, își exprimă părerea că instruirea profesională a studenților Facultăților de Construcții referitoare la efectele „colaterale” ale rigidizării nu este suficient de aprofundată. Cu atât mai puțin dezvoltată este instruirea profesională a studenților referitoare la adecvarea structurală (inclusiv a deplasărilor relative de nivel) prin amortizarea adăugată. Ca urmare, autorul tezei consideră că abordarea economică – chiar într-o cuprindere redusă – a dualității rigidizare vs. amortizare și rezultatele numerice obținute constituie o bază pentru dezvoltări ulterioare.

Abordarea economică, strict din punct de vedere al consumurilor materiale și al costurilor, este o preocupare curentă a cercetătorilor și proiectanților de structuri [121], [122], [123]. Trebuie evidențiat faptul că eficiența economică nu poate fi corect analizată dacă unei astfel de analize nu i se asociază nivelurile de performanțe seismice pentru care se proiectează structura. De asemenea, costurile (investiții plus mentenanță) trebuie analizate pe categorii de lucrări: lucrări asociate structurii propriu-zise, lucrări asociate elementelor nestructurale ale clădirii, lucrări de instalații și dotări asociate funcțiunii clădirii. Într-un studiu recent [124] referitor la această structură a costurilor, se constată că nivelurile de performanțe seismice ridicate conduc la o creștere a costurilor asociate structurii propriu-zise cu peste 30% (Fig. 4.2-1), în timp ce costurile asociate elementelor nestructurale rămân aproape constante.

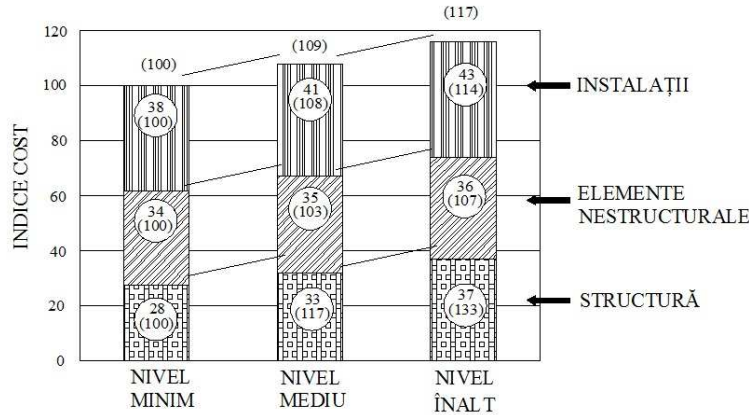


Figura 4.2-1 Variația costului de investiție în funcție de nivelul de performanță

Astfel de analize economice au devenit atât de importante în proiectarea structurilor încât au fost dezvoltate programe care estimează inclusiv costurile legate de reabilitarea post-seism [125], [126]. Mai mult, eficiența economică – atât în termeni de costuri cât și în termeni de consumuri materiale – a devenit un criteriu de optimizare în fază de proiectare structurale [127], [128], [129]. Principial, un astfel de instrument de optimizare are forma (Fig. 4.2-2). Variabilele de proiectare sunt, în general, parametri geometrici și mecanici asociați dimensiunilor secționale ale elementelor structurale.

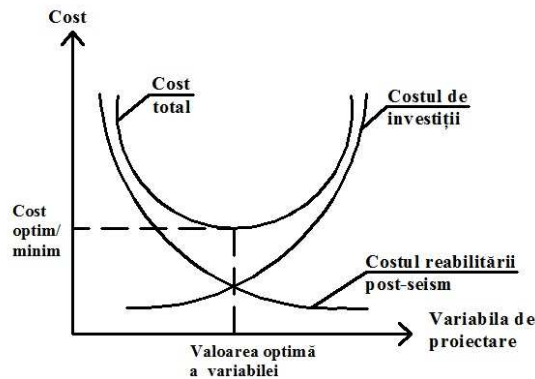


Figura 4.2-2 Variația costului total al unei structuri

Un alt set, relativ restrâns de preocupări și rezultate publicate referitor la dualitatea rigidizare – amortizare, analizează relația dualitate rigidizare – amortizare strict din punctul de vedere al costurilor [130], [131], [132]. Astfel de analize necesită – înafara valorilor numerice ale costurilor asociate diferitelor ipostaze de rigidizare / amortizare – criterii de echivalare a celor două stări mecanice (starea de rigiditate / starea de amortizare). Criteriul cel mai direct îl constituie, din nou, deplasările laterale relative care sunt, la rândul lor, parametrul cel mai

dificil de satisfăcut. Analizele economice comparative prezentate în continuare folosesc două criterii de echivalare a stărilor de rigiditate și, respectiv de amortizare:

1. Criteriul deplasărilor relative de nivel;
2. Criteriul capacității de absorbție a energiei seismice.

Dezvoltările cuprinse, în continuare, în teză se referă la compararea rigidizării și amortizării din punctul de vedere al consumului material. Pentru compararea celor două stări mecanice sunt analizate trei structuri metalice multi-etajate în cinci stări de rigiditate laterală - structurile rigidizată prin contravîntuiri, și cele rigidizate prin secțiuni transversale crescute, inclusiv nivelurile intermediare de rigidizare laterală (Str. A+, B+ și C+) necesare echivalării de la Subcapitolul 4.3.

4.2.1 Eficiența economică

Echivalarea rigidității laterale – amortizare adăugată prin analizele structurale de mai sus, conduc la oportunitatea identificării unui numitor comun între nivelul de consum de material și rigiditatea laterală prin secțiuni transversale crescute. Evoluția rigidității structurii odată cu creșterea secțiunilor transversale clarifică implicațiile economice aduse de această opțiune de protecție seismică. Structurile propuse pentru realizarea acestui studiu includ nu numai structura de referință și structura rigidizată prin secțiuni transversale crescute, notată mai sus ca „Str. +” ci și structurile „Str. A+”, „Str. B+” și „Str. C+”, obținute prin rigidizare pentru echivalarea cu structura amortizată suplimentar ($\xi=10\%$), în funcție de acțiunea seismică la care este solicitată structura: Focșani 1986, Vrancea 1990, respectiv Vrancea 1977. Astfel se surprind nu 2, ci 5 ipostaze de rigidizare prin secțiuni transversale crescute. Reprezentările grafice 4.2-3 ÷ 4.2-5 prezintă relația rigiditate – consum de material a celor trei structuri analizate, cu 5 deschideri, dispuse pe 6, 9 și 12 niveluri. Fiecare figură reprezintă cele trei structuri, acționate de unul din cele trei cutremure folosite în determinarea parametrilor răspunsului seismic în prezentul studiu, anume: Focșani 31 August 1986 și Vrancea 30 Mai 1990 (scalate la 0,24g) și Vrancea 4 Martie 1977.

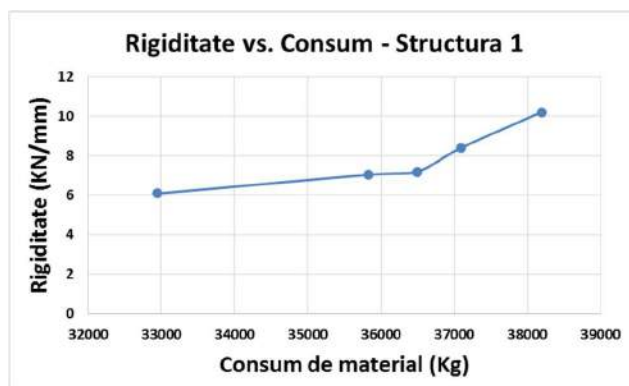


Figura 4.2-3 Rigiditate vs. consumul de material a structurii 1

Primul grafic (Fig. 4.2-3) prezintă cazul primei structuri în cele 5 ipostaze de rigiditate laterală. Se constată ridicarea nivelului de rigiditate al structurilor pe măsură ce crește consumul de material al acestora. Între valorile 33000 și 36500 [Kg] a greutateii structurale se observă o variație aproape liniară a rigidității. Ulterior ritmul creșterii rigidității odată cu consumul de material se amplifică. Astfel pentru ridicarea nivelului de rigiditate cu 67% față de structura de referință, este nevoie de 5000 Kg, mai exact un surplus de 16% din totalul greutateii structurii de referință.

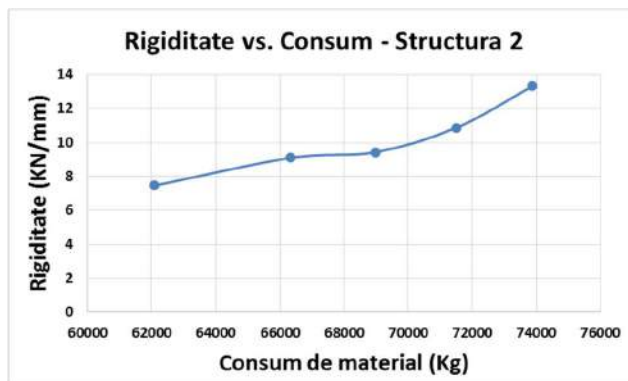


Figura 4.2-4 Rigiditate vs. consumul de material a structurii 2

În cazul structurii 2, creșterea rigidității prin dispunerea unor secțiuni mai mari, deci prin consum suplimentar material, se produce ușor mai accelerat. Este nevoie de un surplus de 19% de oțel pentru a duce structura la un nivel de rigiditate cu 63% mai mare decât cel al structurii de referință.

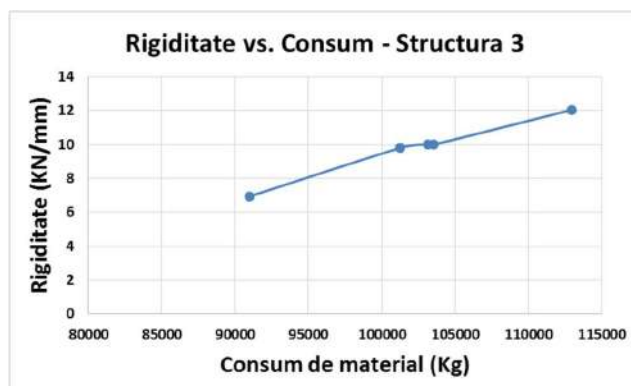


Figura 4.2-5 Rigiditate vs. consumul de material a structurii 3

Structura 3 - cea mai înaltă, are o variație a consumului material vs. rigiditate mai concentrată în punctele care reprezintă structurile rigidizate în scopul echivalării cu structura amortizată suplimentar, anume Str. A+, Str. B+ și Str. C+. Surplusul maxim al rigidității față de consum, apare între structura de referință și Str. +. Astfel pentru a crește rigiditatea structurii 3 cu 71%, este necesar un aport de oțel egal cu 24%. Chiar dacă structura este considerabil consolidată, în ceea ce privește deplasarea laterală, consumul necesar impunerii acestui nivel de rigiditate este și el crescut.

4.2.2 Consumuri materiale structurale prin rigidizare laterală

Folosirea rigidizării ca soluție pentru protejarea structurilor împotriva acțiunii cutremurului are o influență majoră asupra răspunsului seismic al acestora. Parametrii rezultați în urma analizelor *time-history* evidențiază atât avantajele (reducerea deplasărilor) cât și consecințele (amplificarea forței tăietoare seismice de bază, reducerea raportului E_{ABS}/E_I) rigidizării suplimentare [133]. Dar, pe lângă elementul tehnic, un proiect de inginerie civilă sau industrială, mai conține și elementul economic. Astfel, în sprijinul înțelegerii consecințelor economice rezultate din utilizarea metodelor de rigidizare, pentru protecție seismică, fie că această rigidizare este efectuată prin contravântuire, fie prin creșterea secțiunilor transversale ale elementelor sistemului structural (stâlpi și grinzi), este prezentată în continuare, variația greutății totale ale celor trei cadre acționate de cutremurele Vrancea 4 Martie 1977, Focșani 31 August 1986 și Vrancea 30 Mai 1990 (ultimele două accelerograme fiind scalate la valoarea maximă 0,24g a accelerației terenului), în toate cele patru variante studiate: structura de referință / cu amortizare adăugată, structura contravântuită și cea rigidizată prin secțiuni transversale mărite. Motivarea alegerii greutății totale ca indice al eficienței economice este capacitatea acestuia de a releva variația consumului de material suplimentar, necesar pentru obținerea unui răspuns seismic adecvat, fără a implica termeni financiari.

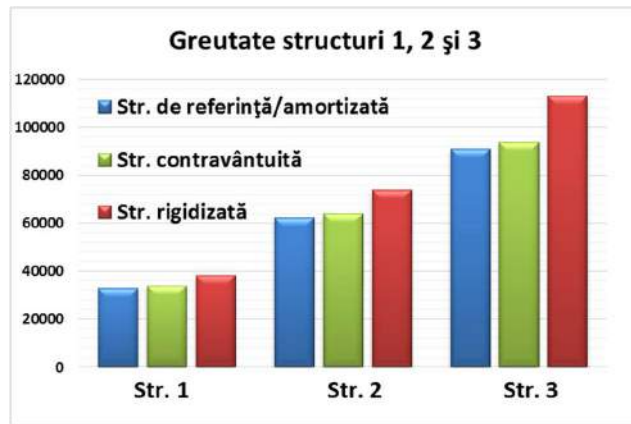


Figura 4.2-6 Variația greutății structurilor 1 ÷ 3

Variația greutății structurilor analizate în acest studiu, este dependentă de metoda de rigidizare aleasă. Protecția seismică prin amortizare adăugată nu implică un surplus de consum material, deci nivelul greutății acestora este indicat alături de cel al structurii de referință. Surplusul de consum rezultat din echiparea structurilor cu un sistem de contravântuiri, este minor, având valoarea de 3% din cea a structurii de referință în toate cele trei cazuri de înălțime. Greutatea structurilor rigidizate, însă, variază în funcție de numărul nivelurilor. Astfel structura 1, rigidizată prin secțiuni transversale crescute, reprezintă 116% din totalul greutății structurii de referință. Structura 2, cu 9 niveluri are varianta rigidizată, cu 19% mai grea decât cea de referință, iar structura 3, cu 12 niveluri, cu 24%. Regimul ridicat al înălțimii structurilor 2 și 3, conduce la un nivel crescut de flexibilitate structurală, care necesită o intervenție cu mai mult consum de material pentru o rigidizare corespunzătoare.

Pentru identificarea eficienței economice a structurilor supuse la acțiuni seismice, se prezintă și variația structurilor rigidizate A+, B+ și C+, față de cadrele de referință. Aceste structuri au fost proiectate astfel încât graficul deplasare relativă de nivel să se alinieze cu structura amortizată suplimentar ($\xi=10\%$). Pentru echivalarea structurii cu fracțiunea de amortizare critică, cele trei structuri de referință, 1, 2 și 3 cu 6, 9 și 12 niveluri, au fost rigidizate lateral prin creșterea secțiunilor transversale a elementelor grindă și stâlp. Astfel, s-au obținut pentru toate cele trei regimuri de înălțime o structură A+, echivalată cu nivelul de amortizare 10%, pentru cutremurul Focșani 1986, structura B+ pentru cutremurul Vrancea 1990 și, respectiv structura C+, pentru cutremurul Vrancea 1977. Figurile 4.2-7 ÷ 4.2-9 prezintă variația efectivă a greutății structurale totale a celor 3 variante analizate: cadrul de referință / cadrul cu amortizare adăugată $\xi=10\%$ (care are greutatea totală egală cu cea a structurii de referință) și cadrul rigidizat prin secțiuni transversale crescute.

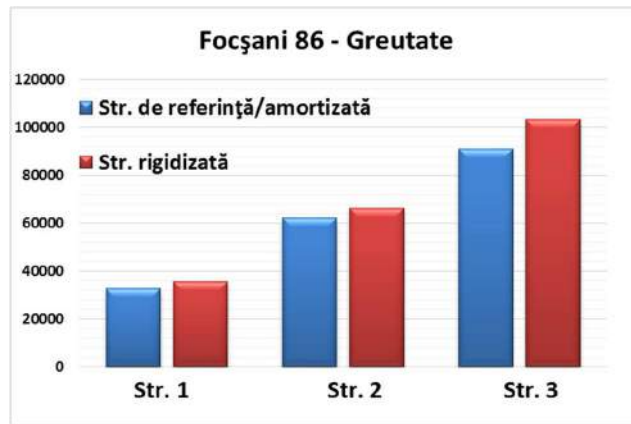


Figura 4.2-7 Variația greutății structurilor echivalente 1 ÷ 3 (Str. A+). Focșani 1986

Structurile echivalente din punct de vedere a deplasărilor relative de nivel induse de acțiunea seismică Focșani 1986, pentru a îndeplini limitarea impusă de structura amortizată suplimentar ($\xi=10\%$), suferă modificări în greutatea totală. Rigiditatea laterală necesară impune un adaos de consum material egal cu 8,7% în cazul primei structuri, 6,8% în cazul structurii 2 și 13,4% în cazul structurii 3. Variația greutății structurilor nu crește proporțional cu regimul de înălțime al structurilor. Proiectarea structurii de referință, poate fi neintenționat favorabilă unei anumite acțiuni seismice. Astfel, în cazul structurii 2, necesarul de consum suplimentar pentru reducerea deplasărilor laterale este mai mic decât în cazul structurii 1.

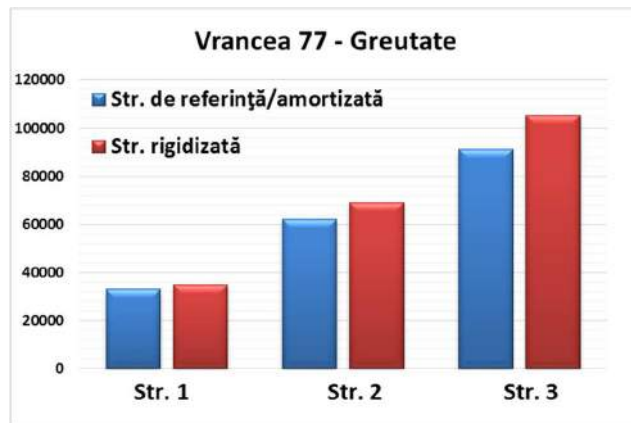


Figura 4.2-8 Variația greutății structurilor echivalente 1 ÷ 3 (Str. C+). Vrancea 1977

Similar, structurile au fost supuse la acțiunea cutremurului Vrancea 1977, pentru determinarea procentului deplasare relativă de nivel, și echivalarea răspunsului seismic al structurii cu amortizarea adăugată prin rigiditate laterală. Această rigiditate laterală a fost indusă prin creșterea secțiunilor transversale a elementelor structurii – stâlpi și grinzi. În cazul primei structuri s-a produs un surplus de 5,3% în greutatea totală. Structura 2 este mai grea cu 11,1%, iar structura 3 cu 15,7%. Se constată că procentul de material necesar pentru reducerea deplasărilor relative de nivel crește odată cu numărul de niveluri. Regimul de înălțime crescut

aduce cu el un surplus de flexibilitate, rigidizarea laterală realizându-se astfel mai dificil, implicând un consum material crescut.

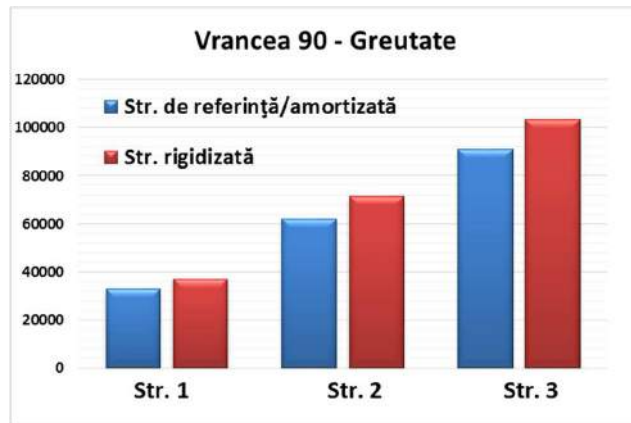


Figura 4.2-9 Variația greutății structurilor echivalate 1 ÷ 3 (Str. B+). Vrancea 1990

În cazul acționării seismice prin cutremurul Vrancea 1990, structurile echivalate prin rigiditate laterală suplimentară 1, 2 și 3 au crescut cu 12,6%, 15,2% respectiv 13,8% în greutatea totală. Se constată astfel, un surplus considerabil în consumul de material necesar pentru a reduce răspunsul seismic la o valoare similară indusă de fracțiunea de amortizare critică $\xi=10\%$.

4.3 Echivalarea rigidității laterale cu amortizarea adăugată pe baza deplasărilor relative de nivel

Echivalarea rigidității laterale cu amortizarea adăugată este un obiectiv important al tezei de doctorat. Propunerea autorului este de a realiza această echivalare, nu doar la nivel teoretic, ci prin analiza seismică a structurilor metalice multi-etajate, cu conformație geometrică variată și o gamă de acțiuni seismice diversificată. Astfel, aceste studii numerice conduc la identificarea locului comun al rigidizării laterale prin secțiuni transversale crescute și nivelul de amortizare adăugată, pentru cele trei structuri, cu 5 deschideri, dispuse pe 6, 9 sau 12 niveluri. Parametrul utilizat pentru obținerea echivalării rigiditate – amortizare este procentul de deplasare relativă de nivel, un termen des întâlnit în proiectarea seismică a structurilor. Metodologia acestor studii este structurată în câțiva pași simpli:

- Analiza seismică *time-history* a structurii de referință, și a celei cu amortizare adăugată, cu valoarea fracțiunii de amortizare adăugată $\xi=5\%$, respectiv $\xi=10\%$;
- Reprezentarea grafică a procentului deplasare relativă de nivel, ale celor două structuri;

- Rigidizarea structurii de referință (cu $\zeta=5\%$), astfel încât structura să producă valori ale procentului de deplasare relativă de nivel, asemănătoare cu cele ale structurii cu amortizare adăugată ($\zeta=10\%$). Se obțin, astfel, pentru cele trei structuri (1, 2 și 3) câte trei ipostaze structurale A+, B+ și C+, corespunzătoare celor trei acțiuni seismice – Focșani 1986, Vrancea 1990, respectiv Vrancea 1977.

Alinierea graficelor procentului de deplasare relativă de nivel, ale celor două structuri – cu rigidizare adăugată și cu amortizare adăugată – conduce la concluzia simplă, că cele două structuri sunt echivalente în termeni de răspuns seismic. Acești pași sunt urmați în analiza tuturor celor trei structuri, în toate cele trei situații de încărcare seismică: Vrancea 4 Martie 1977, Focșani 31 August 1986 și Vrancea 30 Mai 1990. Se reamintește specificația menționată în Subcapitolul 1.2 – Metodologie – cu privire la accelerogramele Focșani 1986 și Vrancea 1990, scalate pentru a atinge maximul accelerației la valoarea 0,24g. Reprezentările echivalării rigidizării laterale – amortizării adăugate sunt redată în Figurile 4.3-1 ÷ 4.3-3.

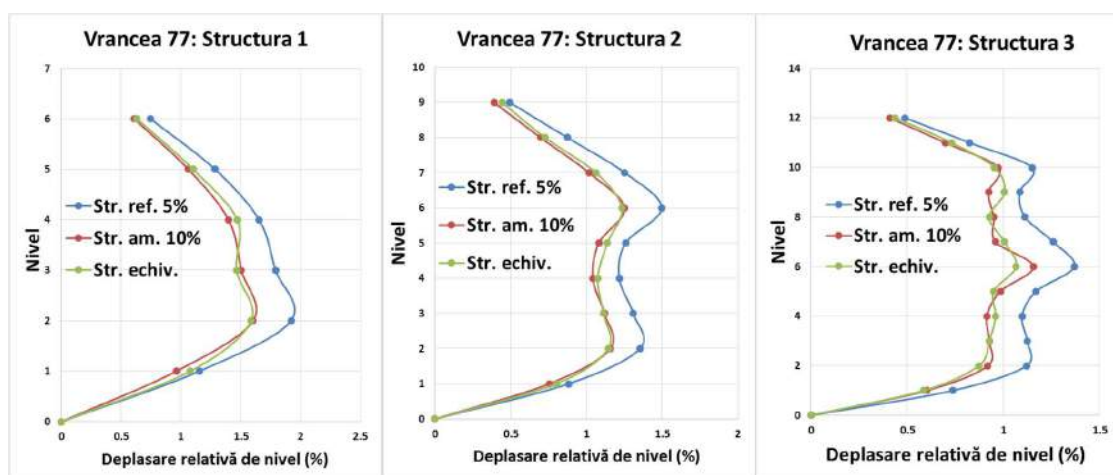


Figura 4.3-1 Variația deplasării relative de nivel a structurilor (A)1, (B)2 și (C)3 – Str. A+. Vrancea 1977

Primele structuri analizate în încercarea de aliniere a graficelor procentelor de deplasare relativă de nivel a structurilor cu rigidizare laterală prin secțiuni transversale și a celor cu amortizare adăugată, sunt structurile acționate de cutremurul Vrancea 1977. Diferența procentului de deplasare relativă de nivel între structura de referință și cea cu fracțiunea de amortizare critică, diferă la cele trei structuri. Astfel, procentul deplasare relativă de nivel ce trebuie recuperat prin creșterea secțiunilor este 0,3% în cazul structurii 1, 0,25% în cazul structurii 2 și 0,2% la structura 3. Efectele acestei rigidizări, asupra perioadei de vibrație a

structurilor (Tab. 4.3-1) și în special, asupra consumului de material necesar (Fig. 4.2-7) sunt prezentate în teză.

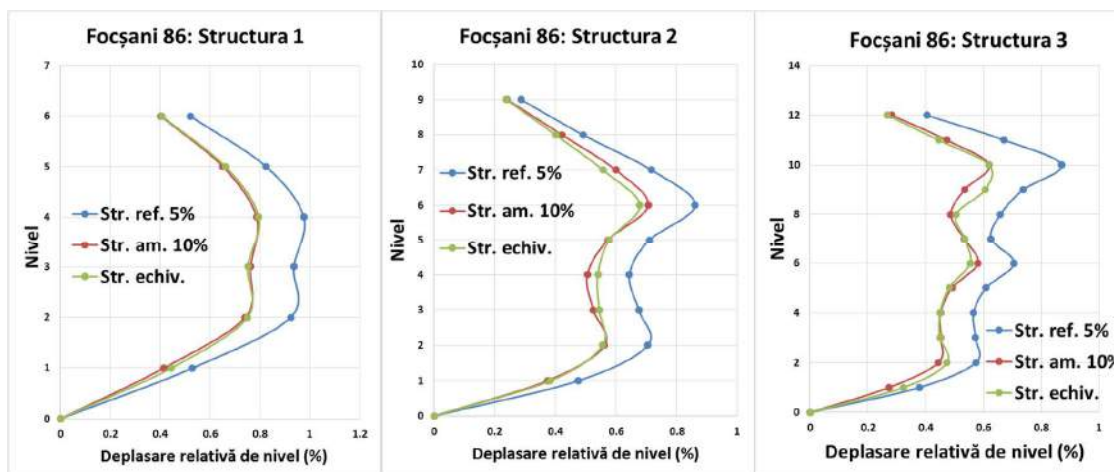


Figura 4.3-2 Variația deplasării relative de nivel a structurilor (A)1, (B)2 și (C)3 – Str. A+. Focșani 1986

A doua accelerogramă utilizată pentru echivalarea rigidității laterale cu amortizarea adăugată din punct de vedere a deplasărilor relative de nivel este Focșani 1986. Structurile 1, 2 și 3, cu 5 deschideri și 6, 9, respectiv 12 niveluri, prezintă valori mai reduse ale deplasărilor relative de nivel, în comparație cu structurile solicitate la acțiunea seismică Vrancea 1977. De asemenea, diferența între structura de referință și cea cu $\xi=10\%$, este mai mică: cca. 0,2% în cazul primei structuri și cca. 0,5% în cazul celorlalte două structuri. Variația necesarului de consum pentru îndeplinirea limitelor valorice impuse de structura amortizată suplimentar variază pentru cele trei structuri (Fig. 4.2-8). Perioada de vibrație a structurilor rigidizate vs. cea a structurilor de referință este prezentată în Tab. 4.3-2.

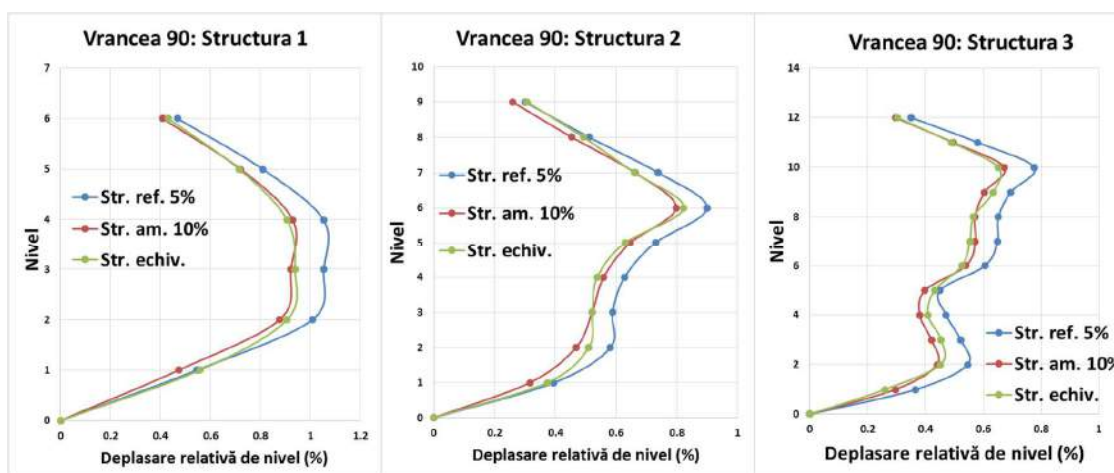


Figura 4.3-3 Variația deplasării relative de nivel a structurilor (A)1, (B)2 și (C)3 – Str. B+. Vrancea 1990

Ultima accelerogramă utilizată în scopul echivalării rigidizării laterale cu amortizarea adăugată este Vrancea 1990. Diferența dintre structura de referință și cea cu amortizare

adăugată este în toate cele trei cazuri de înălțime aproximativ 0,15%. Similar structurilor acționate de Focșani 1986 și Vrancea 1977, se prezintă variația greutateii (Fig. 4.2-9) și a perioadelor de vibrație (Tab. 4.3-3).

Autorul acestui studiu consideră că este interesant să se studieze și alți parametri ce rezultă din analizele structurale realizate pentru echivalarea rigidității laterale cu amortizarea adăugată. Astfel, tabelele 4.3-1 ÷ 4.3-3 prezintă perioadele de vibrație a structurilor rigidizate pentru a atinge alinierea grafică a deplasărilor relative de nivel, în paralel cu perioadele structurilor de referință/ cu amortizare adăugată.

Tabel 4.3-1 Perioada de vibrație a structurilor echivalente 1 ÷ 3 – Str. A+. Focșani 1986

Structura	Str. 1	Str. 2	Str. 3	Focșani 1986
Referință/Am.	1.25	1.36	1.55	0.50
Rigidizată	1.17	1.23	1.31	

Structurile acționate seismic prin accelerograma Focșani 1986, rigidizate pentru a îndeplini cerințele de deplasare relativă de nivel corespunzătoare unei fracțiuni de amortizare adăugată $\zeta=10\%$, resimt o reducere a perioadei de vibrație. Valoarea maximă a acestei reduceri este înregistrată de structura 3, a cărei perioadă de vibrație în varianta rigidizată este cu 15,5% mai mică decât perioada structurii de referință. În cazul structurii 1, perioada se micșorează cu 6,4%, iar în cazul structurii 3, cu 9,5%.

Tabel 4.3-2 Perioada de vibrație a structurilor echivalente 1 ÷ 3 – Str. B+. Vrancea 1990

Structura	Str. 1	Str. 2	Str. 3	Vrancea 1990
Referință/Am.	1.25	1.36	1.55	0.66
Rigidizată	1.07	1.11	1.32	

Structurile acționate de cutremurul Vrancea 1990, rigidizate lateral până la alinierea grafică a deplasărilor relative de nivel cu structura amortizată suplimentar, la fel, înregistrează reducerea valorilor perioadei de vibrație. astfel: structurii 1 i se micșorează perioada de vibrație cu 14,4%, structurii 2 cu 18,4%, iar structurii 3 cu 14,8%. În cazul acestei acțiuni seismice se observă că, structura 2, cu nivelul mediu de înălțime necesită, aportul maxim de consum de material pentru a se alinia cu limitele de deplasare relativă de nivel impuse prin fracțiunea de amortizare 10%, și deci înregistrează reducerea maximă a perioadei de vibrație.

Tabel 4.3-3 Perioada de vibrație a structurilor echivalate 1÷3 – Str. C+. Vrancea 1977

Structura	Str. 1	Str. 2	Str. 3	Vrancea 1977
Referință/Am.	1.25	1.36	1.55	1.16
Rigidizată	1.15	1.22	1.35	

Similar, structurile acționate de cutremurul Vrancea 1977, prezintă valori mai reduse ale perioadei de vibrație, în varianta rigidizată prin secțiuni transversale crescute. Se constată o reducere a perioadei de vibrație a structurii 1 rigidizate, în valoare de 8%, față de structura de referință, de 10,3% la structura 2 și de 12,9% la structura 3. Variația perioadei este de aceasta dată în linie cu variația înălțimii structurilor, reducerea maximă fiind înregistrată de structura 3, cu 12 niveluri.

Echivalarea rigidizare laterală – amortizare adăugată din punctul de vedere al deplasărilor relative de nivel reprezintă unul din obiectivele principale ale cercetării întreprinse. Identificarea unui loc comun al celor două stări în care se regăsesc structurile proiectate anti-seismic, reprezintă o unealtă cu potențial ridicat în activitatea inginerescă. Exprimarea rigidității a fost făcută în termeni de *surplus de consum* [%], pentru a putea fi asociat intervalului valorilor fracțiunii de amortizare critică impuse structurilor ($\xi = 5 \div 20\%$). ”Surplusul” este relaționat structurii de referință, prin urmare, în dreptul acestei structuri, valoarea procentuală a surplusului de consum este 0%. Graficul surplus de consum – deplasare relativă de nivel prezintă variația consumului de material a structurii de referință și a celor rigidizate lateral prin secțiuni transversale crescute (Str. +, Str. A+, Str. B+ și Str. C+). Pentru reprezentarea variației deplasării relative de nivel față de nivelul de amortizare adăugată a fost analizată structura de referință împreună cu cele trei ipostaze structurale amortizate suplimentar, având fracțiunea de amortizare critică $\xi=10\%$, $\xi=15\%$ și $\xi=20\%$ (Fig. 4.3-4 ÷ 4.3-12). Cele trei structuri – 1, 2 și 3 - sunt solicitate seismic prin cele trei cutremure: Vrancea 4 Martie 1977, Focșani 31 August 1986 și Vrancea 30 Mai 1990 – ultimele două accelerograme fiind scalate la valoarea 0,24g a accelerației terenului.

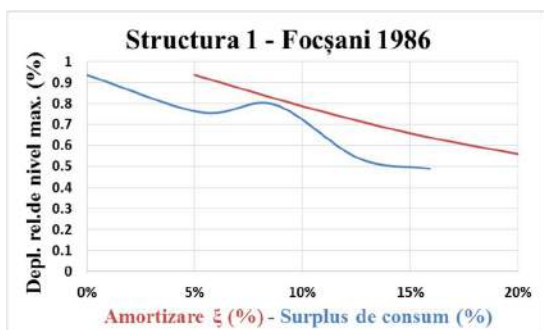


Figura 4.3-4 Structura 1. Focșani 1986

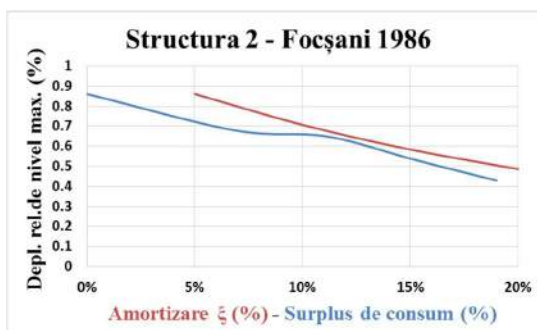


Figura 4.3-5 Structura 2. Focșani 1986

Structurile acționate seismic prin cutremurul Focșani 1986, sunt surprinse în Fig. 4.3-4 ÷ 4.3-6. Se constată că primele două structuri prezintă o variație a deplasării relative de nivel, mai favorabilă odată cu creșterea surplusului de consum. În cazul structurii 2 graficele *amortizare* și *surplus de consum*, aproape că se aliniază, sugerând că, în această situație, efectele celor două metode de reducere a răspunsului seismic sunt aproape identice. În ceea ce privește structura 3, cu cel mai mare regim de înălțime (12 niveluri), reducerea valorilor deplasării relative de nivel este vizibil mai pronunțată prin creșterea fracțiunii de amortizare critică, decât prin creșterea rigidității laterale. Intersecția celor două grafice (*amortizare* și *surplus de consum* – față de deplasarea relativă de nivel), indică un nivel de amortizare / surplus de consum material egal cu valoarea 7,5%, valoare până la care suplimentarea rigidității laterale prin creșterea secțiunilor transversale este mai avantajoasă din punctul de vedere al deplasărilor relative de nivel.

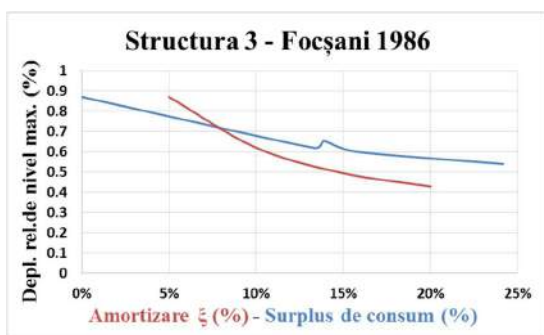


Figura 4.3-6 Structura 3. Focșani 1986

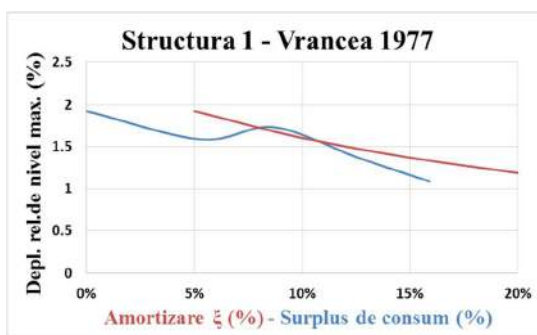


Figura 4.3-7 Structura 1. Vrancea 1977

Structurile solicitate la acțiunea seismică Vrancea 1977, reprezentate în Figurile 4.3-7 ÷ 4.3-9, prezintă o variație similară a variației celor două grafice. În cazul primei structuri se constată că rigidizarea laterală prin creșterea secțiunilor transversale ale stâlpilor și grinzilor, deci a consumului de material, are un efect de reducere mai pregnant decât cel al amortizării adăugate. În jurul valorii 10% a amortizării / surplusului de consum, se observă un salt în graficul *surplus de consum* ce denotă o scădere a eficienței rigidizării laterale în reducerea

răspunsului seismic. Similar structurilor acționate prin cutremurul Focșani 1986, în cazul structurii 2 se observă o variație aproape identică a graficelor *amortizare* și *surplus de consum*. Efectul creșterii rigidității asupra reducerii deplasării relative de nivel a structurii 3 este favorabil doar până la atingerea valorii 13% - a amortizării adăugate / surplusului de consum.

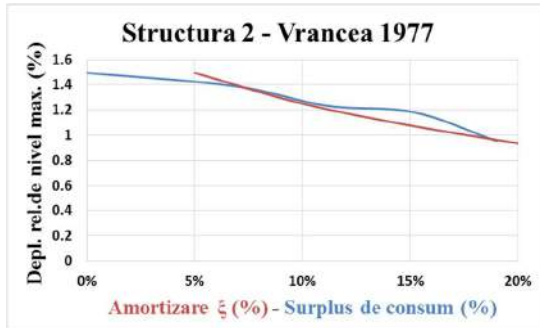


Figura 4.3-8 Structura 2. Vrancea 1977

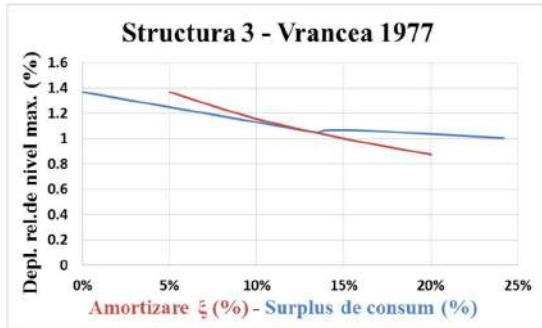


Figura 4.3-9 Structura 3. Vrancea 1977

Echivalarea rigiditate – amortizare adăugată prin deplasări relative de nivel a structurilor solicitate seismic prin cutremurul Vrancea 1990 este reprezentată în Fig. 4.3-10 ÷ 4.3-12:

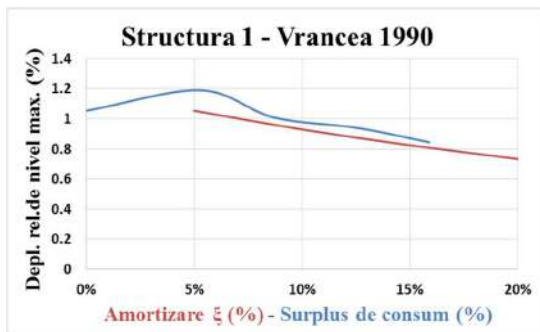


Figura 4.3-10 Structura 1. Vrancea 1990

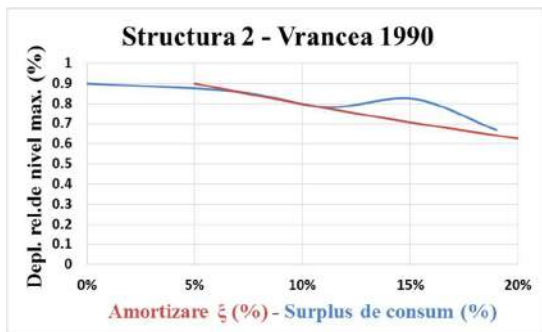


Figura 4.3-11 Structura 2. Vrancea 1990

Variația deplasării relative de nivel a structurilor față de nivelul de amortizare și de surplus de consum (rigiditate laterală) nu mai urmărește același tipar. Dacă în cazul acționării seismice cu cutremurele Focșani 1986 și Vrancea 1977, structura 1 era mai avantajată în reducerea răspunsului seismic prin ridicarea nivelului de rigiditate, în cazul cutremurului Vrancea 1990, diferența indusă de cele două stări (rigiditate laterală, amortizare adăugată) este aproape insesizabilă. Efectul de reducere a deplasărilor relative de nivel, produs de un nivel superior de amortizare adăugată este mai pronunțat în cazul structurii 2. În intervalul 7 ÷ 10% cele două grafice - *amortizare* și *surplus de consum* – față de deplasarea relativă de nivel – sunt aliniată, sugerând că efectul rigidizării laterale și a amortizării adăugate este identic.

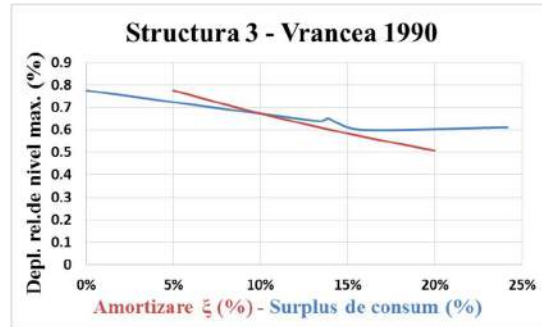


Figura 4.3-12 Structura 3. Vrancea 1990

Cea de-a treia structură oferă o concluzie mai clară în ceea ce privește superioritatea rigidizării laterale sau a amortizării adăugate în reducerea răspunsului seismic reprezentat de deplasarea relativă de nivel. Nivelul 10% al amortizării adăugate / surplus de consum reprezintă punctul de intersecție a celor două grafice, punct până la care creșterea secțiunilor transversale ale elementelor structurale este mai eficientă în reducerea deplasărilor relative de nivel decât amortizarea adăugată.

4.4 Echivalarea rigidității laterale cu amortizarea adăugată pe baza capacității de absorbție energetică

De la debutul abordării energetice în procesul de concepere și dimensionare a structurilor acționate seismic [9], tabloul energetic al răspunsului seismic a fost continuu dezvoltat [134], [37], [135], [11]. Cu toate acestea, folosirea conceptelor energetice în proiectarea structurilor acționate seismic rămâne un deziderat. Abordarea energetică a răspunsului seismic pe componenta analizei seismice este mult mai dezvoltată [68], [136], [137]. În acest context al analizei seismice, se înscrie Subcapitolul 4.4. prin procesul de echivalare a efectelor amortizării adăugate și, respectiv a creșterii rigidității laterale a structurii. Criteriul de echivalare a efectului amortizării adăugate cu efectul rigidizării laterale este – de această dată – capacitatea de absorbție energetică a structurii E_{ABS} . Orice structură acționată seismic are nevoie de un minimum de capacitate de absorbție a energiei seismice de input pentru ca structura să satisfacă criteriul de performanță seismică cerut [6], [22], [8].

Care sunt factorii care determină necesarul de capacitate de absorbție energetică a unei structuri? Așa cum este de așteptat, acest necesar este definit de magnitudinea acțiunii seismice, de structura însăși și de nivelul de performanță seismică impus structurii. Iată câteva exemple în care necesarul de capacitate de absorbție energetică este evidențiat în raport cu acțiunea seismică și cu structura însăși.

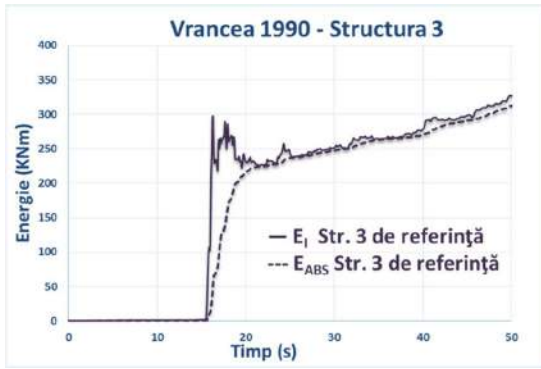


Figura 4.4-1 E_i și E_{ABS} a structurii 3 de ref. (Vrancea 1990)

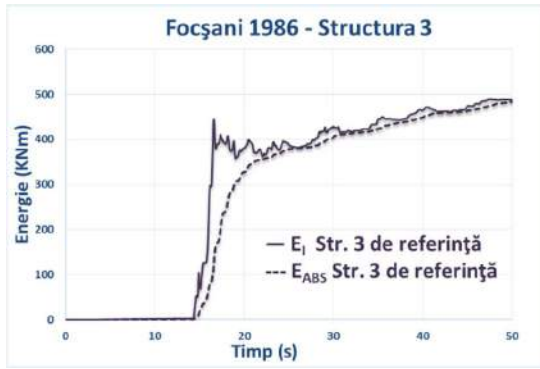


Figura 4.4-2 E_i și E_{ABS} a structurii 3 de ref. (Focșani 1986)

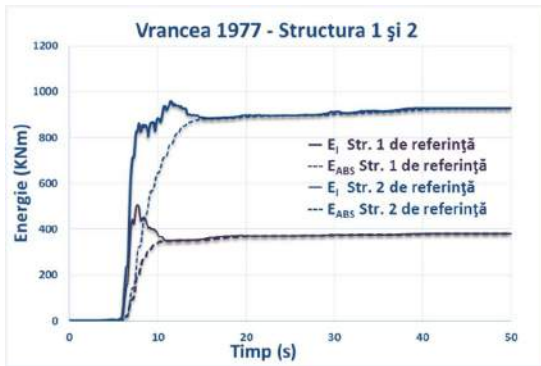


Figura 4.4-3 E_i și E_{ABS} a structurii 1 și 2 de ref.

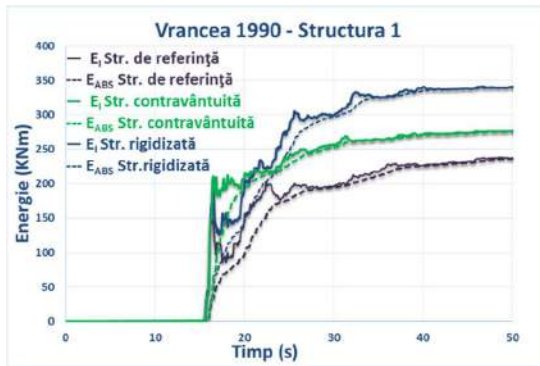


Figura 4.4-4 E_i și E_{ABS} a structurii 1- de ref., cv. și rig.

Dacă în aserțiunea de mai sus conceptul de *capacitate de absorbție energetică* este înlocuit cu, de exemplu, **deplasări relative de nivel**, se obțin bine cunoscutele reprezentări ale criteriilor de performanță existente.



Figura 4.4-5 Relația nivel de performanță seismică – intensitate seismică

Folosirea conceptului de capacitate de absorbție energetică permite echivalarea amortizării suplimentare cu rigidizarea laterală pe această bază nouă energetică. Efectul rigidizării laterale în termeni de deplasări laterale de nivel (relative sau absolute) este predictibil: creșterea rigidității laterale conduce la scăderea deplasărilor laterale de nivel. La fel de predictibil este și efectul amortizării adăugate: o fracțiune de amortizare critică mare înseamnă deplasări laterale mici. Care este, atunci efectul acestor două componente ale dualității amortizare versus rigiditate laterală exprimat în termeni de capacitate de absorbție energetică? Răspunsul la această întrebare constituie – în principal - obiectivul acestui Subcapitol 4.4. Rezultatele sunt prezentate grafic (Fig. 4.4-6 ÷ 4.4-14). Nivelul amortizării adăugate este reprezentat simplu prin fracțiunea de amortizare critică ξ . Pentru reprezentarea nivelului de rigidizare laterală a fost ales un criteriu economic, anume ”masă surplus”, definită ca procentul din masa totală a structurii de referință a surplusului de consum necesar rigidizării structurii.

Din nou, ipostazele structurale utilizate în reprezentarea echivalenței rigiditate laterală / amortizare adăugată sunt: structura de referință (cu fracțiunea de amortizare critică $\xi=5\%$), structurile cu amortizare adăugată ($\xi=10\%$, $\xi=15\%$ și $\xi=20\%$), structura contravântuită și structurile rigidizate prin secțiuni transversale crescute (Str.+, Str. A+, Str. B+ și Str. C+). Primele structuri a căror variație a capacității de absorbție a energiei induse este prezentată în paralel cu stările de amortizare adăugată / rigiditate laterală (surplus de consum), în efortul de a echivala aceste două stări din punct de vedere energetic sunt structurile acționate seismic de cutremurul Focșani 1986.

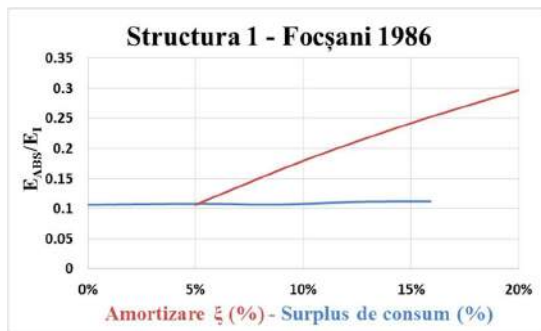


Figura 4.4-6 Structura 1 (Focșani 1986)

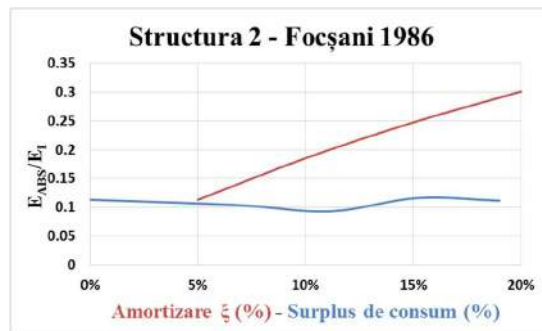


Figura 4.4-7 Structura 2 (Focșani 1986)

Variația capacității de absorbție energetică a structurilor 1, 2 și 3 față de surplusul de consum (rigiditate laterală) este aproape constantă (Fig. 4.4-6 ÷ 4.4-8). Progresul în răspunsul energetic al structurilor rigidizate suplimentar este aproape inexistent. În cazul structurii 3, evoluția este chiar negativă – rigiditatea laterală conduce la reducerea raportului E_{ABS}/E_I . Prin echiparea cu amortizarea adăugată răspunsul energetic al structurilor se amplifică proporțional

cu nivelul de amortizare. În toate cele trei figuri se observă intersecția graficelor *amortizare* și *surplus de consum* aproximativ la valoarea 5%, aceasta fiind valoarea până la care rigidizarea laterală ar fi mai eficientă decât amortizarea adăugată. Lipsa unui punct efectiv de intersecție este cauzată de considerarea nivelului 5% de amortizarea adăugată, ca nivel de amortizare inerentă a structurii.

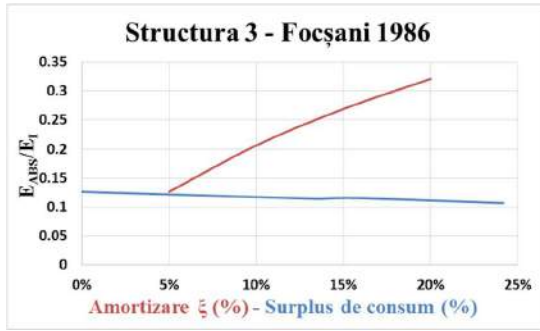


Figura 4.4-8 Structura 3 (Focșani 1986)

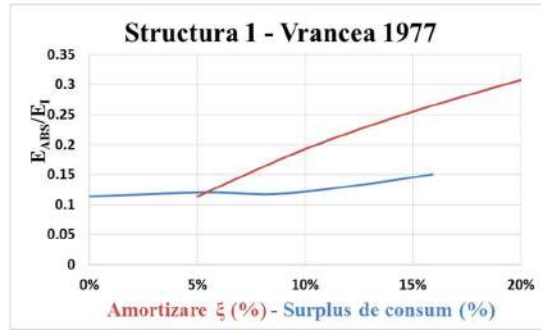


Figura 4.4-9 Structura 1 (Vrancea 1977)

În cazul structurilor acționate seismic de cutremurul Vrancea 1977, variația capacității de absorbție a energiei induse față de rigiditatea laterală, reprezentată în acest studiu de surplusul de consum, se modifică. Evoluția acestui grafic (*surplus de consum*) nu mai este negativă pentru nici una dintre cele trei structuri. Cu toate acestea, se observă o diferență considerabilă între panta graficului *surplus de consum* și graficului *amortizare*. Amplificarea prin amortizare adăugată a capacității de absorbție a energiei induse se produce mult mai pronunțat, prin creșterea nivelului de amortizare. De asemenea, intersecția celor două grafice se modifică. Astfel, se consideră un nivel de până la 6% al surplusului de consum, mai eficient în creșterea capacității de absorbție a energiei decât amortizarea adăugată.

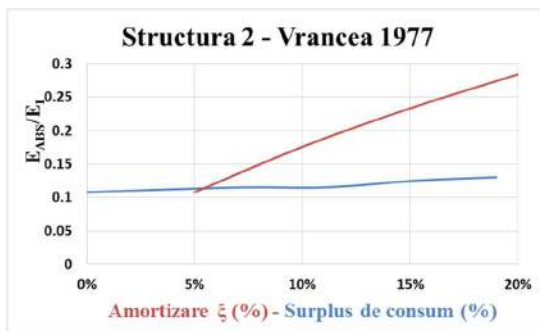


Figura 4.4-10 Structura 2 (Vrancea 1977)

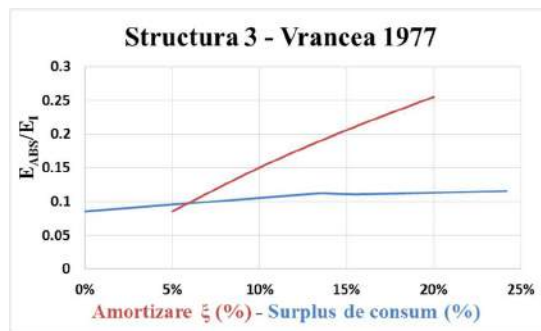


Figura 4.4-11 Structura 3 (Vrancea 1977)

În continuare se prezintă structurile acționate seismic de cutremurul Vrancea 1990:

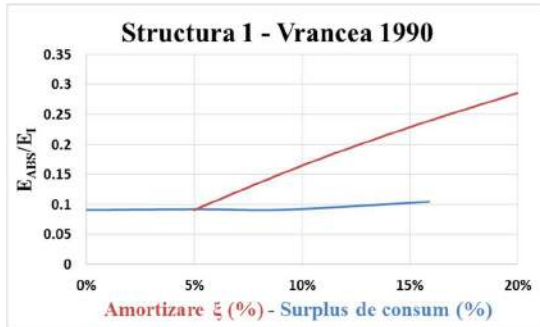


Figura 4.4-12 Structura 1 (Vrancea 1990)

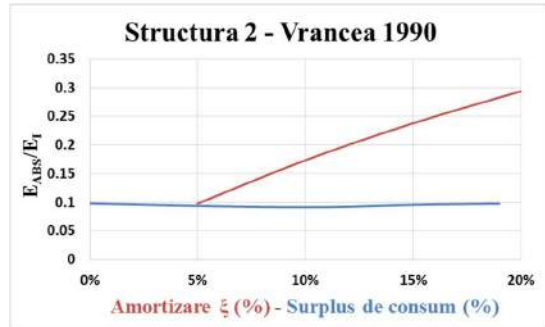


Figura 4.4-13 Structura 2 (Vrancea 1990)

Similar structurilor acționate de Focșani 1986, în cazul Vrancea 1990, cele trei structuri prezintă o evoluție a graficului *surplus de consum* constantă sau chiar negativă. Variația capacității de absorbție a energiei induse prin creșterea rigidității laterale (surplusului de consum) prezintă o înclinație sensibilă spre sensul pozitiv – amplificarea raportului E_{ABS}/E_I – în timp ce în cazul structurii 2, variația este constantă. În ceea ce privește structura 3, creșterea rigidității laterale a structurii – și deci a consumului material – conduce la reducerea capacității de absorbție a energiei induse.

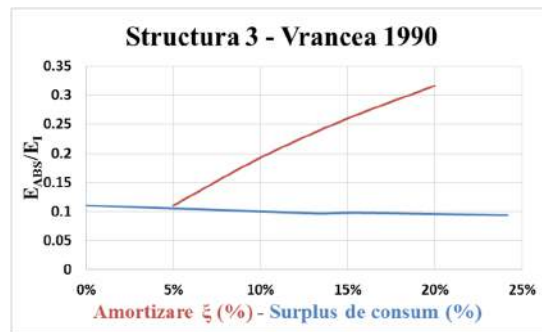


Figura 4.4-14 Structura 3 (Vrancea 1990)

La toate cele trei structuri, însă, se observă creșterea capacității de absorbție a energiei pe măsură ce nivelul de amortizare este ridicat.

Îndeplinirea obiectivelor Capitolului 4. Capitolul 4 a fost conceput să coreleze rezultatele obținute prin analizele seismice efectuate pentru extragerea răspunsului seismic tradițional și energetic. În celelalte două Capitole se definesc pe rând stările de rigiditate laterală și de amortizare adăugată prin parametri aparținând celor două abordări – tradițională și energetică – iar concluziile enunțate se formulează doar prin prisma acestor ipoteze. Studiile numerice realizate în Capitolul 4 sunt menite să îmbine rezultatele deja obținute pentru elaborarea unor concluzii mai complexe. În acest context, primul obiectiv propus și îndeplinit a fost: compararea efectelor rigidității laterale și a amortizării adăugate asupra răspunsului seismic al structurii exprimat atât în termeni tradiționali (deplasări laterale, forțe tăietoare seismice de

bază) cât și în termeni energetici. Abordarea economică tratată în teză cuprinde formularea și compararea în termeni economici a efectelor rigidizării laterale și amortizării adăugate, alături de o succintă incursiune în domeniul eficienței economice a structurilor acționate seismic. Nu în ultimul rând, unul dintre principalele obiective ale tezei - echivalarea rigidității laterale cu amortizarea adăugată – a fost îndeplinit prin considerarea a două criterii: criteriul deplasărilor laterale relative de nivel și criteriul capacității de absorbție energetică.

Capitolul 5. Contribuții și direcții viitoare de cercetare

5.1 Concluzii privind realizarea obiectivelor

Așa cum s-a arătat în Capitolul 1 dezvoltarea tezei urmărește realizarea a trei obiective principale și a trei obiective colaterale. În continuare, autorul expune câteva considerente care evidențiază rezolvarea și modul de rezolvare a acestor obiective.

Referitor la obiectivele principale

1. Echivalarea rigidității laterale cu un nivel de amortizare vâscoasă prin componente tradiționale ale răspunsului seismic. Având în vedere atât expresivitatea deosebită a deplasărilor laterale induse seismic cât și numeroasele referiri din normativele de proiectare la aceste deplasări, un prim criteriu de echivalare folosit îl constituie deplasările laterale relative de nivel. Prin analize numerice de tip *time-history* conduse pe un set de trei structuri (6 niveluri, 9 niveluri, 12 niveluri) acționate de trei cutremure au putut fi echivalate câteva stări de rigiditate laterală cu stări de amortizare vâscoasă adăugată. Rigiditatea laterală a structurilor analizate este conferită prin secțiunile transversale ale elementelor structurale (stâlpi, grinzi).
2. Având în vedere abordarea energetică a răspunsului seismic adoptată în teză, un alt criteriu de echivalare a rigidității laterale cu un nivel de amortizare vâscoasă adăugată – propus în teză – îl constituie capacitatea de absorbție (a energiei seismice induse) a structurii; înzestrarea – încă din activitatea de proiectare – a unei structuri cu capacitate de absorbție energetică este o cerință fundamentală a proiectării structurilor amplasate în zone seismice. O parte importantă a prevederilor normative de proiectare a acestor structuri asociază capacitatea de absorbție energetică cu comportarea post-elastică a structurilor. Amortizarea adăugată constituie o tehnologie modernă de conferire a unei capacități adecvate de absorbție a energiei seismice induse structurii. Autorul tezei consideră că prin amortizare adăugată poate fi evitată comportarea în domeniul plastic. În mod curent și tradițional, asigurarea comportării exclusiv elastice se face prin conferirea unei stări de rigiditate laterală ridicate. Acesta este contextul în care autorul tezei a considerat necesar și util să compare rigiditatea laterală cu amortizarea adăugată folosind drept criteriu capacitatea de absorbție a energiei seismice. Dacă din punct de vedere al deplasărilor laterale efectele rigidizării laterale sunt simplu și ușor de intuit, influența stării de rigiditate asupra capacității de absorbție a energiei induse seismic

este dificil de intuit și necesită analize structurale specifice. Autorul tezei consideră că un astfel de demers (relaționarea rigidității laterale și a capacității de absorbție a energiei seismice) este, în același timp, o contribuție la cunoașterea mai extinsă și mai profundă a răspunsului seismic.

3. Rigidizarea laterală a unei structuri multi-etajate implică nu numai modificări ale componentelor răspunsului seismic ci și consumuri materiale (de oțel, în cazurile analizate) generate de creșterea dimensiunilor secțiunilor transversale ale elementelor structurale sau de echipare cu sisteme de contravântuiri. Teza și-a propus și cuprinde o scurtă incursiune în acest domeniu. Sunt puse, astfel, în evidență consumurile materiale suplimentare asociate cu starea de rigiditate laterală a structurii. Pentru a evita exprimarea (considerată de autor nerelevantă) în costuri, creșterea consumului de oțel a fost relaționată cu un parametru formal care exprimă rigiditatea laterală. Rezultatele numerice obținute (Subcapitolul 4.2.1) evidențiază în mod expresiv efectul consumului de oțel asupra rigidității laterale.

Referitor la obiectivele secundare

Îndeplinirea obiectivelor principale a necesitat câteva dezvoltări ale unor concepte cunoscute dar care nu pot fi considerate tradiționale în proiectarea structurilor amplasate în zone seismice. Astfel, autorul a considerat necesară o prezentare concisă a abordării analitice a amortizării vâscoase suplimentare. În acest context a fost evidențiat efectul de disipare – prin amortizare adăugată – a energiei seismice de input a unei structuri. Starea energetică a unei structuri acționate seismic a constituit, la rândul său, un obiectiv secundar dar nu mai puțin important. Această stare este studiată – prin analize structurale – atât din punct de vedere al dependenței sale de nivelul de amortizare vâscoasă cât și din punct de vedere al stării de rigiditate laterală. Starea energetică este, apoi, relaționată cu nivelul de amortizare adăugată prin dezvoltarea – în acest context – a conceptului de capacitate de absorbție energetică.

5.2 Contribuții originale

Dintr-un anumit punct de vedere, teza se constituie într-o abordare comparativă a două opțiuni curente în conceperea și dimensionarea structurilor amplasate în zone seismice (rigiditate laterală sau amortizare adăugată). Dezvoltările teoretice și rezultatele numerice conținute în teză gravitează în jurul acestei abordări comparative. Compararea stării de rigiditate laterală cu starea de amortizare adăugată a necesitat, la rândul său, adoptarea unor criterii de comparație. În acest context – definit de abordarea comparativă și de criteriile de

comparație adoptate – autorul consideră că teza include câteva rezultate care pot fi considerate contribuții originale la dezvoltarea domeniului studiat. Autorul consideră cu toată onestitatea că următoarele rezultate pot fi considerate contribuții originale:

1. Dezvoltarea conceptului de capacitate de absorbție energetică relativ la (în funcție de) rigiditatea laterală. Abordarea unei metodologii care cuprinde studii numerice comparative asupra unui set de structuri metalice multi-etajate, acționate seismic, necesită înțelegerea parametrilor utilizați pentru exprimarea răspunsului seismic în ambele ipostaze analizate – rigiditate laterală și amortizare adăugată. Dacă efectul amortizării adăugate este cuprins în componenta E_{AD} – energie disipată prin echipamente de protecție seismică – a bilanțului energetic, definirea efectului rigidizării laterale asupra distribuției energiei în structura analizată, este mai complexă. Încadrarea analizelor seismice în domeniul elastic rezultă în excluderea componentei bilanțului energetic asociată deformațiilor în domeniul plastic, anume energia histeretică $E_{S,h}$, capacitatea de absorbție energetică a structurilor depinzând exclusiv de energia disipată prin amortizare inerentă E_D și prin dispozitive de protecție seismică E_{AD} .
2. Studii comparative referitoare la capacitatea de absorbție energetică conferită prin rigiditate și, respectiv, prin amortizare adăugată. Alături de studiile comparative care exprimă răspunsul seismic tradițional prin parametri des întâlniți în literatura de specialitate – forța tăietoare seismică de bază, deplasarea relativă de nivel, accelerație laterală de nivel – se definește starea energetică a structurilor solicitate seismic, într-o manieră care permite vizualizarea efectelor celor două metode principale de protecție seismică abordate în teză: rigidizarea laterală și amortizarea adăugată. În introducerea studiilor numerice prin care se reprezintă grafic starea energetică a structurilor analizate sunt prezentate teoretic elementele bilanțului energetic. Descrierea stării energetice aduce o completare importantă tradiționalelor analize seismice, prin surprinderea efectului cumulativ al componentelor răspunsului seismic.
3. Cuantificarea contribuției stării de rigiditate asupra capacității de absorbție energetică prin coeficientul de modificare a capacității de absorbție energetică propus. Formularea parametrică a opțiunilor rigiditate laterală versus amortizare adăugată este necesară pentru a se constitui în instrumente practice în cadrul proiectării structurilor metalice multi-etajate amplasate în zone seismice. Astfel, pentru a completa majoritatea studiilor de specialitate care se referă la indici de

degradare, și implicit la comportarea post-elastică a structurilor, se propune un parametru care să măsoare starea energetică în domeniul elastic. Conceptul de capacitate de absorbție energetică a fost asociat cu cele două opțiuni, rezultând parametrul C_a – coeficientul de modificare a capacității de absorbție energetică prin amortizare – și parametrul C_r – coeficientul de modificare a capacității de absorbție energetică prin rigidizare. Exprimarea capacității de absorbție energetică E_{ABS} a structurii nu este suficientă pentru descrierea stării energetice a unei structuri având în vedere că și cantitatea de energie E_I indusă structurii se modifică odată cu E_{ABS} . În aceste condiții, parametri C_a și C_r propuși în forma E_{ABS}/E_I , pot exprima mai fidel variația stării energetice în raport cu acțiunea seismică și, în același timp, cu starea de rigiditate / amortizare a structurii.

4. Studii comparative privind eficiența economică a rigidizării structurii vs. amortizarea adăugată. Informarea incompletă cu privire la efectele economice - costuri - ale celor două opțiuni, conduce la alegerea cu precădere a rigidității laterale față de amortizare suplimentară, ca metodă de protecție seismică. Echiparea unei structuri cu elemente de disipare a vibrațiilor reprezintă o tehnologie nouă, puțin cunoscută din punctul de vedere al costurilor implicate. Cu atât mai puțin dezvoltată este instruirea profesională a participanților la activitatea de proiectare, referitoare la adecvarea seismică a structurilor prin rigidizare laterală. Astfel, se realizează o analiză economică comparativă, succintă, a costurilor implicate în proiectarea anti-seismică a structurilor metalice multi-etajate pentru a oferi un tablou economic asociat celor două opțiuni (rigidizare vs. amortizare). În teza de doctorat, aceste mărimi - costurile aduse de echiparea cu rigidizare laterală - sunt tratate prin noțiunea **costuri de investiții**, care se traduc în consumuri de material, relaționate cu valorile de referință – structurile neprotejate seismic. Evidențierea implicațiilor economice derivate din aplicarea unui nivel superior de rigiditate laterală este menită să releve efectele „colaterale” ale rigidizării, insuficient aprofundate în procesul de instruire al inginerilor constructori. Abordarea economică a dualității rigidizare vs. amortizare, astfel întreprinsă și rezultatele numerice obținute constituie o bază pentru dezvoltări ulterioare referitoare la costurile totale (inițiale și de mentenanță) a celor două opțiuni.
5. Echivalarea – pe baza capacității de absorbție energetică – a rigidității laterale cu amortizarea adăugată. Efectul amortizării asupra răspunsului seismic al structurilor este un subiect intens tratat în literatura de specialitate. Rezultatele obținute au fost

transformate în metode practice de determinare a capacității de disipare a vibrațiilor la care este supusă o structura acționată seismic. Acest instrument – amortizarea echivalentă – poate fi utilizat pentru determinarea fracțiunii de amortizare critică ξ , atât la nivel de element cât și la nivel de structură. În acest context al analizei seismice, se încadrează procesul de echivalare a efectelor amortizării adăugate și, respectiv a creșterii rigidității laterale a structurii. Valoarea nivelului de amortizare structural deja determinată prin procedee cunoscute și implementate, este asociată stării de rigiditate, reprezentată prin parametrul **surplus de consum**. Procentul adaosului de material (oțel) din totalul structurii de referință, este un indicator al nivelului de rigiditate laterală suplimentară impus structurii. În teza de doctorat se tratează două criterii de echivalarea a efectului rigidizării laterale cu cel al amortizării liniar-vâscoase, doar unul fiind cu caracter energetic:

- Deplasarea relativă de nivel – tradiționalul criteriu, folosit în proiectarea anti-seismică, și un important indicator al performanței structurale.
- Capacitatea de absorbție energetică a structurii E_{ABS} - orice structură acționată seismic are nevoie de un minimum de capacitate de absorbție a energiei seismice de input pentru ca structura să satisfacă criteriul de performanță seismică cerut [6], [22], [8].

Stările de rigiditate, respectiv de amortizare sunt reprezentate prin variația acestor parametri în funcție de:

- a. Frațiunea de amortizare critică ξ , egală cu 5% în cazul structurii de referință, și 10%, 15%, respectiv 20% pentru structurile cu amortizare adăugată.
- b. Surplusul de consum al structurilor rigidizate suplimentar prin creșterea secțiunilor transversale, rezultând astfel mai multe niveluri de rigidizare: Str. +, Str. A+, Str. B+ și Str. C+.

Echivalarea pe bază energetică, a structurilor protejate seismic prin amortizare adăugată și prin rigidizare laterală, este precedată de acest criteriu tradițional (deplasarea relativă de nivel), tocmai pentru evidențierea insuficienței acestuia în proiectarea structurilor acționate seismic. Un exemplu al reprezentării grafice al procedurii de echivalare a celor două stări – rigiditate laterală și amortizare adăugată – este cel al structurii 3 – cu 5 deschideri și 12 niveluri – solicitată de cutremurul Vrancea 1977:

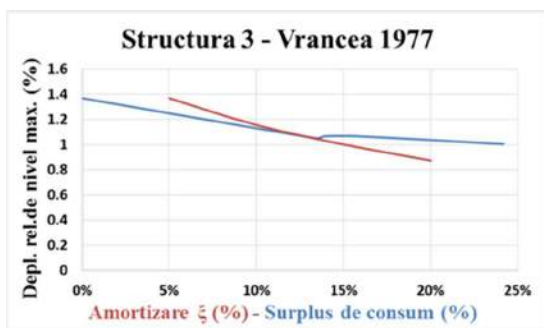


Figura 4.3-9 Structura 3 (Vrancea 1977)

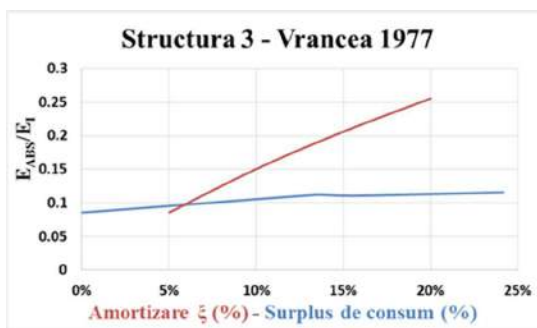


Figura 4.4-11 Structura 3 (Vrancea 1977)

Cei doi parametri utilizați în analizele de echivalare a stării de rigiditate laterală – amortizare adăugată, se diferențiază din punctul de vedere al eficientizării răspunsului seismic. Obiectivul creșterii nivelului de rigiditate și a nivelului de amortizare se traduce în minimizarea deplasării relative de nivel și maximizarea capacității de absorbție a energiei induse E_{ABS}/E_I . Se constată dependența nivelului de **amortizare / surplus de consum** de criteriul ales. Punctul de intersecție al celor două grafice indică valoarea 13% a fracțiunii de amortizare critică / procent surplus de consum, nivel de la care amortizarea adăugată este mai eficientă în reducerea deplasării relative de nivel. Utilizarea parametrului energetic - E_{ABS}/E_I – indică valoarea fracțiunii de amortizare critică 6%, suficientă pentru creșterea capacității de absorbție a energiei induse la nivelul adus de suplimentarea consumului de material - deci a rigidității - cu 6%. Iată un exemplu prin care se constată nevoia utilizării parametrilor energetici, alături de cei tradiționali, pentru înțelegerea deplină a efectelor celor două opțiuni folosite în proiectarea structurilor amplasate în zone seismice: rigiditatea laterală și amortizarea adăugată.

5.3 Direcții de cercetare viitoare

Pe parcursul cercetării întreprinse, materializate în teza de doctorat, odată cu îndeplinirea obiectivelor principale și secundare, autorului i s-au deschis noi ferestre de interes în domeniul structurilor multi-etajate acționate seismic. Abordarea dualității rigiditate versus amortizare, poate fi continuată prin considerarea altor premize, cu un nivel de complexitate mai ridicat. Extinderea metodologiei de cercetare prin introducerea unei nivel de diversitate mai înalt al structurilor și accelerogramelor analizate poate conduce la concluzii mai relevante și posibile aplicații ale acestora. În aceste condiții, se enunță următoarele obiective ca viitoare preocupări ale autorului pentru continuare cercetării:

1. Studii privind eficiența rigidizării / amortizării în funcție de înălțimea structurii. Considerarea unei game de structuri mai diversificate în ceea ce privește configurarea geometrică este o condiție implicită pentru continuarea cercetării. Evoluția parametrilor răspunsului seismic, tradiționali sau energetici, s-a dovedit deja dependentă de variabila dimensională a structurilor. Având în vedere nevoia crescândă de structuri cu regim de înălțime ridicat, concentrarea studiilor numerice asupra acestei categorii ar putea conduce la concluzii utile pentru proiectarea anti-seismică.
2. Extinderea cercetării cuprinse în teză asupra structurilor multi-etajate spațiale. Dimensionarea spațială a structurilor analizate ridică nivelul de acuratețe al studiilor numerice ce tratează rigiditatea laterală în condiții de hazard seismic. Considerarea efectului torsional, de exemplu, conduce la variația parametrilor ce definesc nivelul de rigiditate structural. De asemenea, dispunerea acțiunii seismice pe două direcții, N-S și E-V, ridică nivelul de precizie al analizelor *time-history*.
3. Extinderea studiilor întreprinse prin considerarea neliniarității geometrice în analizele seismice. Un efect important al rigidității laterale se traduce – în analizele structurale – prin luarea în considerare a neliniarității geometrice (analize conduse pe forma deformată a structurii) și, implicit, a influenței forței axiale asupra stării de rigiditate. Impactul extinderii domeniului analitic este sesizabil atât în cadrul parametrilor tradiționali cât și a celor energetici.
4. Aprofundarea analizelor economice: costuri comparative a amortizării vs. rigidizării. În teza de doctorat, autorul nu a considerat necesar implicarea termenilor financiari (monetari) în analiza economică a structurilor metalice multi-etajate, acționate seismic. În continuarea acestei cercetări, însă, calculul investiției inițiale, cât și a costurilor de mentenanță, rezultat din proiectarea anti-seismică a structurilor în cele două ipostaze – rigiditate laterală și amortizare adăugată – reprezintă o componentă importantă a viitoarei activități de cercetare.

Bibliografie

1. Calvi GM, Priestley MJN, Kowalsky MJ. Displacement-Based Seismic Design of Structures. Proceedings of the 3rd National Conference on Earthquake Engineering and Engineering Seismology. Athena, Greece;
2. Hofmayer C, Millera C, Wang Y, Costello J, Nuclear S, Commission R. Displacement-Based Seismic Design Methods. International symposium on seismic evaluation of existing nuclear facilities Book of invited and contributed papers. Vienna, Austria; 2003. p. 1–10.
3. Moehle JP. Displacement-Based Seismic Design Criteria. Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco, Mexico; 1996.
4. Priestley N, Calvi M. Displacement-Based Seismic Design of Bridges. 1st US-Italy Seismic Bridge Workshop. Pavia, Italy;
5. Sasani M, Anderson DL. Displacement-Based Design versus Force-Based Design for Structural Walls. Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco, Mexico; 1996.
6. Ministerul Transporturilor Construcțiilor și Turismului. P 100-1/2006 Cod de proiectare seismică - Prevederi de proiectare pentru clădiri. 2006 p. 1–232.
7. ASCE. Federal Emergency Management Agency - Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings 356.
8. European Committee for Standardization. Eurocod 8: Design of structures for earthquake resistance. 2003 p. 1–135.
9. Housner GW. Limit design of structures to resist earthquakes. Proceedings of the 1st World Conference on Earthquake Engineering. Berkeley, California; 1956.
10. Bertero V, Teran-Gilmore A. Use of energy-concepts in earthquake resistant analysis and design: issues and future directions. Proceedings of the 8th Seminary of Latin-american Seismic Resistant Engineering. Merida, Venezuela;
11. Fajfar P, Vidic T. Consistent inelastic design spectra Hysteretic and input energy. Earthq Eng Struct Dyn. 1994;23:523–37.
12. Mitropoulou CC, Lagaros ND, Papadrakakis M. Building Design Based on Energy Dissipation: A Critical Assessment. Bull Earthq Eng. 2010;8(6):1375–96.
13. Jun T, Zhijun D. Research on energy spectrum of elastic SDOF. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China; p. 1–6.
14. Amiri GG, Darzi GA, Khanzadi M. Earthquake Duration and Damping Effects on Input Energy. Int J Civ Eng. 2007;5(1):14–29.

15. Chen G, Soong TT. An Energy Approach to Seismic Analysis and Design of Secondary Systems - Technical Report NCEER-93-0014. Journal of. 1993.
16. Chou C-C, Uang C-M. Evaluating Distribution of Seismic Energy in Multistory Frames. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada; 2004. p. 1–11.
17. Uang C-M, Bertero V V. Evaluation of seismic energy in structures. Earthq Eng Struct Dyn. 1990;19:77–90.
18. Crouse CB. Energy Dissipation in Soil-Structure Interaction. Proceedings of the 12th World Conference of Earthquake Engineering [Internet]. Auckland, New Zealand; 2001. p. 235–59. Available from: <http://earthquakespectra.org/doi/abs/10.1193/1.1586174>
19. Ghodrati-Amiri G, Abdollahzadeh-Darzi G. Damping effect on elastic input energy. Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Thessaloniki, Greece;
20. Kelly T. In-Structure Damping and Energy Dissipation. 2001.
21. Surahman A, Merati W. Input energy based seismic design code. 10th World Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam; 1992.
22. ASCE. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings - FEMA 274. 1997.
23. Ali MM. The Skyscraper : Epitome of Human Aspirations. Proceedings of the 7th World Congress of the Council on Tall Buildings and Urban Habitat: Renewing the Urban Landscape. . Chicago, IL: Council on Tall Buildings and Urban Habitat; 2005.
24. Jayachandran P. Design of Tall Buildings: Preliminary Design and Optimization. National Workshop on High- Rise and Tall Buildings. University of Hyderabad, India; p. 1–20.
25. Khan FR. Recent structural systems in steel for high-rise buildings. Proceedings of the British Constructional Steelwork Association Conference on Steel in Architecture. London: British Constructional Steelwork Association; 1969.
26. Kelly TE. Improving Seismic Performance: Add Stiffness or Damping? Bull New Zeal Soc Earthq Eng. Palmerston North; 2008;41(1):24–30.
27. Standards New Zealand: Structural Design Actions AS-NZS 1170. Parts 0, 1, 2, 3 & 5. 2005;
28. Brundtland G. Report of the World Commission on Environment and Development: Our CommonFuture. 1987.
29. Bo L, Migkui X, Ming L. Distribution of Earthquake Total Input Energy of Structures. J Chongqing Jianzhu Univ. 1996;2.

30. Donghui W, Fengming S. Application of Low Yield Point Steel in Design of Earthquake Resistant Buildings. *Baosteel Technol.* 2007;2.
31. Manfredi G. Evaluation of Seismic Energy Demand. *Earthq Eng Struct Dyn.* 2001;30(4):485–99.
32. Mingkui X, Bo L, Shaoliang B. Analysis of the Total Energy and Its Influencing Factors for Seismic Structures. *J Chongqing Jianzhu Univ.* 1996;2.
33. Sucuoglu H, Nurtug A. Earthquake ground motion characteristics and seismic energy dissipation. *Earthq Eng Struct Dyn.* 1995;24(9):1195–213.
34. Wenbin QJL. Displacement based design methodology for building structures. *Build Struct.* 2001;4.
35. Wu C-J. Anti-earthquake structure insulating the kinetic energy of earthquake from buildings. 1989.
36. Zhou Y, Zhou F-L, Tong X. Research and development of structural seismic design based on energy method. *Earthq Eng Eng Vib.* 1999;4.
37. Aiken ID, Nims DK, Whittaker AS, Kelly JM. Testing of Passive Energy Dissipation Systems. *Earthq Spectra - Earthq Res Inst Calif.* 1993;9(3).
38. Diamakogianni D, Dougka G, Vayas I, Karydakis P. Seismic Behaviour of Innovative Energy Dissipation Systems Fuseis 1-2. *COMPdyn 2013, 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering.* Kos Island, Greece; 2013.
39. Choi H, Kim J. Evaluation of seismic energy demand and its application on design of buckling-restrained braced frames. *Struct Eng Mech.* 2009 Jan 10;31(1):93–112.
40. Leger P, Dussault S. Seismic-Energy Dissipation in MDOF structures. *J Struct Eng.* 1992;118(5):1251–69.
41. Hangan S, Crainic L. *Concepte si metode energetice in Dinamica Constructiilor.* Editura Ac. 1980.
42. Simion Moraru. *Comportarea constructiilor la seisme.* Bucuresti: Editura tehnica; 1989.
43. Macioce P. Viscoelastic Damping 101. *Sound Vib.* 2003;1–3.
44. DeSilva CW. *Vibration, damping, control and design.* New-York: CRC Press; 2007.
45. Rodríguez MM. *Analysis of Structural Damping.* Lulea University of Technology; 2006.
46. Chopra AK. *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering.* Berkley;

47. Beards CF. Engineering Vibration Analysis with Application to Control Systems. Arnold E, editor. 1995.
48. Chen JT, You DW. Hysteretic damping revisited. *Adv Eng Softw.* 1997;28(3):165–71.
49. Lesieutre GA. Damping in Structural Dynamics. Sons JW&, editor. 2010.
50. Devices T. <http://taylordevices.com/dampers-seismic-protection.html>.
51. Chaudhuri SRAY, Hutchinson TC. Distribution of Peak Horizontal Floor Acceleration for Estimating Nonstructural Element Vulnerability. Proceedings of 13 th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada;
52. Elenasa A, Meskouris K. Correlation study between seismic acceleration parameters and damage indices of structures. *Eng Struct.* 23(6):698–704.
53. Reinoso E, Miranda E. Estimation of floor acceleration demands in high-rise buildings during earthquakes. *Struct Des Tall Spec Build.* 14(2):107–30.
54. BSSC. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures (FEMA 450). Washington, D.C., USA; 2003.
55. ASRO. Eurocod 3: Proiectarea structurilor de otel. SR EN 1993-1-1-2006. 2006.
56. Akkar S, Yazgan U, Gülkan P. Drift Estimates in Frame Buildings Subjected to Near-Fault Ground Motions. *J Struct Eng.* 2005;131(7):1014–24.
57. Macrae GA, Kimura Y, Roeder C. Effect of Column Stiffness on Braced Frame Seismic Behavior. *J Struct Eng.* 2004;130(3):381–91.
58. Miranda E, Reyes CJ. Approximate Lateral Drift Demands in Multistory Buildings with Nonuniform Stiffness. *J Struct Eng.* 2002;128(7):840–9.
59. Peköz HA. Lateral Drift of Reinforced Concrete Frames with Stiffness and Strength Degradation Subjected to Strong Ground Motions. ProQuest; 2007.
60. Bhattacharya S., Chakraborty S. Estimation of storey shear of a building with Mass and Stiffness variation due to Seismic excitation. *Int J Civ Struct Eng.* 2010;1(3):635–43.
61. Cimellaro GP. Simultaneous stiffness–damping optimization of structures with respect to acceleration, displacement and base shear. *Eng Struct.* 2007;29(11):2853–70.
62. Sigmund V, Guljas I, Hadzima-Nyarko M. Base Shear Redistribution Between the R/C Dual System Structural Components. Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China;
63. Dyke SJ, Spencer BF, Quast P, Sain MK, Jr. DCK, Soong TT. Acceleration Feedback Control of MDOF Structures. *J Eng Mech.* 122(9):907–18.

64. Shahram Taghavi, Miranda E. Response Assessment of Nonstructural Building Elements. 2003.
65. Taghavi-Ardakan S, Miranda E. Probabilistic Seismic Assessment of Floor Acceleration Demands in Multi-Story Buildings.
66. Sain MK, Won C-H, Spencer BF, Liberty SR. Cumulants and risk-sensitive control: a cost application to seismic protection of structures. *Adv Dyn Games Appl.* 2000;5:427–59.
67. Miranda E, Aslani H, Taghavi S. Assessment of Seismic Performance in Terms of Economic Losses. *Proceedings of the International Workshop on performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation.* Bled, Slovenia; 2004. p. 149–61.
68. Hirokazu Iemura. Control of earthquake energy partitioning in base isolated and dynamically damped structures. *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering.* Tokyo, Japan;
69. Akiyama H. Earthquake resistant design based on the energy concept. *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering.* Tokyo-Kyoto, Japan; p. 905–10.
70. Hao T-Y. Energy of Earthquake Response - Recent Developments. *ISET J Earthq Technol.* 2002;39(1-2):21–53.
71. Kuwamura H, Kirino Y, Akiyama H. Prediction of earthquake energy input from smoothed fourier amplitude spectrum. *Earthq Eng Struct Dyn.* 23(10):1125–37.
72. Ordaz M, Huerta B, Reinoso E. Exact computation of input-energy spectra from Fourier amplitude spectra. *Earthq Eng Struct Dyn [Internet].* 2003 Apr 10 [cited 2014 Oct 7];32(4):597–605. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/eqe.240>
73. Estes KR, Anderson JC. Earthquake Resistant Design Using Hysteretic Energy Demands for Low Rise Buildings. *13 th World Conference on Earthquake Engineering Proceedings.* Vancouver, Canada;
74. Decanini LD, Mollaioli F. Formulation of elastic earthquake input energy spectra. *Earthq Eng Struct Dyn.* 27(12):1503–22.
75. Kalkan E, Kunnath SK. Relevance of Absolute and Relative Energy Content in Seismic Evaluation of Structures. *Adv Struct Eng.* 2008;11(1):17–34.
76. Reinhorn AM. *Energy Concepts in Earthquake Engineering.* 2009.
77. Mazzolani F, Gioncu V. *Seismic Design of Steel Structures.* CRC Press. 2013.
78. Delia SM. *Structuri Metalice Multietajate Echipate cu Masa Adaugata. O Abordare Energetica.* Universitatea Tehnica Cluj-Napoca; 2014.

79. Matteis G De, Mazzolani FM, Panico S. Pure Aluminum Steel Shear Panels as Passive Control System for Seismic Protection of Steel Moment Resisting Frames. STESSA Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas. Naples, Italy; 2003. p. 599–609.
80. Leelataviwat S, Saewon W, Goel SC. An Energy Based Method for Seismic Evaluation of Structures. Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China;
81. Lee S-S, Goel SC, Chao S-H. Performance-Based Seismic Design of Steel Moment Frames Using Target Drift and Yield Mechanism. Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada;
82. Chao S, Goel SC. Performance-Based Seismic Design of EBF Using Target Drift and Yield Mechanism as Performance Criteria. 2005.
83. Dasgupta P, Goel SC, Parra-Montesinos G, Tsai KC. Performance-Based Seismic Design and Behaviour of a Composite Buckling Restrained Braced Frame. Proceedings of 13 th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada;
84. Bojórquez E, Reyes-Salazar A, Teran-Gilmore A, Ruiz SE. Energy-based damage index for steel structures. Steel Compos Struct. 2010;10(4):343–60.
85. Barroso LR. Performance Evaluation of Vibration Controlled Steel Structures Under Seismic Loading. Stanford University;
86. Bozorgnia Y, Bertero V V. Improved Shaking and Damage Parameters for Post-Earthquake Applications. Proceedings of the SMIP01 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data,. Los Angeles, CA; 2001. p. 1–22.
87. Cornwell P, Doebling SW, Farrar CR. Application of the Strain Energy Damage Detection Method to Plate-like Structures. Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference. Orlando, FL; p. 1312–8.
88. Teran-Gilmore A. Energy Concepts and Damage Indices. EERC-CUREe Symposium in Honor od Vitelmo V Bertero. Berkley, CA;
89. Prahlad P, Manish S, Pankaj A. Damage Indices using Energy Criterion for Seismic Evaluation of Steel Frame Buildings. 15th World Conference of Earthquake Engineering. Lisboa, Portugal; 2012.
90. Sadeghi K. Energy Based Structural Damage Index Based on Nonlinear Numerical Simulation of Structures Subjected to Oriented Lateral Cyclic Loading. Int J Civ Eng. 2011;9(3):155–64.
91. Shen J, Akbas B. Seismic Demand in Steel Moment Frames. J Earhtquake Eng. 1999;3(4).
92. Prodan O, Ladar I, Alexa P. Seismic Performances of Steel Structures with Supplemental Damping. Numerical Studies. Ohrid, Macedonia; 2010. p. 836–44.

93. Ladar I. Răspunsul seismic al structurilor metalice multietajate. O abordare energetică. Universitatea Tehnica Cluj Napoca; 2013.
94. Prodan O. Reducerea Raspunsului Seismic al Structurilor Spatiale Multietajate prin Protectie Pasiva. Universitatea Tehnica Cluj Napoca; 2011.
95. Mociran H. Contributii la Evaluarea Performantelor Seismice a Structurilor Echipate cu Amortizori cu Fluid Vascos. 14th European Conference on Earthquake Engineering. [Ohrid, Macedonia]: Universitatea Tehnica Cluj-Napoca; 2010.
96. Reyes-Salazar A, Haldar A, Rodelo-López RE, Bojórquez E. Effect of Damping and Yielding on the Seismic Response of 3D Steel Buildings with PMRF. *Sci World J.* 2014;2014.
97. Dubina D. Ductility and Seismic Performance of Thin-walled Cold-formed Steel Structures. *Steel Struct.* 2004;4:209–22.
98. Anastasiadis A, Gioncu V. Ductility of IPE and HEA beams and Beam-Columns. *Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS'99)*. 1999. p. 249–57.
99. Anastasiadis A, Gioncu V, Mazzolani FM. New Trends in the Evaluation of Available Ductility of Steel Members. *STESSA 2000: Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*. Rotterdam, Holland; 2000.
100. Anastasiadis A, Mateescu G, Gioncu V, Mazzolani FM. Reliability of Joint Systems for Improving the Ductility of MR-Frames. *Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS'99)*. 1999. p. 259–68.
101. Anastasiadis A, Gioncu V, Mazzolani FM. Toward a Consistent Methodology for Ductility Checking. *STESSA 2000: Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*. Rotterdam, Holland; 2000. p. 443–53.
102. Gioncu V, Mazzolani FM. *Ductility of Seismic Resistant Steel Structures*. London: Spon Press; 2002.
103. Ungureanu V, Dubina D. Post-Elastic Strength and Ductility of Cold-Formed Steel Sections. *Proceedings of the 4th International Conference of Thin-Walled Structures: Advances in Research, Design and Manufacturing Technology (ICTWS4)*. p. 283.
104. Roufaiel MSL, Meyer C. *Analysis of Damaged Concrete Frame Buildings Technical Report NSF-CEE-81-21359-1*. New-York; 1983.
105. Banon H, Biggs JM, Irvine HM. Seismic Damage of Reinforced Concrete Frames. *J Struct Div ASCE*. 1981;107(9):1713–29.
106. Banon H, Veneziano D. Seismic Safety of Reinforced Concrete Members and Structures. *Earthq Eng Struct Dyn*. 1982;10:179–93.
107. Krawinkler H, Bertero EP, V. PV. Shear Behavior of Steel Frame Joints. *J Struct Div*. 1975;101(11):2317–36.

108. Iemura H. Earthquake Failure Criteria of Deteriorating Hysteretic Structures. Proceedings of the Seventh World Conference of Earthquake Engineering. Istanbul, Turkey; 1980. p. 8–13.
109. Kunnath SK, Reinhorn AM, Lobo RF. IDARC Version 3.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Structures. Technical Report NCEER-92-0022. Buffalo; 1992.
110. Fajfar P. Equivalent ductility factors, taking into account low-cycle fatigue. Earthq Eng Struct Dyn. 1992;21(10):837–48.
111. Manfredi G, Cosenza E. Seismic Design Based on Low Cycle Fatigue Criteria. Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering,. Acapulco, México; 1996.
112. Fajfar P, Krawinkler H. Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes. Earthq Eng Struct Dyn. 1998;27(12):1559–62.
113. Rodriguez ME, Aristizabal JC. Evaluation of a seismic damage parameter. Earthq Eng Struct Dyn. 1999;28(5):463–77.
114. Arroyoa D, Ordaz M. Hysteretic Energy Demands for SDOF Systems Subjected to Narrow Band Earthquake Ground Motions. Applications to the Lake Bed Zone of Mexico City. J Earthq Eng. 2007;11(2):147–65.
115. Hancock J, Bommer JJ. A state-of-knowledge review of the influence of strong-motion duration on structural damage. Earthq Spectra. 2006;22(3):827–45.
116. Terán-Gilmore A, Jirsa JO. Energy demands for seismic design against low-cycle fatigue. Earthq Eng Struct Dyn. 2007;36(3):384–404.
117. Krawinkler H, Zohrei M. Cumulative damage in steel structures subjected to earthquake ground motions. Comput Struct. 1983;16(1-4):531–41.
118. Rodriguez ME, Padilla D. A Damage Index for the Seismic Analysis of Reinforced Concrete Members. J Earthq Eng. 2009;13(3):364–83.
119. Park Y, Ang A. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete. J Struct Eng. 1985;111(4):722–39.
120. Perde F. Abordarea Energetica a Raspunsului Seismic al Structurilor Metalice cu Brate Rigide. Universitatea Tehnica Cluj-Napoca; 2014. p. 1–160.
121. Popescu AM, Balea ID. Optimal Steel Multi-Storey Structures. Added Damping vs. Stiffness. Proceedings of C60 International Conference. Cluj-Napoca, Romania; 2013.
122. Popescu A, Balea I. Steel Multi-Story Structures with Added Damping. A Consumption Approach. Proceedings of the 13th International Conference VSU. Sofia, Bulgaria; 2013.

123. Popescu A, Suciu D. Structural and economic in seismic protection through added damping. *Bul Institutului Politeh din Iasi*. 2013;59(2).
124. Wada A. Recent Developments in Japan as Most Earthquake Prone Country. 13th International Conference on Structural and Geotechnical Engineering. 2009.
125. Sayani P, Ryan K. A First Attempt at Loss Evaluation in Fixed-Base and Seismically Isolated Buildings Using PACT. 2007.
126. Woo J. Lowering the Initial and Lifetime Costs of Isolation in Buildings. 2010 PEER Internship Program REU Site: University of California, Berkeley. 2010. p. 1–20.
127. Koh HM, Song J, Ha D. Cost Effectiveness of Seismic Isolation for Bridges in Low and Moderate Seismic Region. 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand; 2000. p. 1–8.
128. Warszawski A, Gluck J, Segal D. Economic Evaluation of Design Codes—Case of Seismic Design. *J Struct Eng*. 1996;122(12):1400–8.
129. Wen YK, Ang A.-S. Reliability and Cost-Effectiveness of Structures with Active Control. *Proceedings of the International Workshop on Intelligent Systems*,. 1992.
130. Chen Y, Cao T, Ma L. Seismic Protection System and its Economic Analysis on the Beijing High-Rise Building Pangu Plaza. 2008;
131. Lopez-Garcia D, Soong TT. Efficiency of a simple approach to damper allocation in MDOF structures. *J Struct Control*. 2002;9(1).
132. Pavlou E, Constantinou MC. Response of Nonstructural Components in Structures with Damping Systems. *J Struct Eng*. 2006;132(7):1108–17.
133. Popescu AM, Suciu DM, Perde F. Structure Stiffening vs. Base Isolation of Multi Storey Frames. An Economical Approach. *Proceedings of the 12th International Scientific Conference VSU*. Sofia, Bulgaria; 2012.
134. Soong TT, Dargush GF. *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. John Wiley. New-York; 1997.
135. Colajanni P, M. Papia. Energy design approach for braced frames with dissipative devices. *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*. Acapulco, Mexico; 1996.
136. Shargh FH. An Optimal Distribution of Stiffness Over the Height of Shear Buildings to Minimize the Seismic Input Energy. *JSEE*. 2011;13(1):25–32.
137. Wu CX, Tong JG, Zhou Y, Han JJ. Study on the seismic performance of X-added damping and stiffness energy dissipation device. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisboa, Portugal; 2012.

