

Raport de Cercetare

Grant: CNCSIS tip AT "Comportamentul seismic al cadrelor metalice duale contravantuite excentric cu link scurt detasabil"

Autor: Aurel Stratan

Universitatea Politehnica din Timisoara

1. INTRODUCERE

Ingineria seismică este o știință relativ tânără, cu o istorie de aproximativ un secol. Proiectarea antiseismică a construcțiilor a cunoscut o dezvoltare continuă în acest timp, impulsivă de consecințele și învățămintele noi acumulate după producerea unor cutremure importante. Răspunsul structurilor la cutremurele de la Loma Prieta (1989), Northridge (1994) și Hyogoken-Nanbu (1995) au arătat că normele actuale și-au îndeplinit în general scopul declarat de protecție a vieții și de prevenire a colapsului structural. Totuși, aceste cutremure au scos la iveală o serie de probleme legate de comportarea structurilor în general și a cadrelor metalice necontravantuite în particular. În primul rând, pierderile economice importante care au avut loc în urma acestor cutremure de pământ au arătat că nu este suficient să proiectăm structuri care să nu se prăbușească în urma unui seism major. Reducerea distrugerilor structurale și nestructurale la cutremure de intensitate mai redusă dar mai frecvente este la fel de importantă în contextul economiilor moderne. În al doilea rând, cedările neașteptate de fragile ale îmbinărilor riglă-stâlp la cadrele metalice necontravantuite au constituit o surpriză neplăcută pentru specialiști, aceste structuri fiind considerate mult timp printre cele mai ductile tipuri de construcții. În cele din urmă, înregistrările efectuate au scos la iveală noi aspecte ale caracteristicilor acțiunii seismice, în special legate de efectul de directivitate la cutremure locale ("near-field").

Ca și răspuns la distrugerile structurale și nestructurale extinse în urma unor intensități relativ reduse ale mișcării seismice și a pierderilor economice asociate, a cunoscut o dezvoltare importantă proiectarea bazată pe performanță (PBP). Trei documente au constituit temelia criteriilor de proiectare bazată pe performanță și au marcat cercetările din acest domeniu: SEAOC Vision 2000 (1995), ATC 40 (1996) și FEMA 273 și 274 (1996). Esența PBP este reprezentată de asigurarea unor nivele de performanță controlată a structurii sub acțiunea unor nivele corespunzătoare ale acțiunii seismice. Structurile proiectate conform criteriilor PBP vor trebui nu doar să prevină pierderea de vieți omenești și colapsul structurii la cutremure rare devastatoare, ci și să limiteze degradările (și deci pierderile economice) la cutremure mai frecvente dar de o intensitate mai scăzută. Analiza convențională a răspunsului seismic al structurilor prin metoda statică echivalentă, bazată pe forță, are numeroase limitări și nu reprezintă o soluție adecvată în contextul PBP. În consecință, analiza dinamică neliniară, dar și metode simplificate bazate pe deplasare au cunoscut o dezvoltare importantă.

Modul în care o structură este afectată de un cutremur de pământ depinde într-o mare măsură de caracteristicile mișcării seismice. Cu toate că nu putem să controlăm mișcarea seismică în sine, trebuie totuși să încercăm să-i precizăm caracteristicile și să înțelegem modul în care acestea afectează răspunsul elastic și inelastic al structurilor. În calitate de ingineri constructori, putem controla și îmbunătăți performanța seismică a construcțiilor prin modul în care concepem, conformăm și realizăm structura de rezistență. Configurațiile duale reprezintă o posibilitate de realizare a acestui obiectiv, analizată în această lucrare. Evaluarea performanței seismice a structurilor este efectuată prin analize dinamice neliniare, dar și prin metode simplificate bazate pe deplasare.

2. CARACTERIZAREA MIȘCĂRII SEISMICE

Mișcarea seismică constituie una din principalele cauze ale degradării structurilor în caz de cutremur, și de aceea este importantă înțelegerea cât mai corectă a fenomenelor care o generează, a parametrilor care o caracterizează și a efectelor mișcării seismice asupra construcțiilor. Studiul

mişcării seismice este un domeniu dinamic, datele achiziționate în urma cutremurelor din ultimul deceniu contribuind la o cunoaștere mai profundă și mai detaliată a acesteia.

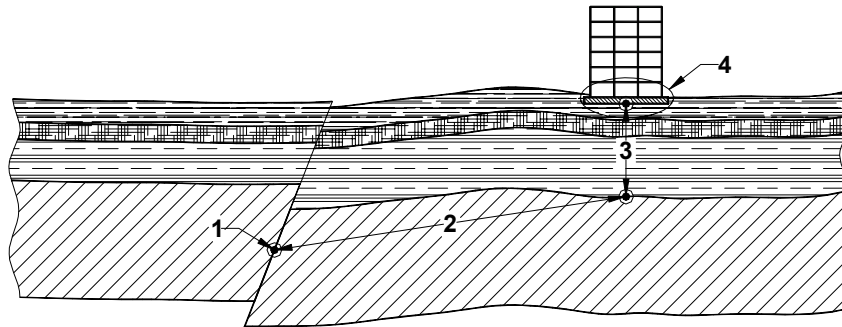


Figura 1: Principali factorii ce caracterizează mișcarea seismică într-un amplasament (1 – factori de sursă; 2 – efectul propagării undelor seismice; 3 – factorii de amplasament; 4 – interacțiunea teren-structură).

Fenomenele complexe care generează și afectează mișcarea seismică, incluzând factorii de sursă, de propagare, de amplasament și de interacțiune teren-structură (vezi Figura 1), variabilitatea și influența reciprocă dintre aceștia, fac prezicerea exactă a unor evenimente seismice viitoare de domeniul imposibilului. Totuși, înțelegerea factorilor care afectează mișcarea seismică, cuplată cu evidențierea caracteristicilor care controlează răspunsul elastic și inelastic al structurilor ingineresti sunt de real folos, ajutându-ne să construim structuri mai sigure pe viitor.

Din punctul de vedere al unui inginer constructor, caracterizarea mișcării seismice este importantă prin prisma degradărilor pe care le induce într-o structură. Parametrii ingineresti folosiți pentru caracterizarea accelerogramelor, reprezintă amplitudinea, conținutul de frecvențe și durata mișcării seismice. Conținutul de frecvențe al accelerogramelor, în relație cu perioada fundamentală de vibrație T a structurii este deosebit de important pentru răspunsul neliniar al structurii. O modalitate simplă de cuantificare a conținutului de frecvențe a unei accelerograme este prin perioada de control/colț T_C . Cerința de ductilitate a unei structuri este în strânsă legătură cu perioada de colț (mai exact cu raportul T/T_C) și cu factorul de reducere a forțelor seismice. Aspectul important al fenomenului constă în cerințe foarte mari de ductilitate pentru structurile cu perioada mai mică decât perioada de colț (T/T_C subunitar).

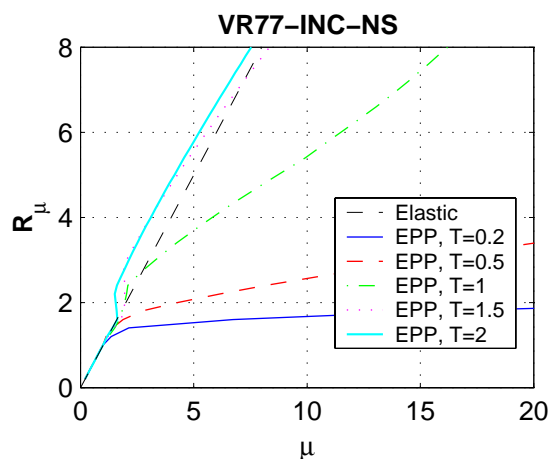


Figura 2: Analiza dinamică incrementală pentru sisteme EPP cu perioade proprii de vibrație cuprinse între 0.2 și 2.0 sec, înregistrarea VR77-INC-NS.

Rezultatele unei analize dinamice incrementale pentru înregistrarea VR77-INC-NS și câteva sisteme elastic-perfect plastice cu perioade inițiale diferite sunt prezentate în Figura 2. Se poate observa că

pentru sisteme cu perioada inițială mai mică decât $T_C=1.42$ sec ($T=0.2, 0.5$ și 1.0 sec), reducerea chiar nesemnificativă a forței de curgere față de forța elastică ($R_{\mu}>1$) duce la o creștere foarte rapidă a cerinței de ductilitate μ , echivalent cu colapsul structurii. Pentru perioade inițiale mai mari decât T_C ($T=1.5$ și 2.0 sec), cerința de ductilitate în sistemul EPP crește mai încet odată cu creșterea R_{μ} , deplasările fiind chiar mai mici decât cele corespunzătoare unui sistem elastic.

Mișcări seismice cu perioada de colț T_C relativ mare (față de valorile întâlnite în majoritatea normelor de proiectare antisismică) pot fi generate de: (1) terenurile foarte moi (cazul înregistrării București-INCERC a cutremurului Vrancea 1977), eventual cuplate cu efecte de bazin și (2) efectul directivității înainte în cazul unor cutremure locale. Pentru verificarea acestor afirmații au fost analizate o serie de accelerograme din baza de date europeană (Ambraseys, n.d.), cuprinzând 496 componente orizontale ale unor cutremure cu magnitudini moment cuprinse între 6.5 și 7.8. Corelarea dintre perioada de control T_C pe de o parte și condițiile locale de amplasament și distanța la falie pe de altă parte, au adevărit observațiile de mai sus.

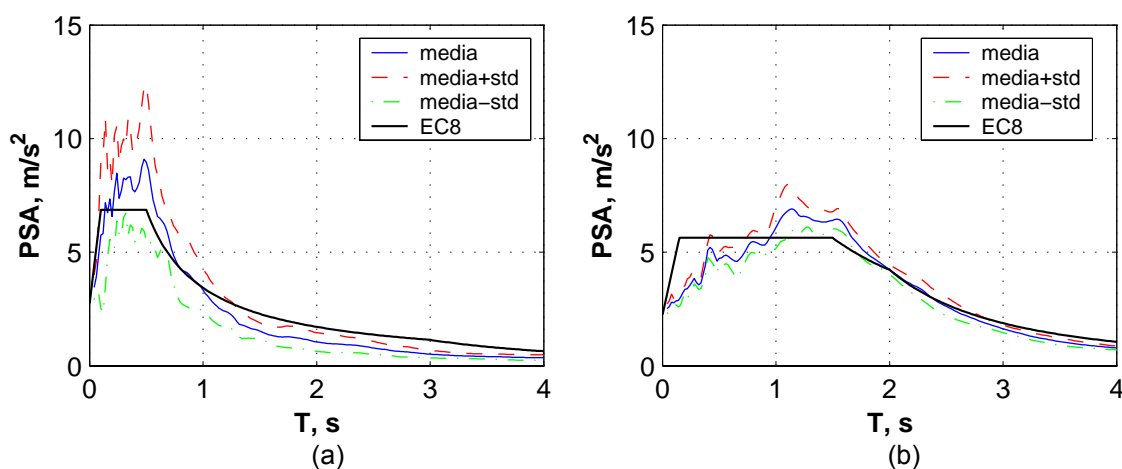


Figura 3: Spectrul de accelerație mediu +/- o abatere standard pentru grupul $T_C=0.5$ sec (a), și $T_C=1.4$ sec (b), 5% amortizare.

Pentru evaluarea răspunsului dinamic neliniar al unor structuri duale în cadrul acestei lucrări, au fost formate două seturi de înregistrări a câte șapte accelerograme, istorice și semi-artificiale. Cele două seturi corespund sursei seismice Vrancea și unor condiții de teren diferite: teren mediu cu $T_C=0.5$ și teren moale cu $T_C=1.4$ secunde. Accelerogramele au fost asociate unor spectre de proiectare în format Eurocode și scalate la acestea pe un interval larg de perioade (de la 0.2 la 2.0 secunde) pentru reducerea dispersiei unor analize dinamice neliniare.

3. CADRE DUALE CONTRAVÂNTUITE EXCENTRIC

Structurile de rezistență folosite în construcții pot fi reduse la un număr limitat de tipuri structurale bine definite. Acest lucru face posibilă schematizarea structurii, analiza și dimensionarea ei, funcție de încărcările la care este solicitată. Astfel, în cazul construcțiilor metalice multietajate, tipurile structurale de bază sunt:

- cadrele necontravântuite
- cadrele contravântuite centric (în X, K, V, etc.)
- cadrele contravântuite excentric
- diafragmele metalice (folosite cu precădere în SUA și Japonia). O categorie aparte a acestor tipuri de structuri o reprezintă cadrele cu diafragme din oțel cu limita de curgere redusă, care oferă o ductilitate excelentă. Aceste sisteme structurale sunt folosite aproape exclusiv în Japonia, unde au fost studiate în detaliu, inclusiv experimental
- cadrele duale, alcătuite din cadre metalice necontravântuite și una din variantele cadrelor contravântuite sau a diafragmelor metalice

Normele de proiectare antiseismică prevăd diverse criterii de proiectare și alcătuire pentru fiecare tip structural, pentru asigurarea unui comportament seismic adecvat. Cadrele duale sunt tratate în schimb mult mai sumar, proiectantul fiind îndrumat către criteriile de proiectare specifice structurilor componente în parte. În plus, se menționează doar că forțele laterale sunt preluate de către substructuri proporțional cu rigiditatea lor (Eurocode 8, 1994). Normele americane (NEHRP 2000) mai impun și condiții de rezistență, astfel, cadrele necontravântuite trebuie să fie capabile să preia cel puțin 25% din forța laterală de calcul pentru a califica ansamblul de cadre necontravântuite și cadre contravântuite/ în diafragme drept cadre duale. Acest criteriu este stabilit însă în mod arbitrar și nu are la bază un studiu specific (NEHRP 2000, comentarii).

Acest capitol studiază structurile duale obținute prin combinarea a două substructuri cu proprietăți (rigiditate, rezistență și ductilitate) substanțial diferite, cum ar fi cadrele contravântuite excentric combinate cu deschideri necontravântuite cu noduri rigide. Spre deosebire de cadrele duale necontravântuite, componentele structurilor duale contravântuite/necontravântuite influențează într-o măsură mai mare caracteristicile globale ale structurii și este de așteptat ca și răspunsul seismic să fie afectat corespunzător.

Folosind principii energetice, Akiyama (1999) a demonstrat eficiența din punct de vedere al comportamentului seismic al structurilor duale (rigid-flexibile), compuse din două subsisteme, din care unul (flexibil) să rămână elastic în timpul cutremurului, iar altul (rigid) să disipeze energie prin deformații plastice. Acest obiectiv se poate realiza alegând în mod corespunzător caracteristicile celor două sisteme componente (forța de curgere F_{yi} și rigiditatea K_i). Comportarea globală al unui cadru dual poate fi asimilată simplificat cu un sistem format din două resorturi elastice – perfect plastice (vezi Figura 4) legate în paralel.

Obiectivul realizării sistemului dual constă în dirijarea deformațiilor plastice (a disipării de energie) în subsistemul rigid (2). Pentru aceasta, rigiditățile inițiale ale celor două subsisteme trebuie astfel alese, ca să se împiedice apariția deformațiilor plastice în componenta flexibilă (1). Considerând necesară o deformație plastică δ_{pl2} (cerință de ductilitate) în resortul rigid, poate fi determinată ductilitatea convențională μ_D , reprezentând ductilitatea resortului 2 până la plastificarea resortului 1:

$$\mu_D = \frac{F_{y1}}{F_{y2}} \cdot \frac{K_2}{K_1}$$

Astfel, un indice al alcătuirii corecte a sistemului dual îl poate constitui ductilitatea μ_D , care poate fi mărită în următoarele moduri:

- substructura flexibilă: prin creșterea forței de curgere și micșorarea rigidității
- substructura rigidă: prin scăderea forței de curgere și creșterea rigidității

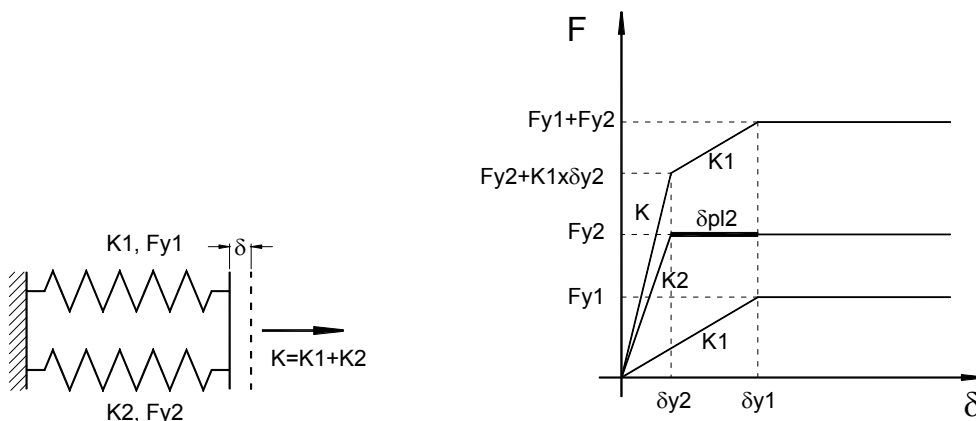


Figura 4: Model simplificat al unui sistem dual generalizat.

Pentru a evalua influența configurației duale asupra răspunsului seismic, au fost considerate două structuri. Prima dintre acestea, duală (DUA), a fost formată din cadre cu deschideri contravântuite excentric și necontravântuite cu noduri rigide. O structură corespunzătoare omogenă (EBF) a fost obținută prin articularea riglelor din deschiderile unu și trei, păstrând doar deschiderea contravântuită excentric ca sistem de rezistență la forțe laterale (vezi Figura 5).

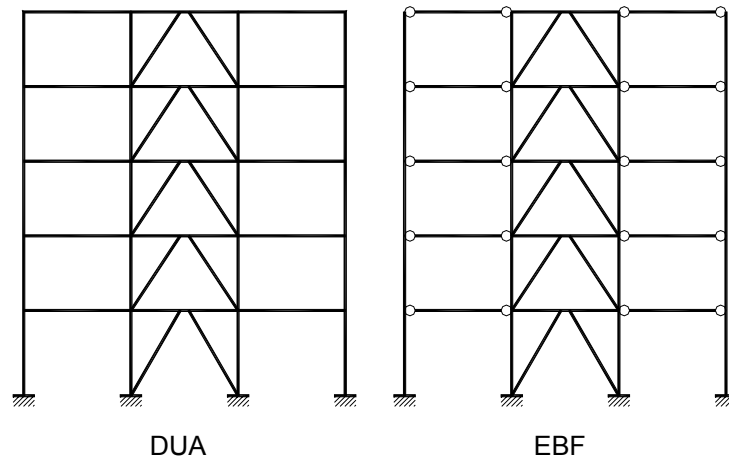


Figura 5: Configurația duală (DUA) și cea omogenă (EBF).

Criteriul de cedare corespunzător stării limită ultime (SLU) a fost determinat la atingerea deformațiilor ultime (γ_u, θ_u) în elementele structurii. Nivelul de performanță pentru starea limită a exploatării normale (SLEN) a fost limitarea deplasărilor relative de nivel la 0.006 h, iar cel pentru starea limită de prevenire a colapsului (PC) – atingerea instabilității dinamice. Nivelul acțiunii seismice corespunzător SLEN, SLU și PC a fost $\lambda=0.5$, $\lambda=1.0$ și respectiv $\lambda=1.5$.

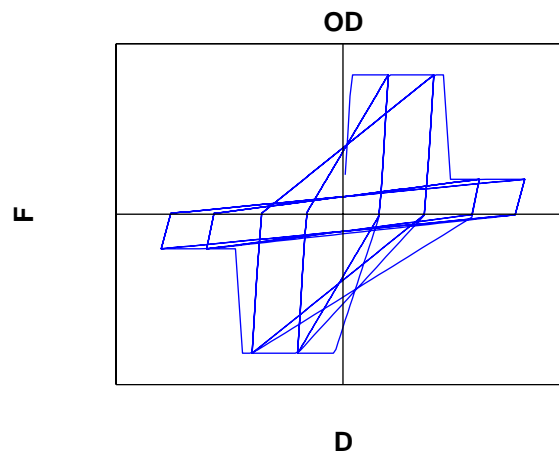


Figura 6: Răspunsul ciclic al sistemului OD.

Modelarea structurilor DUA și EBF nu a inclus efectul degradării de rezistență a relației forță - deplasare a elementelor structurale. Considerarea acestui fenomen permite o evaluare mai realistă a colapsului structurii, care este generat atât de efectele de ordinul doi, cât și de reducerea rezistenței elementelor, ca urmare a unor deformații excesive. În contextul structurilor duale, eficiența substructurii secundare (flexibile) în asigurarea unui sistem de rezervă pentru structura de rezistență primară în cazul cedării acesteia nu poate fi evaluată în mod corect decât prin modelarea explicită a degradării de rezistență. În acest scop s-au efectuat o serie de analize dinamice incrementale pe sisteme duale și omogene cu un singur grad de libertate dinamică, având caracteristici apropiate de proprietățile globale ale cadrelor DUA și EBF și care să modeleze degradarea de rezistență (vezi Figura 6).

Proiectarea structurilor duale formate din cadre metalice contravântuite excentric și necontravântuite conform normelor antiseismice actuale nu oferă avantaje față de structurile omogene. Criteriul de proiectare guvernant este reprezentat de rezistența barelor disipative scurte. Aportul de rigiditate și rezistență al structurii secundare, formate din deschideri necontravântuite cu noduri rigide, este minor la nivelul forțelor de calcul, aceasta neafectând practic dimensionarea structurii principale. Utilizarea unor îmbinări riglă-stâlp rigide în deschiderile necontravântuite oferă avantajul unei dimensionări mai economice a elementelor structurale, dar crește costul nodurilor. Criteriul de proiectare pentru elementele structurii necontravântuite îl constituie rezistența (SLU) în gruparea fundamentală de încărcări. Constructiv, structura duală poate fi alcătuită din cadre contravântuite și necontravântuite paralele, sau ca și deschideri contravântuite/necontravântuite ale aceluiași cadru. În prima variantă, conlucrarea dintre cele două subsisteme trebuie asigurată prin intermediul unui planșeu suficient de rigid și puternic pentru transferul forțelor de inerție.

Fenomenele care afectează performanța seismică a structurilor duale pot fi împărțite în două grupuri:

- aspecte care țin de relația forță-deplasare globală și tipul de mișcare seismică, care pot fi modelate prin sisteme cu un singur grad de libertate dinamică
- distribuția cerințelor de ductilitate și a degradărilor în structură, pentru analiza cărora este necesar un model cu mai multe grade de libertate dinamică

La nivelul relației globale forță-deplasare, structurile duale sunt caracterizate de: (1) o rigiditate și o forță de curgere apropiate de cele ale structurilor omogene și (2) rezistență maximă și consolidare mai ridicate. În cazul în care perioada fundamentală a structurii este mai mare decât perioada de colț a mișcării seismice, cerința de deplasări inelastice a structurilor omogene este aproximativ egală cu deplasările elastice. De aceea, consolidarea și rezerva de rezistență post-elastică a structurilor duale nu influențează cerința de ductilitate a acestora. Diferența dintre relația forță-deplasare globală a structurilor duale și omogene devine importantă atunci când perioada fundamentală a structurii este mai mică decât perioada de colț a mișcării seismice. Cerința de deplasare inelastică a structurilor omogene este mai mare decât deplasările elastice în acest caz, iar consolidarea mai mare și rezistența post-elastică a configurațiilor duale devin eficiente în reducerea cerințelor de ductilitate.

Limitarea deplasărilor laterale permanente este importantă pentru asigurarea funcționii clădirii după un cutremur. Structurile duale sunt eficiente în reducerea acestora atât timp cât substructura flexibilă are un răspuns elastic. Optimizarea configurațiilor duale din acest punct de vedere poate fi efectuată măbind ductilitatea convențională μ_D . Din punct de vedere practic, creșterea ductilității convenționale este eficientă prin folosirea unui oțel cu limita de curgere superioară la deschiderile necontravântuite, asigurând astfel o creștere a rezistenței, dar nu și a rigidității sistemului flexibil. Efectul de reducere a deplasărilor permanente de către configurația duală este maxim în cazul în care perioada fundamentală a structurii se află în domeniul vitezelor spectrale constante.

Performanța superioară a configurațiilor duale față de sisteme echivalente omogene devine importantă pentru structurile cu ductilitate limitată, reducând cerința de deplasări maxime și permanente, și diminuând riscul atingerii instabilității dinamice. În cazul unor sisteme foarte ductile, cum sunt și cadrele contravântuite excentric cu bara disipativă scurtă, aceste aspecte sunt totuși mai puțin importante.

La nivelul structurilor multietajate cu structură duală, existența substructurii secundare flexibile îmbunătățește performanța seismică prin uniformizarea deplasărilor relative de nivel pe înălțime, reducând riscul unor mecanisme parțiale de nivel. Cadrele contravântuite excentric cu bara disipativă scurtă suferă de cerințe ridicate de deformații plastice în linkurile de la nivelele inferioare. Cadrele duale conduc la o distribuție mai uniformă a deformațiilor plastice în linkuri în comparație cu cele omogene (vezi Figura 7), îmbunătățind capacitatea globală de disipare a energiei. Folosind proiectarea de capacitate și principiile de alcătuire a structurilor duale, degradările structurale pot fi izolate doar în barele disipative scurte, asigurând un răspuns elastic al deschiderilor necontravântuite, chiar și pentru nivele ale intensității seismice corespunzătoare stării limită ultime. Pe lângă beneficiile amintite mai sus, această comportare reduce costurile de intervenție la structură în urma unui seism de calcul.

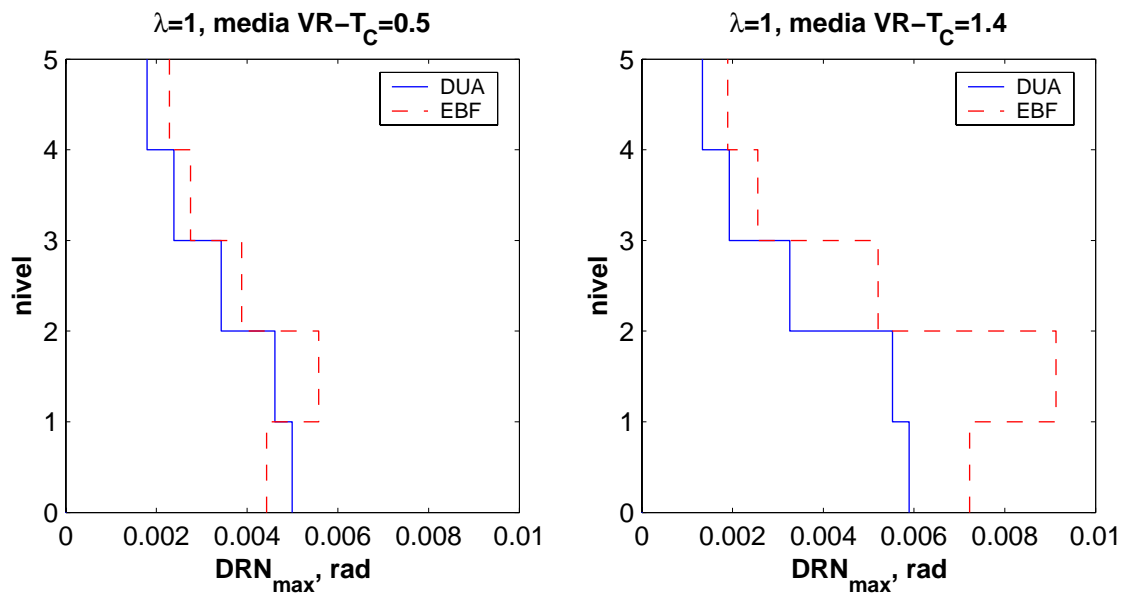


Figura 7: Distribuția deplasărilor relative de nivel pe înălțime, $\lambda=1$.

În comparație cu structurile necontravântuite, cadrele contravântuite excentric cu bara disipativă scurtă nu necesită o supradimensionare din condiții de deformabilitate laterală și rezultă cu o greutate a structurii de rezistență redusă cu aproximativ 20%.

Configurația și proprietățile post-elastice ale structurilor afectează răspunsul lor, dar caracteristicile mișcării seismice au o influență net mai importantă. Spre deosebire de răspunsul elastic al unei structuri, care este complet definit de spectrul de pseudo-acelerație, răspunsul în domeniul plastic depinde nu numai de accelerația spectrală, ci și de conținutul de frecvențe al mișcării seismice. Structurile cu perioada fundamentală mai mică decât perioada de colț a mișcării seismice suferă o amplificare importantă a cerințelor de ductilitate față de structurile aflate în domeniul de viteze spectrale constante. În contextul proiectării, factorul de reducere al forțelor seismice depinde puternic nu numai de tipul structurii, ci și de conținutul de frecvențe al mișcării seismice. Normele antiseismice actuale neglijează acest din urmă aspect, important în contextul condițiilor seismice din România, capabile să genereze mișcări seismice cu perioada de colț în jur 1.4-1.5 secunde.

4. ÎNCERCĂRI EXPERIMENTALE PE LINK DEMONTABIL

Comportarea structurilor în urma seismelor de la Loma Prieta (1989), Northridge (1994) și Hyogoken-Nanbu (1995) au arătat că în general, construcțiile moderne îndeplinesc cerințele de prevenire a colapsului în cazul unui seism major. Totuși, pierderile economice în urma acestor dezastre naturale au fost neașteptat de mari, impulsionând dezvoltarea conceptului de proiectare bazată pe performanță (PBP). Printre obiectivele acestuia se numără și minimizarea degradărilor structurale dar și nestructurale la nivele mici și mijlocii ale acțiunii seismice (cu perioade medii de recurență de 100-225 ani). Aceasta este echivalent cu diminuarea costului global (construcție plus întreținere/reabilitare) al unei clădiri amplasate într-o zonă seismică.

Pe de altă parte, proiectarea bazată pe capacitate, aplicată în majoritatea normelor actuale, permite proiectarea unor structuri care să dirijeze deformațiile plastice în anumite zone prestabilite, numite zone disipative. Folosind criteriile proiectării bazate pe capacitate și "jocul" cu rigiditatea și rezistența componentelor structurii, pot fi realizate structuri duale care să izoleze deformațiile plastice într-un număr limitat de elemente structurale. Acest lucru s-a arătat a fi posibil cel puțin pentru structurile duale în cadre contravântuite excentric și cadre necontravântuite cu noduri rigide.

O realizare judicioasă a elementelor disipative poate reduce substanțial costul lucrărilor de intervenție la o structură afectată de un cutremur major. Ideea constă în prevederea unor îmbinări demontabile între elementele disipative și restul structurii, ușurând înlocuirea zonelor degradate în cazul unui cutremur. În cazul cadrelor metalice contravântuite excentric, linkurile se pot îmbina cu rigla metalică cu ajutorul unor plăci de capăt, asigurând printr-o dimensionare corectă a îmbinării și a linkului degradarea doar a părții demontabile. O astfel de îmbinare cu placă de capăt și șuruburi de înaltă rezistență este prezentată în Figura 8. După un cutremur major, când majoritatea elementelor disipative trebuie înlocuite, în cazul schemei propuse, elementul disipativ degradat poate fi înlocuit relativ ușor și la un cost redus. Conceptul poate fi folosit atât pentru structuri contravântuite excentric omogene, cât și duale. Ultimul caz prezintă avantajul unor deformații permanente mai mici decât la structurile omogene, efect benefic atât pentru înlocuirea elementelor demontabile, cât și pentru funcționalitatea clădirii.

Pentru verificarea acestor ipoteze s-a efectuat un program experimental, care a avut la bază cadrul dual DUA, modul de dimensionare și performanța seismică a acestuia fiind descrise în capitolul 3. Scopul încercărilor a constat în determinarea comportării la încărcări ciclice a linkului și a prinderii acestuia de rigla cadrului, precum și fezabilitatea înlocuirii elementului demontabil în urma degradării acestuia. Parametrii investigați prin încercările experimentale au fost: lungimea linkului, dispunerea rigidizărilor, gradul de pretensionare a îmbinărilor. Încercarea specimenelor a fost efectuată în grupuri a câte șase specimene de aceeași lungime: LLx-m, LLx-c1, LLx-c2, LHx-m, LHx-c1, LHx-c2 (x – lungimea barei). Deplasarea la curgere determinată pentru specimenul cu rigidizări rare (LLx-m) a fost folosită pentru alcătuirea istoriei de încărcare ciclică a specimenelor din același grup de lungime (atât LLx-c, cât și LHx-c).

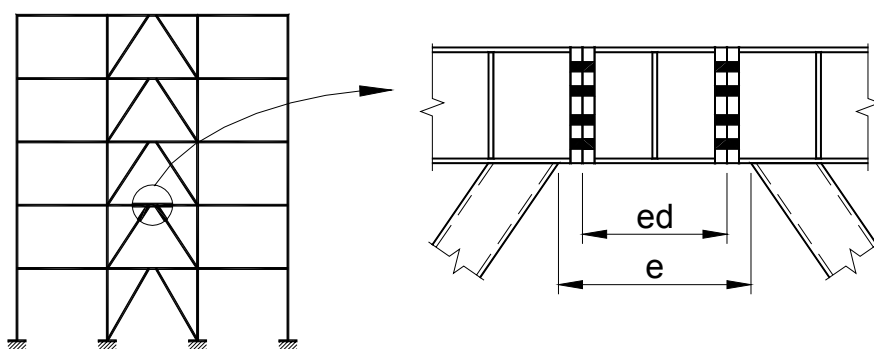


Figura 8: Conceptul de link demontabil.

Încercările experimentale pe bare disipative demontabile au demonstrat fiabilitatea tehnologică a soluției. Performanța barelor disipative scurte demontabile și posibilitatea înlocuirii acestora le face deosebit de atractive pentru a fi utilizate la cadre metalice duale. Din punctul de vedere al costurilor de înlocuire a barelor distruse în urma unui seism, avantajul maxim îl prezintă barele scurte, care asigură un răspuns elastic al îmbinării, facilitând demontarea elementelor degradate. Concentrarea distrugerilor doar în bara disipativă demontabilă poate fi asigurată prin folosirea principiilor proiectării de capacitate, inclusiv prin fabricarea barei disipative dintr-un oțel cu limita de curgere inferioară celui folosit pentru restul structurii. Zona de riglă situată între contravântuire și link este supusă unor eforturi mari, de aceea se recomandă rigidizarea suplimentară a acesteia, o variantă posibilă fiind cea descrisă în acest capitol. Detaliile de sudură dintre elementul disipativ și placa de capăt propuse și folosite la fabricarea specimenelor au demonstrat o comportare excelentă a îmbinării sudate, nici un specimen neînregistrând cedări ale sudurii. Aspectele esențiale ale sudurii element-placă de capăt au inclus: (1) eliminarea găurii de acces la rădăcina sudurii; (2) sudura în 1/2V între tălpi și placa de capăt realizată de la exteriorul secțiunii și (3) aplicarea unei suduri de colț pe conturul interior al secțiunii (tălpi și inimă). Eliminarea găurii de acces la rădăcina sudurii constituie un avantaj și din punct de vedere al reducerii costurilor de fabricație, soluția fiind recomandată pentru toate îmbinările de acest tip executate în atelier.

În comparație cu bara disipativă clasică, linkul demontabil are un răspuns mai complex, care poate fi caracterizat prin aportul componentelor care îl alcătuiesc: forfecarea inimii, rotirea în îmbinări și lunecarea în îmbinări (Figura 9). Identificarea acestor componente și cuantificarea ponderii pe care o are fiecare în răspunsul total al elementului permite o înțelegere a modului de cedare, a comportării ciclice și a caracteristicilor de rigiditate, rezistență și ductilitate totale.

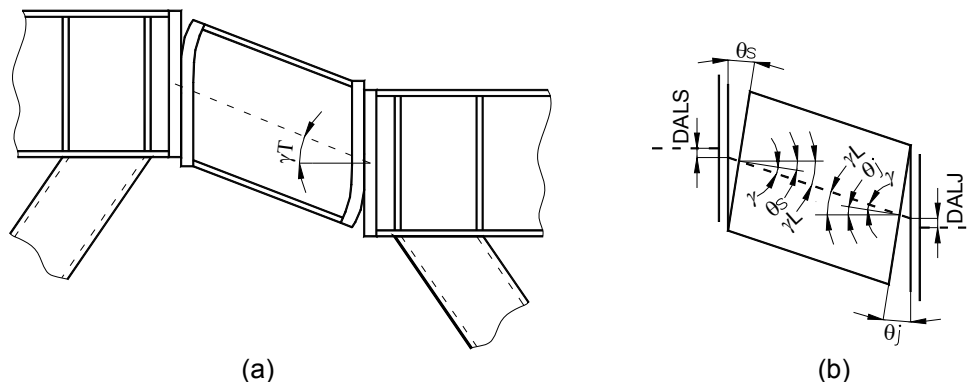


Figura 9: Modul de deformare al unui link demontabil (a) și schematizarea deformării panoului (b).

Barele disipative lungi și dispunerea deasă a rigidizărilor au avut ca și efect o solicitare mai puternică a îmbinărilor. Răspunsul ciclic al elementelor la care îmbinarea a constituit elementul cel mai slab a fost caracterizat de: (1) o reducere a forței maxime față de elementele dominate de forfecarea inimii; (2) o comportare de tip "pinching", cu degradarea rigidității și a rezistenței în cadrul ciclurilor de amplitudine constantă, și (3) cedarea prin degradarea graduală a rezistenței datorită șfichiuirii filetelui în șuruburi (vezi Figura 10a și Figura 11a). Răspunsul post-elastic al îmbinărilor a avut un caracter ductil, fapt datorat cedării prin șfichiuirea filetelui. Acest mod de cedare nu este în general specific șuruburilor. Cedarea clasică a șuruburilor prin ruperea în tijă ar fi dus la o comportare mai fragilă a linkurilor lungi. Pretensionarea totală a șuruburilor a asigurat un răspuns histeretic mai stabil în comparație cu pretensionarea parțială, reducând fenomenul de "pinching".

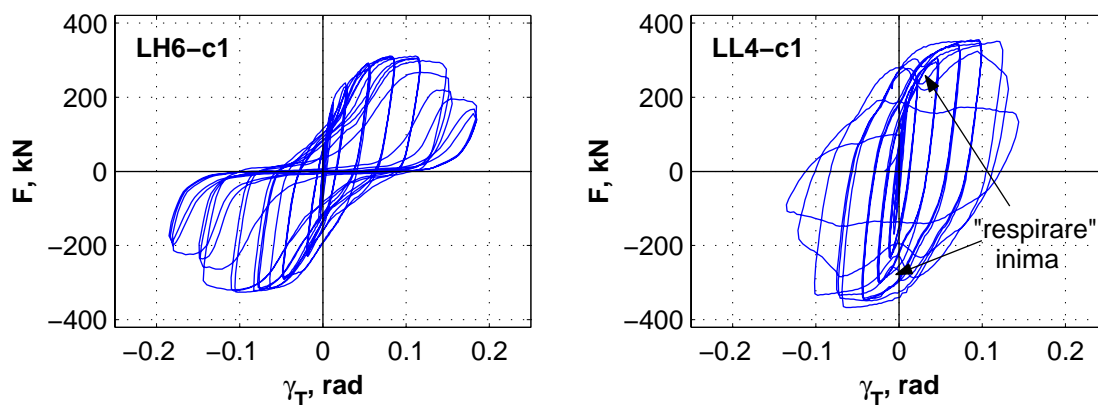
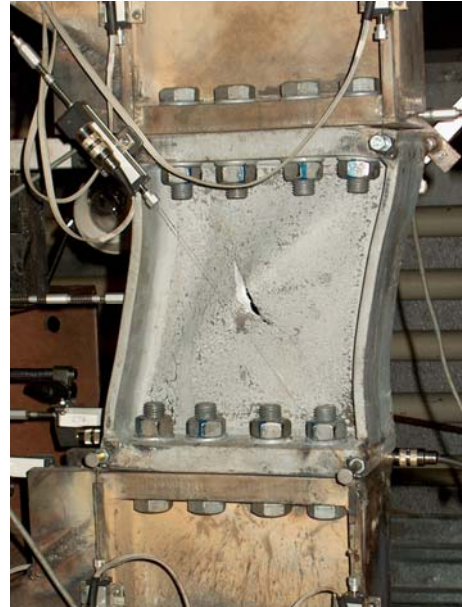


Figura 10: Relațiile forță – deformare totală F - γ_T pentru speciemenele LH6-c1 și LL4-c1.

Răspunsul barelor disipative scurte a fost dictat de forfecarea panoului de inimă, distanța dintre rigidizări constituind un parametru important al performanței lor. În cazul rigidizărilor rare, comportarea barelor disipative scurte a fost determinată de voalarea plastică a inimii, care a dus la degradarea rezistenței prin voalarea alternativă după direcția celor două diagonale (vezi Figura 10b și Figura 11b). Dispunerea deasă a rigidizărilor a limitat voalarea plastică excesivă a inimii, ducând la: (1) dezvoltarea forței capabile maxime a secțiunii; (2) un răspuns histeretic mai stabil; (3) o capacitate de rotire mai ridicată, dar și (4) o cedare mai rapidă prin forfecarea inimii pe conturul panoului.



(a)



(b)

Figura 11: Cedarea prin degradarea îmbinării la specimenul LH6-c2 (a) și voalarea plastică a inimii la specimenul LL4-c1 (b).

Cu excepția barelor disipative foarte scurte (seriile LL4 și LH4), îmbinarea nu a asigurat suprarezistența rezultată pe calcule. Acest fapt se poate datora unei forțe de întindere suplimentare la care au fost supuse îmbinările din cauza împiedecării deplasărilor axiale ale linkului datorită montajul experimental. Validarea acestei ipoteze și prezența fenomenului în structuri reale contravântuite excentric necesită studii suplimentare. Pentru asigurarea unui răspuns elastic al îmbinării, pe baza datelor experimentale din acest studiu se recomandă în cazul barelor disipative demontabile, limitarea lungimii acestora e_d la valoarea $0.8 \cdot M_y / V_y$. Rezistența barelor disipative cu lungimea limitată la această valoare poate fi calculată ca și pentru bara disipativă scurtă clasică. Deoarece pretensionarea totală a condus la o rigiditate inițială mai mare, o comportare histeretică mai stabilă și o capacitate de deformare mai ridicată, se recomandă pretensionarea totală a șuruburilor de înaltă rezistență la barele scurte demontabile.

Cu toate că modul de cedare al specimenelor a fost diferit, funcție de lungimea barei disipative, toate elementele au demonstrat o ductilitate excelentă. Cu excepția barelor disipative lungi cu rigidizări rare (LL7), restul specimenelor au demonstrat o capacitate de deformare ciclică stabilă de minim 0.1 radiani. Distribuția cerințelor de ductilitate între îmbinare și inimă la barele disipative intermediare (LL5-LL6 și LH5-LH6) a avut ca efect o creștere a capacității de rotire față de speciamele dominate de moduri de cedare "pure". Variabilitatea limitei de curgere a mărcilor de oțel folosite în construcții face totuși dificilă valorificarea activă a fenomenului.

Îmbinările semi-rigide cu placă de capăt pe înălțimea profilului reduc substanțial rigiditatea inițială a barelor disipative demontabile în comparație cu soluția clasică. Pentru calculul global al unor structuri contravântuite excentric cu bara disipativă demontabilă este necesară modelarea explicită a comportării semi-rigide a îmbinărilor, fie considerarea unei rigidități echivalente a elementului demontabil.

5. BIBLIOGRAFIE

ATC 40, (1996). "Seismic evaluation and retrofit of existing concrete buildings". Redwood City (CA), Applied Technology Council.

Bozorgnia, Y., Bertero, V.V., (2001). "Improved shaking and damage parameters for post-earthquake applications" Proceedings of the SMIP01 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data, Los Angeles, California, September 12, 2001, pp. 1-22.

Gasparini, D.A., and Vanmarcke, E.H. (1976). "Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra," Department of Civil Engineering, Research Report R76-4, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

Lungu, D., Aldea, A., Arion, C., Cornea, T., Văcăreanu, R. (2003). "Hazardul seismic în România", Partea I, cap. 2 din "Construcții amplasate în zone cu mișcări seismice puternice". Orizonturi Universitare, Timișoara.

Newmark, N., Hall, W., (1982). "Earthquake Spectra and Design", Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, CA

Stewart, J.P., Chiou, S.-J., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., Abrahamson, N.A. (2001). "Ground Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design". PEER Report 2001/09, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.

Whittaker, A., (n.d.). "Earthquake Engineering and Structural Dynamics II". accesat în martie 2003 de la: <http://overlord.eng.buffalo.edu/ClassHomePages/cie619/index.htm>

Engelhardt, M.D. and Popov, E.P. (1992). "Experimental performance of long links in eccentrically braced frames". Journal of Structural Engineering, Vol.188, No.11:3067-3088.

Prakash, V., Powell, G.H., and Campbell, S., (1994). "Drain-3dx Base Program Description and User Guide", Version 1.10.

Ricles J.M., Popov E.P., (1994). "Inelastic link element for EBF Seismic Analysis". ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 2: 441-463.

Fajfar, P. (2000). "A nonlinear analysis method for performance-based seismic design". Earthquake Spectra, 16(3): 573-92.