

EFICIENȚA DISPOZITIVELOR PASIVE DE CONTROL LA REABILITAREA SEISMICĂ A UNEI CLĂDIRI DIN BUCUREȘTI

D. Cretu¹, E. Tulei¹, C. Ghindea¹ și R. Cruciat¹

ABSTRACT

Lucrarea analizează eficiența dispozitivelor pasive de control în trei soluții de reabilitare seismică a unei clădiri din București. Clădirea are structura în cadre din beton armat cu 5 niveluri și a fost construită între anii 1963 și 1965. În normativul de calcul la seism aflat în vigoare în acea perioadă, *P13-63*, spectrul de proiectare corespundea cutremurelor californiene rapide, de suprafață, având o zonă redusă de amplificare a accelerațiilor de răspuns. În codul actual de proiectare seismică, *P100-2006*, spectrul de proiectare este construit pe baza accelerogramelor înregistrate în amplasamentul *INCERC* București, corespunzătoare cutremurelor de adâncime medie din sursa Vrancea. Analiza structurii în conformitate cu prezentul normativ arată comportarea sa defavorabilă la cutremure severe și necesitatea consolidării. S-a analizat comportarea structurii în cazul folosirii dispozitivelor de izolare a bazei, a dispozitivelor cu amortizare vascoasă plasate în structura și a dispozitivelor cu masă acordată. În ipoteza realizării parametrilor fizico-mecanici și dinamici ai dispozitivelor din lucrare, rezultatele obținute indică soluția de reabilitare prin izolarea bazei ca fiind cea mai eficientă în condițiile seismice ale amplasamentului din București.

DESCRIEREA STRUCTURII ANALIZATE

Un ansamblu de clădiri din București cu funcțiunea de spații de învățământ necesită lucrări de consolidare, reparații capitale, amenajări și extindere pe verticală. În lucrare se prezintă aspecte privind comportarea unuia din cele patru corpuri ale clădirii, înainte și după adoptarea a trei soluții inovative de reabilitare seismică prin utilizarea unor dispozitive pasive de control. Clădirea are cinci niveluri (demisol, parter și trei etaje) cu înălțime egală, de 3,8 m. Corpul de clădire considerat are structura în cadre ortogonale de beton armat, cu 9 travei egale, de 4,7 m și 3 deschideri, de 6,175 m, 3,4 m și 7,175 m. Secțiunea stălpilor este dreptunghiulară, cu dimensiuni variabile pe înălțimea clădirii. Grosimea plăcii planșeelor este de 12 cm în zona salilor și de 10 cm în zona culoarului. Determinările experimentale au indicat folosirea în structura de rezistență a unui beton de clasă *C12/15*, cu modulul de elasticitate longitudinală $E = 24000 \text{ MPa}$. În figurile 1, 2 și 3 se prezintă planul de cofraj al planșeului curent, o secțiune longitudinală și o secțiune transversală.

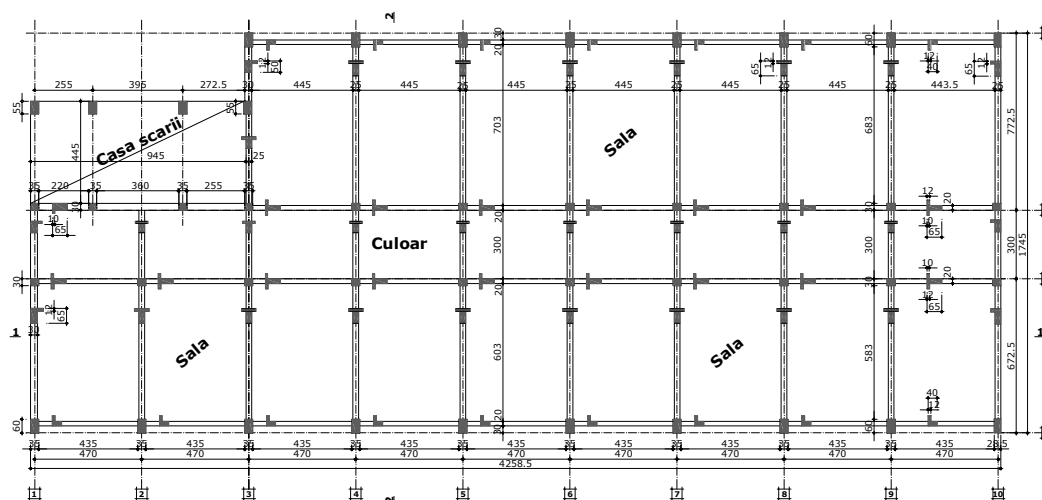


Figura 1 Plan cofraj etaj curent

¹ Universitatea Tehnică de Construcții București, cretud@utcb.ro, elena@utcb.ro, ghindea@utcb.ro, rcruciat@utcb.ro

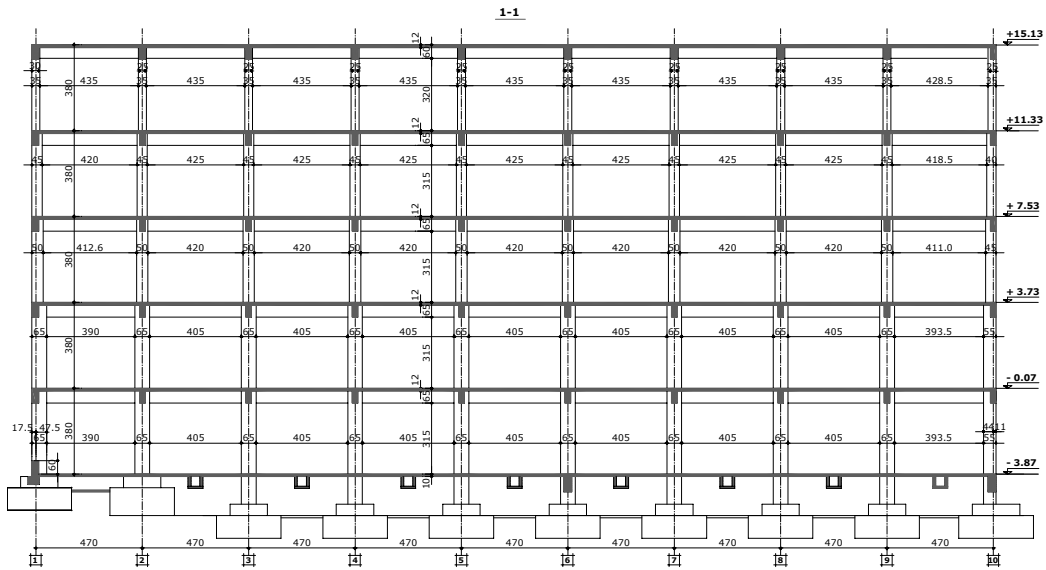


Figura 2 *Sectiune longitudinală*

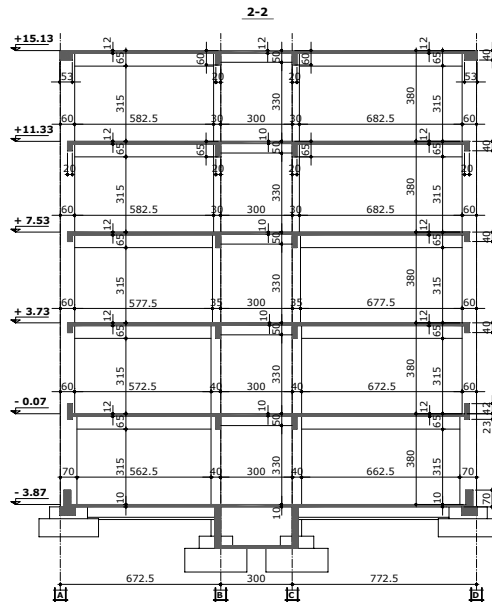


Figura 3 *Sectiune transversală*

DETERMINAREA GRADULUI DE ASIGURARE LA SEISM AL STRUCTURII EXISTENTE

Gradul de asigurare la seism al construcțiilor existente se poate exprima prin capacitatea de rezistență și de deformare postelastice a elementelor structurale, precum și prin mărimea deplasărilor relative de nivel.

Deoarece structura îndeplinește condițiile de regularitate în plan și pe verticală, analizele se pot efectua pe modele plane. Pentru cadrul transversal curent, calculul static liniar cu metoda forțelor seismice orizontale echivalente convenționale, efectuat ca pentru o structură nouă, a pus în evidență incapacitatea structurii de a prelua încărcarea de proiectare din acțiunea seismică. În figura 4 se prezintă încărcările verticale asociate cadrului transversal curent, în gruparea care conține acțiunea seismică, provenite din greutatea proprie și din încărcările utile reduse cu 60%. Rezultanta forțelor gravitaționale pentru o travee este de 4308 kN, din care încărcarea utilă redusă reprezintă aproximativ 10%. În figura 5, a se prezintă masele de nivel și forma proprie de vibrație în modul fundamental. Tabelul 1 conține perioadele de vibrație T_k , factorii modali echivalenți ε_k și masele modale efective m_k pentru primele trei moduri de vibrație.

Acceleratia de proiectare a terenului este $a_g = 0,24g$. Pentru $T_I = 1,059 s$, factorul de amplificare $\beta(T_I)$ are valoarea 2,75. Factorul de comportare q corespunde unei structuri in cadre cu ductilitate medie si cu suprarezistenta $\alpha_u/\alpha_I = 1,35$. Asadar, $q = 3,5 \alpha_u/\alpha_I = 3,5 \cdot 1,35 = 4,725$. Rezulta forta taietoare de baza $F_b = 1,2 \cdot 0,24 \cdot (2,75/4,725) \cdot 4308 \cdot 0,85 \cong 614 kN$. In figura 5, b se prezinta distributia fortelor seismice de nivel static echivalente care corespund modului fundamental de vibratie.

Gradul de asigurare la seism, raportat la capacitatea de rezistenta a structurii, poate fi evaluat simplu prin raportul dintre fortele taietoare de nivel asociate momentelor capabile ale stalpilor de la nivelurile respective, $F_{cap,i}$, si fortele taietoare de nivel $F_{d,i}$ corespunzatoare fortelor seismice de nivel de proiectare:

$$R = F_{cap,i} / F_{d,i} \quad (3)$$

in care $F_{cap,i}$ se determina cu relatia

$$F_{cap,i} = \sum_{j=1}^{ns} \frac{M_{cap,j}^{sup} + M_{cap,j}^{inf}}{h} \quad (4)$$

Tabelul 2 contine valorile fortelor taietoare de nivel si ale gradului de asigurare la seism, R , in cazul de incarcare corespunzator actiunii seismice. La parter si la etajul 1, se observa o capacitate de rezistenta la forta taietoare redusa practic la jumatate fata de capacitatea de rezistenta necesara. Prin urmare, in aceste zone pot aparea mecanisme de etaj.

Tabelul 2 Fortele taietoare de nivel si gradul de asigurare la seism

Etaj	$F_{cap,i}$	$F_{d,i}$	$R = F_{cap,i} / F_{d,i}$
Demisol	454	614	0,740
Parter	313	568	0,551
Etaj 1	281	479	0,587
Etaj 2	227	348	0,652
Etaj 3	186	174	1,069

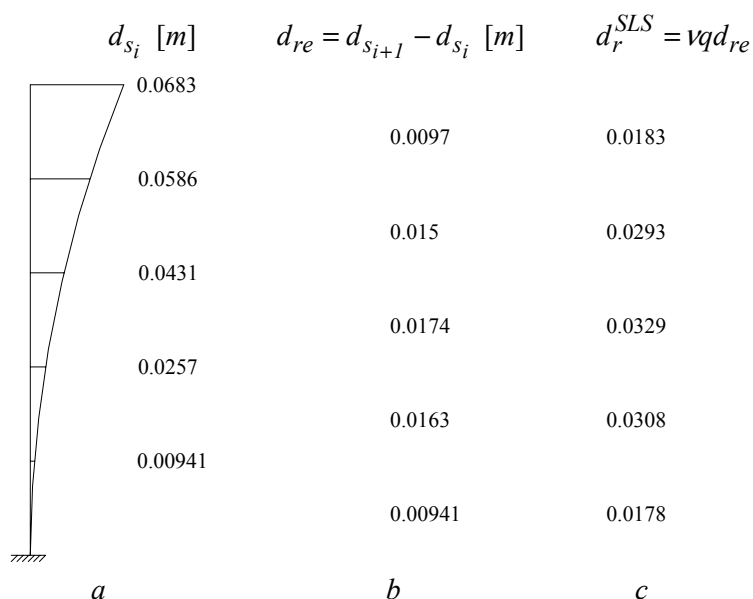


Figura 6 (a) Deplasari laterale de nivel, (b) deplasari relative de nivel, (c) deplasari pentru SLS

Valorile deplasărilor laterale de nivel și ale deplasărilor relative de nivel sunt prezentate în figura 6. În starea limită de serviciu, deplasările relative determinate cu relația $d_r^{SLS} = vq d_{re}$, în care $v = 0,4$, trebuie să fie mai mici decât valoarea maximă admisă, $d_{ra}^{SLS} = 0,004h = 0,004 \cdot 3,8 = 0,0152$ m, unde $h = 3,8$ m este înălțimea de nivel. Se constată depășirea valorii limită la toate nivelurile. În starea limită ultimă, valoarea maximă admisă a deplasării relative, $d_{ra}^{ULS} = 0,025 \cdot 3,8 = 0,095$ m, este depășită la nivelurile 1, 2 și 3. De exemplu, la nivelul 3, unde se înregistrează cea mai mare deplasare relativă de nivel,

$$d_r^{ULS} = cq d_{re} = \left(3 - 2,5 \frac{1,059}{1,6} \right) 4,725 \cdot 0,0174 = 0,1107 > d_{ra}^{ULS} = 0,095 \text{ m}$$

ACTIUNEA SEISMICA

Pentru a determina eficiența dispozitivelor de control pasiv s-au considerat patru mișcări seismice din sursa Vrancea, descrise prin accelerațiile terenului înregistrate în București, la INCERC și IMGB (tabelul 3). Cele patru accelerograme sunt prezentate în figura 7. Perioadele predominante și conținutul în frecvențe pentru mișcările terenului sunt obținute prin reprezentarea spectrului Fourier asociat (figura 8).

Tabelul 3 Caracteristicile accelerogramelor utilizate în analiza dinamică liniară

Accelerograma	Inregistrarea	Data	Sursa și componenta	Δt [s]	Număr de valori
1	INCERC București	04.03.1977	Vrancea, NS	0,005	13074
2	INCERC București	30.08.1986	Vrancea, NS	0,01	2594
3	IMGB București	30.08.1986	Vrancea, NS	0,005	8584
4	INCERC București	30.05.1990	Vrancea, EV	0,005	10497

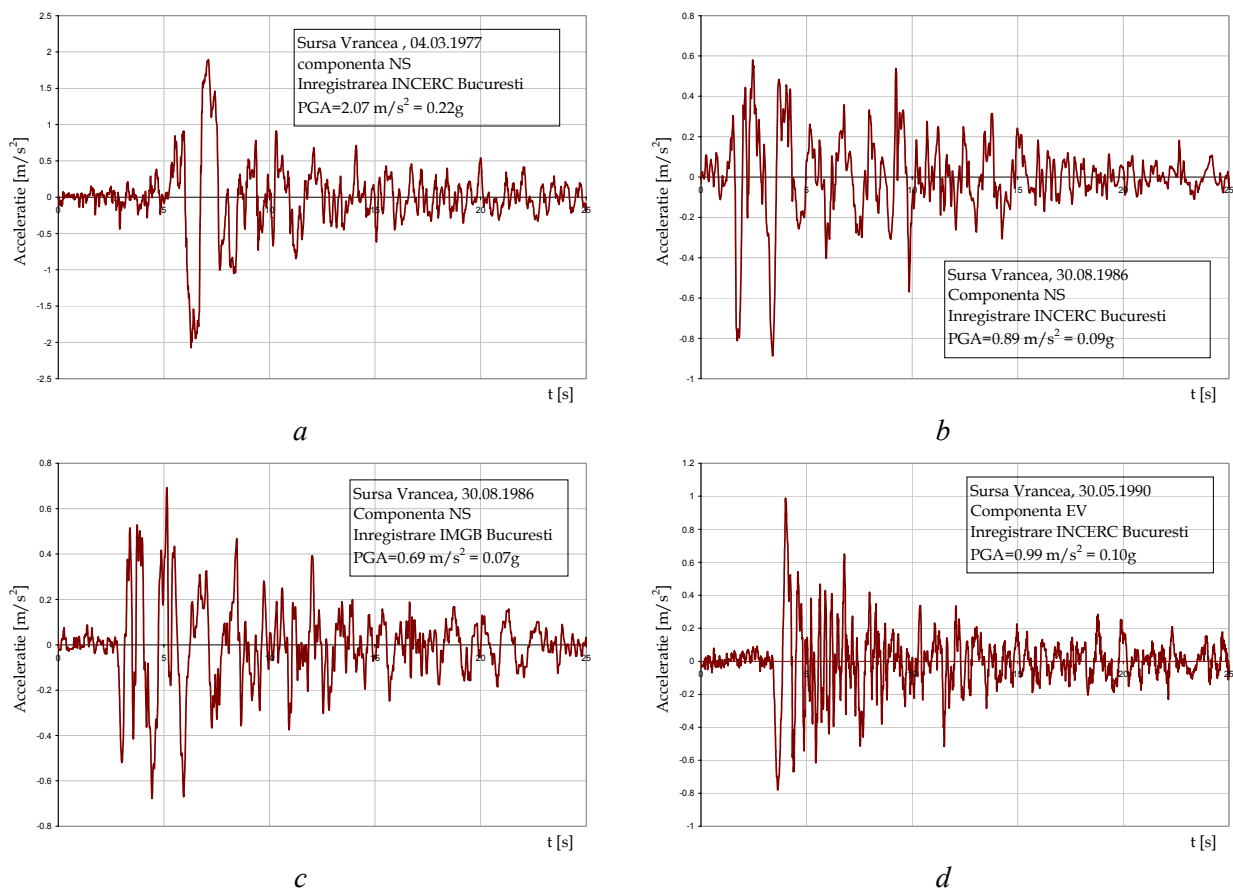


Figura 7 Accelerogramele utilizate în analiza dinamică liniară

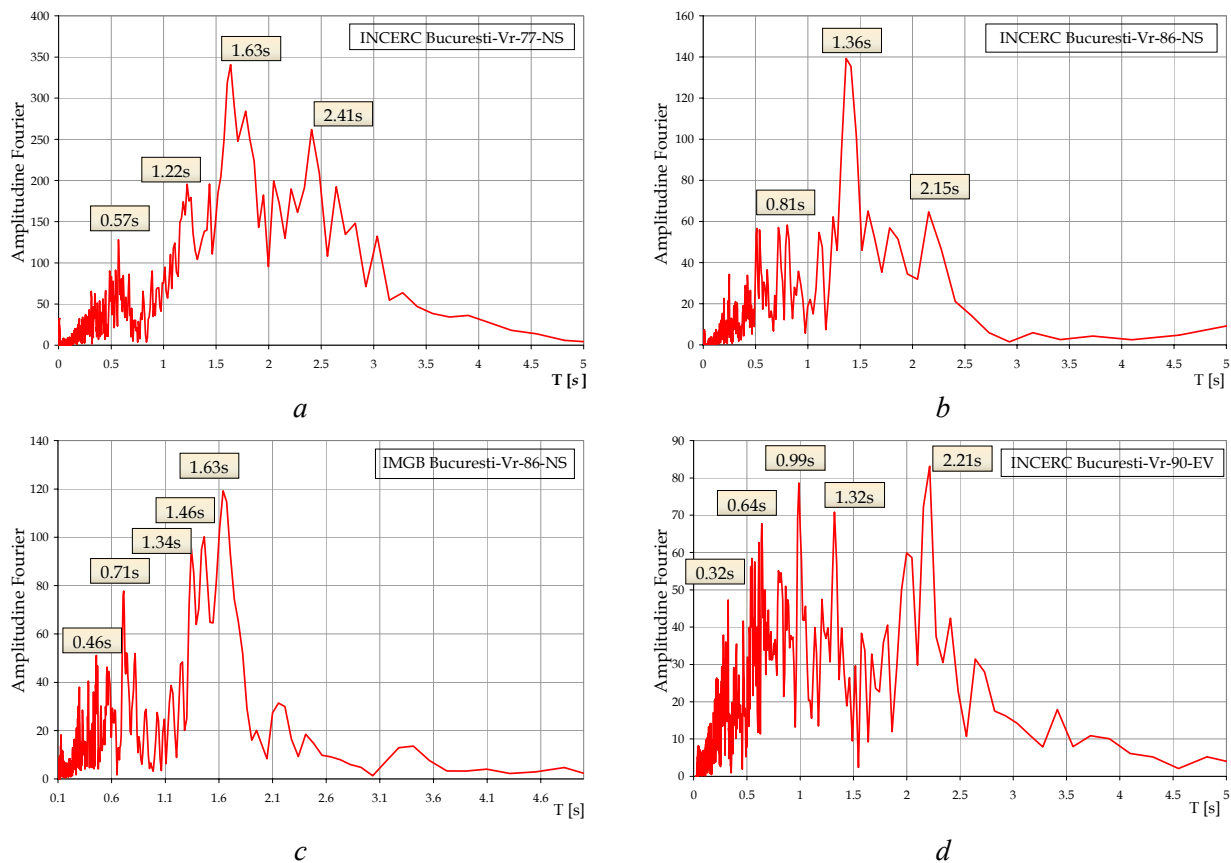


Figura 8 Spectre Fourier ale amplitudinilor acceleratiilor terenului

STUDIU DE CAZ

Prima solutie de reducere a efectului actiunii seismice a constat in plasarea de dispozitive de izolare a bazei sub un radier general de 60 cm grosime si masa de 126 t (figura 9, a). S-a analizat comportarea structurii pentru doua tipuri de dispozitive. In prima varianta s-a folosit un izolator seismic denumit *IS3s*, avand perioada de oscilatie libera de 3 s , aproximativ egala cu dublul perioadei de colt din amplasament, $T_C = 1,6\text{ s}$. Rigiditatea la deplasari laterale a izolatorului seismic este $k = 4,92\text{ kN/cm}$, iar caracteristica sa de amortizare este $c = 0,47\text{ kNs/cm}$. In a doua varianta s-a folosit izolatorul seismic denumit *IS4.8s*, avand perioada de oscilatie libera egala cu $3T_C = 4,8\text{ s}$, rigiditatea laterala $k = 1,92\text{ kN/cm}$ si caracteristica de amortizare $c = 0,294\text{ kNs/cm}$. In ambele variante, amortizarea critica a dispozitivelor de izolare este de 10% .

A doua solutie de reabilitare seismica foloseste dispozitive cu amortizare vascoasa dispuse in structura pe diagonale din otel, montate in deschiderile laterale ale cadrului transversal, la fiecare nivel (figura 9, b). Intr-o prima varianta s-a folosit amortizorul vascos denumit *DAMP1*, pentru care caracteristica de amortizare este $c = 10\text{ kNs/cm}$. In a doua varianta s-a folosit amortizorul vascos denumit *DAMP2*, avand caracteristica de amortizare $c = 100\text{ kNs/cm}$. Rigiditatea axiala a diagonalelor pe care se plaseaza aceste dispozitive este $k_1 = 3240\text{ kN/cm}$ in deschiderea de $8,12\text{ m}$ si $k_2 = 2900\text{ kN/cm}$ in deschiderea de $7,25\text{ m}$.

In cazul solutiei de reabilitare cu dispozitive cu masa acordata, s-a considerat instalarea acestora pe planseul de acoperis al cladirii (figura 9, c). Absorbitorul dinamic folosit, denumit *TMD*, are masa de $9,21\text{ t}$, reprezentand $2,1\%$ din masa intregii structuri, si rigiditatea la deplasari orizontale $k = 4,18\text{ kN/cm}$. Pentru amortizarea oscilatiilor laterale ale absorbitorului dinamic, s-a montat in paralel un amortizor vascos cu rigiditatea axiala de 362 kN/cm , amortizarea $c = 0.0597\text{ kNs/cm}$ si parametrul de amortizare nelinier $\alpha = 0.4$.

Analizele dinamice liniare efectuate au urmarit evolutia in timp a deplasarii laterale la nivelul acoperisului si a fortei taietoare de baza in cazul structurii initiale si al structurii reabilitate in cele trei solutii.

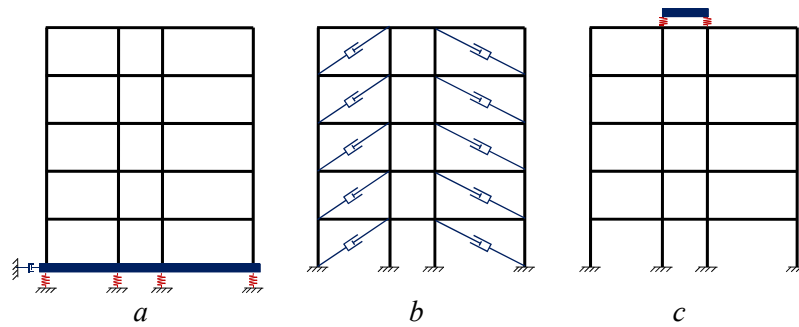


Figura 9 Structura reabilitata cu: (a) dispozitive de izolare a bazei, (b) amortizori vascosi, (c) absorbitori dinamici

Evolutia in timp a deplasarii laterale la nivelul acoperisului este prezentata in figura 10, *a* pentru structura izolata si in figura 10, *b* pentru structura cu amortizori vascosi, in cazul accelerogramei *INCERC Bucuresti, 1977*, componenta *NS*, in comparatie cu structura initiala (notata *STR*). In figura 11 se prezinta evolutia in timp a deplasarii laterale la nivelul acoperisului si a fortei taietoare de baza pentru structura initiala, structura cu dispozitive cu masa acordata, structura cu dispozitivele de izolare a bazei *IS4.8s* si structura cu amortizorii vascosi de tip *DAMP2*, pentru aceeasi accelerograma. Ultimele doua situatii au fost identificate ca fiind optime din punct de vedere al reducerii raspunsului structural. Pentru aceleasi variante ale structurii se prezinta in figurile 12, 13 si 14 evolutia in timp a deplasarii laterale la ultimul nivel si a fortei taietoare de baza, in cazul accelerogramelor 2, 3 si 4 din tabelul 3. Deplasariile laterale reprezentate nu contin deplasarea de corp rigid corespunzatoare miscarii terenului si deformarii izolatorilor seismici.

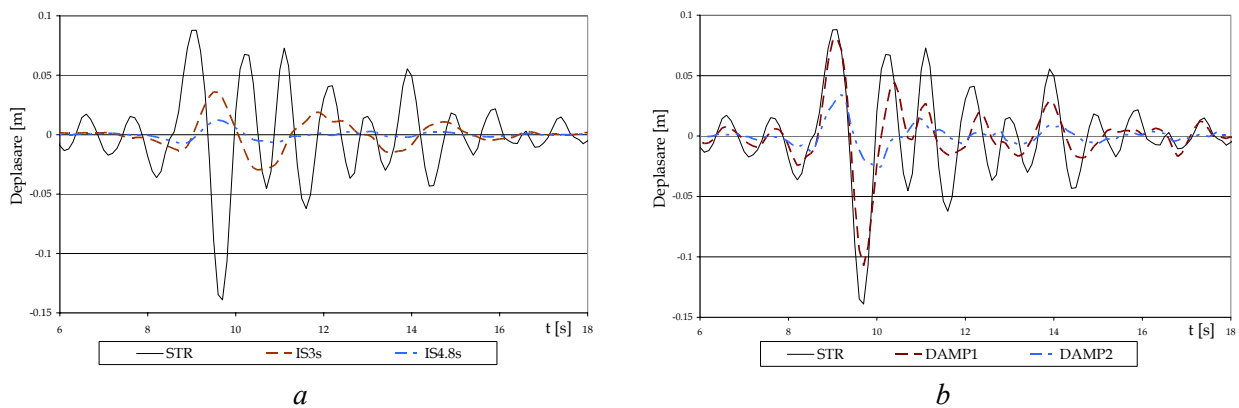
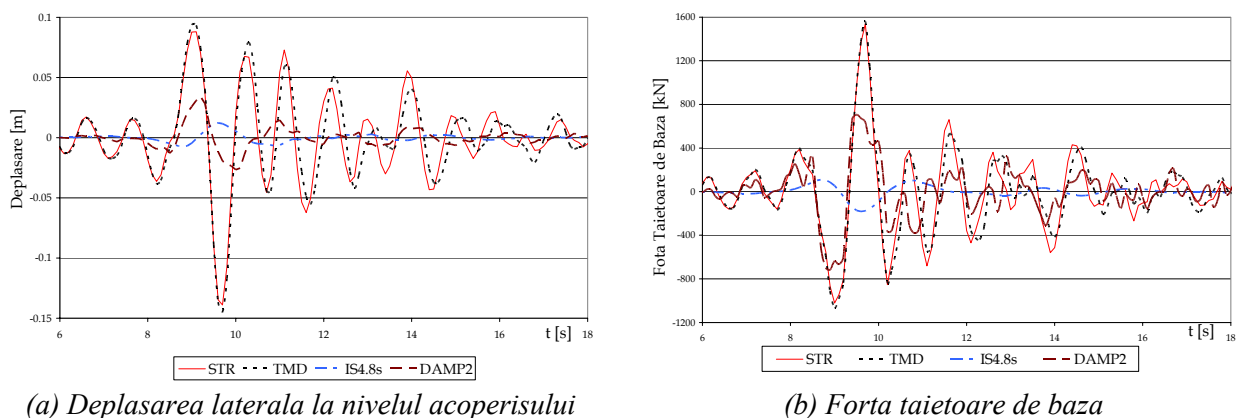


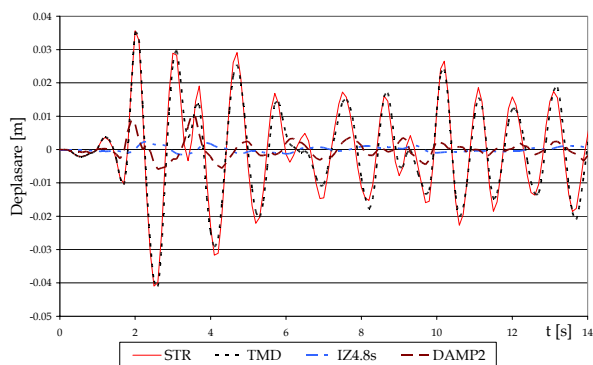
Figura 10 Deplasarea laterala la nivelul acoperisului pentru accelerograma *INCERC Bucuresti, 1977*, componenta *NS*



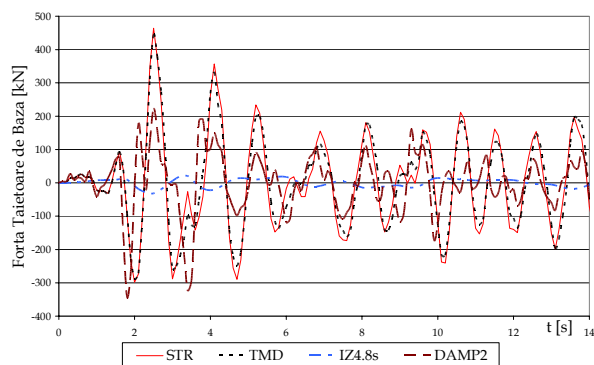
(a) Deplasarea laterala la nivelul acoperisului

(b) Forta taietoare de baza

Figura 11 Raspunsul structurii pentru accelerograma *INCERC Bucuresti, 1977*, componenta *NS*

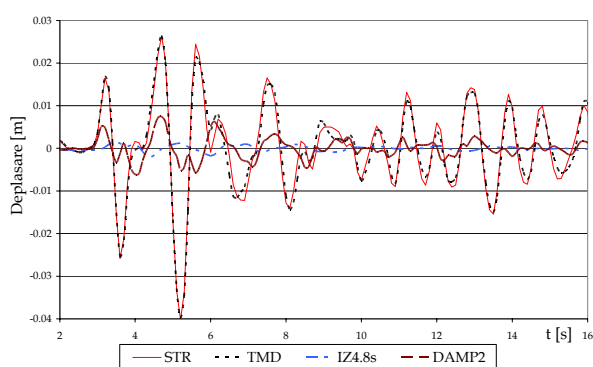


(a) Deplasarea laterala la nivelul acoperisului

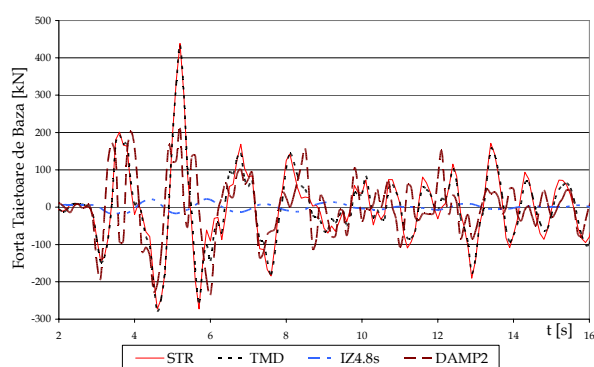


(b) Forta taietoare de baza

Figura 12 Raspunsul structurii pentru accelerograma INCERC Bucuresti, 1986, componenta NS

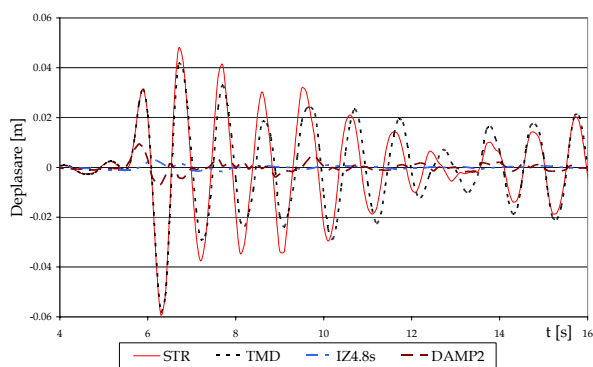


(a) Deplasarea laterala la nivelul acoperisului

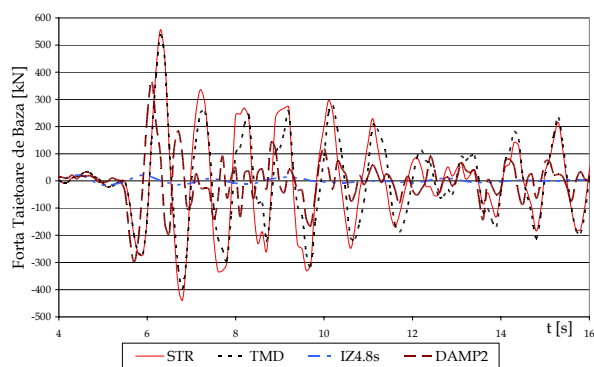


(b) Forta taietoare de baza

Figura 13 Raspunsul structurii pentru accelerograma IMGB Bucuresti, 1986, componenta NS



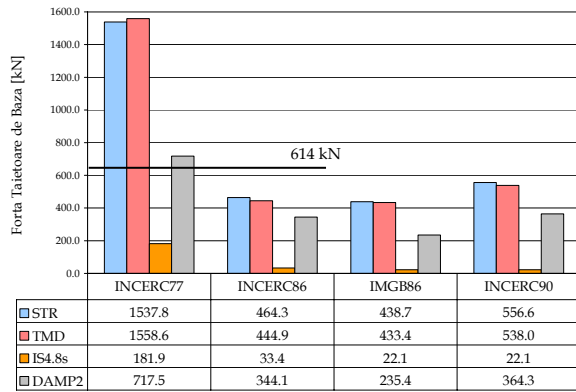
(a) Deplasarea laterala la nivelul acoperisului



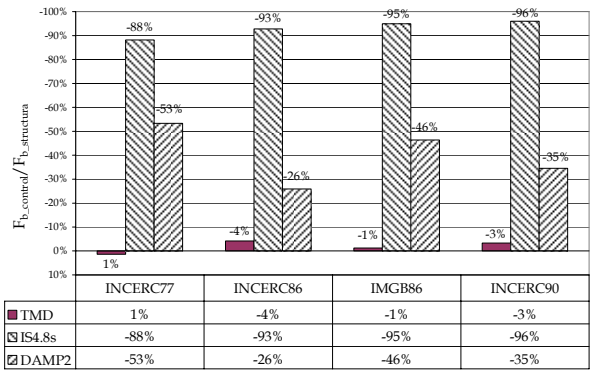
(b) Forta taietoare de baza

Figura 14 Raspunsul structurii pentru accelerograma INCERC Bucuresti, 1990, componenta EV

Valorile maxime ale fortei taietoare de baza pentru cele patru miscari seismice considerate se prezinta in figura 15, a. In figura 15, b se prezinta comparativ reducerea fortei taietoare de baza de catre dispozitivele pasive de control. Se constata ca sistemul de izolare a bazei este cel mai eficient. De exemplu, in cazul accelerografei INCERC Bucuresti, 1977, componenta NS, forta taietoare de baza este redusa cu 88% fata de cazul structurii initiale. Folosind amortizori vascosi in structura, pentru aceeasi accelerograma se obtine o reducere de 53% a fortei taietoare de baza. Cel mai ineficient dispozitiv este absorbtorul dinamic TMD, care reduce forta taietoare de baza cu doar cateva procente. Aceleasi concluzii rezulta si pentru deplasarea laterala maxima de la nivelul acoperisului, conform figurii 16. Se constata, totusi, un efect mai favorabil al amortizorilor vascosi in reducerea deplasarii, care scad cu 75% fata de cazul structurii initiale.

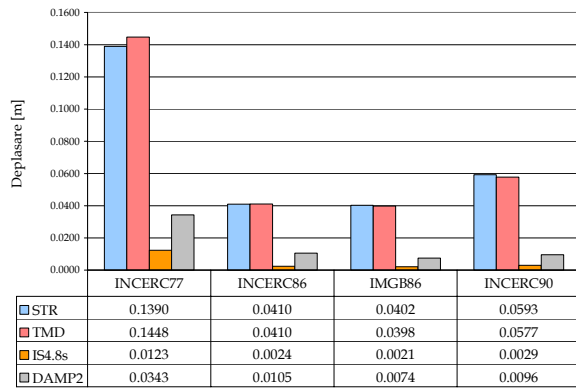


(a) Forța taietoare de baza maxima

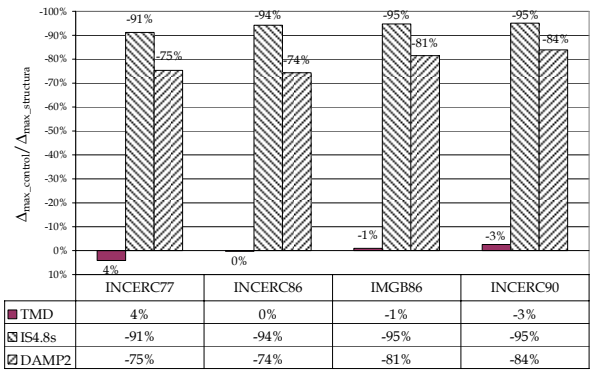


(b) Reducerea forței taietoare de baza maxime

Figura 15 Comparatii privind forța taietoare de baza maxima



(a) Deplasarea laterala maxima la nivelul acoperisului



(b) Reducerea deplasării laterale maxime de la nivelul acoperisului

Figura 16 Comparatii privind deplasarea laterala maxima la nivelul acoperisului

In figura 17 sunt reprezentate spectrele acceleratiilor absolute de raspuns pentru cele patru miscari considerate, precum si spectrul deplasarii elastice asociate cutremurului din 04.03.1977, sursa Vrancea, inregistrat la INCERC Bucuresti. Se observa cresterea importanta a deplasarii structurilor flexibile fata de deplasarea structurilor rigide. Ca urmare, impiedicand aparitia articulatiilor plastice in structuri la care perioada fundamentala se situeaza in zona premergatoare rezonantei, se pot reduce atat deplasarea laterala, cat si fortele seismice de nivel.

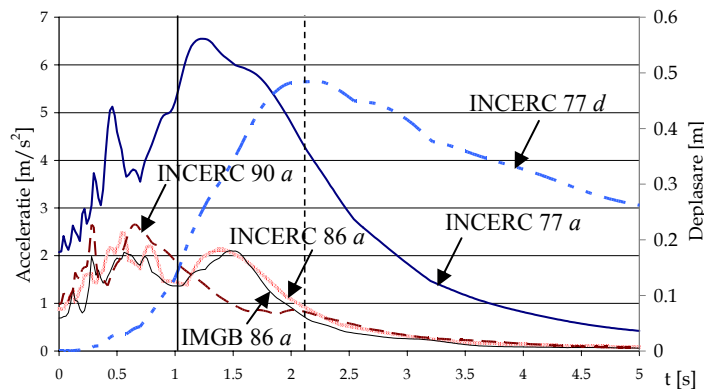


Figura 17 Spectrele acceleratiilor absolute de raspuns „a” si spectrul deplasarii elastice „d” pentru amortizare 5%

CONCLUZII

Caracteristicile elastice și de amortizare ale dispozitivelor de izolare a bazei trebuie alese astfel încât structura să fie îndepărtată cât mai mult de zona de rezonanță cu oscilațiile predominante ale terenului, pentru a se obține o reducere semnificativă a accelerațiilor de răspuns și, implicit, a forțelor de inerție. Se apreciază că perioada fundamentală a structurii izolate trebuie să fie cel puțin egală cu $3T_C$, acoperind astfel și situația majorării perioadei predominante de oscilație a terenului (figura 8, d). În acest caz, forța tăietoare de bază și deplasările pot fi reduse astfel încât răspunsul dinamic al structurii izolate să se situeze în domeniul elastic de comportare. Raportul dintre factorul de comportare al structurii și gradul de asigurare la seism determinat prin calcul static conventional indică de câte ori este necesar să fie redus răspunsul dinamic în forțe. Pentru structura analizată, coeficientul de reducere este $r = q/R = 4,725/0,551 \cong 8,6$. Dispozitivul de izolare seismică *IS4.8s* reduce forța tăietoare de bază de 8,46 ori și deplasarea laterală de la nivelul acoperisului, de 11,3 ori. În cazul utilizării unor izolatori seismici mai rigizi, structura va efectua cu siguranță incursiuni în domeniul postelastice de comportare. Tributul utilizării izolatoarelor seismice constă în valori mari ale deplasării laterale, de circa 30 cm pentru $T_I = 3T_C$ și 50 cm pentru $T_I = 2T_C$, valori inacceptabile în cazul existenței unor clădiri adiacente.

Folosirea amortizorilor vascosi în structura elimină problema deplasării laterale mari de corp rigid, caracteristică dispozitivelor de izolare a bazei. În cazul dispozitivelor *DAMP2*, deplasările laterale maxime se reduc de circa 4 ori, iar forța tăietoare de bază este redusă de numai 2 ori. Ca urmare, clădirea va avea incursiuni în domeniul postelastic, aflate însă în limitele capacităților de rezistență și de deformare.

Dispozitivele de tip *TMD* se dovedesc ineficiente în cazul acțiunilor cu bandă largă de frecvență, specifică mișcărilor seismice.

Rezultatele obținute trebuie corelate cu parametrii fizico-mecanici și dinamici ai dispozitivelor pasive care se pot realiza practic.

BIBLIOGRAFIE

- Soong T.T., Dargush G.F. (1997), *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley&Sons
- Bozorgnia Y., Bertero V. (2004), *Earthquake Engineering: from Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*, CRC Press LLC
- Chopra A. K. (2007), *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Pearson Prentice Hall International
- Tulei E., Cretu D., Ghindea C. (2008), Seismic rehabilitation of a reinforced concrete framed structure by the use of tuned mass dampers and viscous dampers, *Proceedings of the International Conference Constructions 2008, 9-10 may 2008, Cluj-Napoca, Romania*, Vol.1, p.283-290
- Tulei E., Cretu D., Lungu D. (2009), Study on seismic upgrade of 5 storey reinforced concrete building by Tuned Mass Damper, *Proceedings of the International Conference on Protection of Historical Buildings, Prohitech 09, Rome, Italy, 21-24 June 2009*, Vol.1, p.563-568
- *** P 100-1/2006 (2006), *Cod de proiectare seismică - Partea I: Prevederi de proiectare pentru clădiri*