



UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI

Facultatea Construcții Civile Industriale și Agricole

Titularul prezentei teze de doctorat a beneficiat pe întreaga perioadă a studiilor universitare de doctorat de bursă atribuită prin proiectul strategic „Burse oferite doctoranzilor în Ingineria Mediului Construit”, beneficiar UTCB, cod POSDRU/107/1.5/S/76896, proiect derulat în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane, finanțat din Fondurile Structurale Europene, din Bugetul Național și cofinanțat de către Univeritatea Tehnică de Construcții București.

TEZA DE DOCTORAT

Rezumat

*Studii și cercetări asupra comportării
la acțiuni seismice a clădirilor
înalte cu structură de rezistență
din beton armat*

Doctorand

Ing. Adrian ZĂVOIANU

Conducător de doctorat

Prof. univ. dr. ing. Liviu CRAINIC

BUCUREȘTI

2013

CUPRINS

1. INTRODUCERE	3
1.1. Date generale. Formularea problemei.....	3
1.2. Obiectivele lucrării	4
1.3. Prezentarea tezei	5
2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR	7
3. ANALIZA SEISMICĂ A STRUCTURILOR ÎNALTE	8
3.1. Introducere	8
3.1.1. Date generale	8
3.1.2. Ipoteze de modelare.....	8
3.2. Studii numerice pentru structuri plane.....	9
3.3. Structuri numerice structuri tridimensionale	10
4. INFLUENȚA FACTORILOR DE REDUCERE A FORȚELOR LATERALE ASUPRA COMPORTĂRII STRUCTURILOR ÎNALTE DIN BETON ARMAT.....	14
4.1. Introducere	14
4.2. Descriere programului de studii numerice	14
4.3. Comentarii și concluzii	15
5. RELAȚII DE ECHIVALENȚĂ ÎNTRE DRIFTURILE UNGHIULARE MAXIME REZULTATE DIN CALCULUL ELASTIC ȘI NELINIAR PENTRU STRUCTURI ÎNALTE DIN BETON ARMAT	15
5.1. Introducere	15
5.2. Identificarea parametrilor.....	16
5.3. Relații de echivalență pentru structuri alcătuite din cadre	17
5.4. Relații de echivalență pentru structuri alcătuite din cadre și pereți	17
6. INFLUENȚA AMORTIZĂRII VÂSCOASE ASUPRA COMPORTĂRII STRUCTURILOR ÎNALTE DIN BETON ARMAT	18
6.1. Introducere.....	18
6.2. Descriere programului de studii numerice	18
6.3. Concluzii și comentarii	19
7. INFLUENȚA NELINIARITĂȚII GEOMETRICE PENTRU STRUCTURILE DIN CADRE	19
7.1. Introducere	19
7.1. Descriere programului de studii numerice	19
7.2. Comentarii și concluzii	20
8. CONCLUZII	20
8.1.1. Concluzii finale.....	20
8.1.2. Contribuții personale.....	21
8.1.3. Direcții viitoare de cercetare	22
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....	23

STUDII ȘI CERCETĂRI ASUPRA COMPORTĂRII LA ACȚIUNI SEISMICE A CLĂDIRILOR ÎNALTE CU STRUCTURĂ DE REZISTENȚĂ DIN BETON ARMAT

Cuvinte cheie: *clădiri înalte, analiza dinamică neliniară, beton de înaltă rezistență*

1. INTRODUCERE

1.1. Date generale. Formularea problemei

O definiție universală a conceptului de clădire înaltă nu este posibilă pentru că termenul de înălțime este unul relativ. Astfel o clădire care este considerată înaltă într-un anumit context al mediului construit poate fi percepută ca o clădire de înălțime mică sau medie în altă zonă. De asemenea din perspectiva calcului structural înălțimea sau numărul de etaje nu sunt neapărat cele mai importante caracteristici, o relevanță mai mare în acest sens o are flexibilitatea structurii, determinată în principal de raportul dintre înălțime și dimensiunile în plan ale structurii și secțiunile elementelor structurale.

Clădirile înalte prezintă unele aspecte specifice care le influențează comportarea la acțiuni seismice și prin urmare este necesară o abordare relativ diferită față de clădirile obișnuite. Simpla extrapolare a soluțiilor de conformare și a metodelor de calcul calibrate pentru structuri de înălțime medie sau joasă ar putea conduce la soluții neraționale, nesatisfăcătoare din punct de vedere al performanțelor structurale, economice sau al cerințelor arhitecturale (Taranath, 2010). În ultimul deceniu numeroase cercetări au fost realizate referitoare la proiectarea, modelearea și analiza seismică a structurilor înalte din beton armat, printre care se remarcă sintezele și ghidurile de proiectare elaborate de PEER (2010), LATBSDC (2008), CTBUH (2008).

Una din concluziile care se desprinde din studiile menționate mai sus este că cea mai potrivită metodă de analiză seismică pentru aceste tipuri de structuri este analiza incrementală dinamică neliniară. În trecut aplicarea acestei metode era dificil de pus în practică din cauza faptului că dimensiunile mari ale structurilor și complexitatea legilor de comportare histeretică pentru beton armat necesită un volum mare de calcul și pot apărea probleme numerice. De asemenea odată cu creșterea complexității structurii se amplifică și gradul de împrăștiere al rezultatelor, fiind necesară considerarea mai multor înregistrări seismice, ceea ce mărește semnificativ volumul de calcule. Totuși în ultimii ani numeroase progrese au fost realizate în ceea ce privește puterea de calcul și implementarea în programele de calcul a unor algoritmi eficienți pentru rezolvarea ecuațiilor matriciale de mișcare și evitarea problemelor numerice. Prin urmare în momentul actual se pot efectua analize dinamice neliniare pe structuri de dimensiuni mari în intervale de timp rezonabile pentru gamă largă de tipuri de structuri înalte și pentru diferite regimuri de înălțime.

Astfel prin intermediul analizelor neliniare se ilustrează influența unor aspecte specifice în comportarea și calculul structurilor înalte din beton armat. Printre acestea se remarcă contribuția modurilor superioare de vibrație, efectul reducerii coeficienților de amortizare

vâscoasă odată cu creșterea înălțimii clădirilor, influența valorilor factorilor de comportare utilizați la nivelul dimensionării preliminare, modul de considerare al neliniarității geometrice. De asemenea se prezintă particularitățile de comportare pentru tipuri de structuri speciale aplicabile pentru clădirile înalte precum sunt structurile de tip tub perforat sau structurile cu „outriggere” și centuri perimetrice.

În lucrarea de față se propune o metodologie de proiectare pentru structuri înalte ilustrată prin studii de caz pentru mai multe tipuri de structuri specifice clădirilor înalte din beton armat : cadre rigide, structuri tubulare, structuri duale cadre rigide-pereți interiori, structuri tub în tub, structuri cu „outriggere” și centuri perimetrice.

1.2. Obiectivele lucrării

Obiectivul principal al lucrării este reprezentat de identificarea particularităților de calcul și de comportare la acțiuni seismice pentru tipurile de structuri specifice clădirilor înalte din beton armat dimensionate și conformate în acord cu specificațiile și metodele simplificate de calcul prevăzute în codurile românești de proiectare în vigoare. Aceste aspecte specifice sunt evidențiate prin analizarea rezultatelor obținute utilizând metode avansate de calcul și recomandările celor mai recente studii de cercetare din domeniu. Prin urmare se dorește determinarea unor relații și procedee simplificate de calcul pentru obținerea unei mai bune corelări dintre valorile răspunsurilor structurale rezultate prin folosirea metodelor convenționale de calcul și cele rezultate în urma analizelor dinamice neliniare. Astfel se obțin informații despre comportarea neliniară a structurii pe baza dimensionării preliminare și se reduce volumul de calcule aferent procesului iterativ de proiectare al structurilor înalte din beton armat, în cazul utilizării unor metode avansate de calcul.

Un alt scop al acestei lucrări este prezentarea modului în care valoarea factorului de comportare, utilizat în dimensionarea preliminară, influențează răspunsul neliniar al structurilor înalte din beton armat. Valorile recomandate în coduri pentru acești coeficienți sunt calibrate pentru structuri de înălțime medie sau redusă și ar putea să nu fie potriviți pentru clădiri înalte. Prin urmare se cercetează modul în care variația factorului de reducere a forțelor laterale folosit inițial afectează răspunsul determinat în urma calculelor neliniare.

Un alt aspect specific structurilor înalte se referă la faptul că studiile experimentale indică o tendință de reducere a eficacității reducerii răspunsului structural prin amortizare vâscoasă. Prin urmare se recomandă utilizarea unor coeficienți de amortizare cu valori mai mici odată cu creșterea înălțimii. Prin urmare alt obiectiv este reprezentat de evaluarea modului în care reducerea fracțiunii din amortizarea critică, folosind relațiile propuse în diverse ghiduri de proiectare, afectează comportarea și valorile maxime ale deplasărilor relative de nivel și modul de distribuție al energiei seismice disparte în structură.

Alt obiectiv constă în evaluarea modului în care relațiile simplificate specificate în coduri pentru evaluarea sensibilității structurilor la influența efectelor de ordinul 2 sunt valabile și pentru structurile înalte.

De asemenea pe lângă considerentele de performanță structurală în această lucrare se dorește și ilustrarea unor aspecte referitoare la eficacitatea economică a clădirilor odată cu

creșterea înălțimii, în funcție de sistemul structural ales sau odată cu utilizarea unor materiale cu rezistențe mecanice superioare.

1.3. Prezentarea tezei

Obiectivul principal al acestei lucrări este reprezentat de identificarea particularităților de comportare și a eventualelor dificultăți în proiectarea clădirilor înalte cu structură de rezistență din beton armat supuse acțiunii seismice corespunzătoare hazardului seismic definit în P100-1/2006 pentru zona București. Aceste aspecte specifice sunt evidențiate prin intermediul unor studii de caz pentru diferite tipuri de structuri aplicabile pentru clădirile înalte din beton armat. Studiile numerice constau în efectuarea unui total de 1476 de cazuri de analiză dinamică neliniară pentru 21 de structuri cu regimuri de înălțime care variază între 21 și 71 de etaje. Dimensionarea preliminară a structurilor a fost realizată respectând principiile metodei proiectării capacității de rezistență și regulile de conformare și de detaliere prevăzute în normativele curente, utilizându-se metoda de calcul modal cu spectre de răspuns.

Pe lângă considerentele de performanță structurală în această lucrare sunt evidențiate anumite aspecte legate de performanțele economice ale structurilor analizate cuantificate prin valorile cantităților de materiale (beton, armătură, suprafața necesară de cofraj) normalizate la suprafețele utile la nivelul suprastructurii și prin eforturile generalizate (momente de răsturnare, forțe axiale și tăietoare) de la nivelul fundației de suprafață (radierului) în cazul infrastructurii. Prin urmare sunt prezentate studii comparative referitoare la eficacitatea economică și structurală pentru diferite sisteme structurale corespunzătoare unor anumite regimuri de înălțime.

De asemenea în literatura de specialitate se subliniază faptul că valorile recomandate în coduri pentru anumiți parametri utilizați în proiectarea clădirilor obișnuite și calibrați pentru structuri de înălțime redusă ar putea să nu fie potriviți pentru structurile înalte. Este cazul coeficientului de amortizare vâscoasă (fracțiunea din amortizarea critică ξ) pentru care studiile experimentale indică valori mai reduse odată cu creșterea înălțimii structurii. Prin urmare în această lucrare se prezintă mai multe analize comparative pentru evidențierea diferențelor la nivelul răspunsului structural obținute prin utilizarea atât a valorilor ξ prescrise în normative cât și a celor recomandate în literatura de specialitate.

Un alt parametru important în controlul răspunsului seismic al structurilor este reprezentat de factorul de reducere al forțelor seismice laterale (factor de comportare q). Pentru determinarea influenței valorii factorului de comportare (utilizat la dimensionarea inițială) asupra răspunsului neliniar al structurilor înalte din beton armat au fost efectuate analize dinamice neliniare pentru fiecare structură aleasă utilizând valori diferite ale q .

Teza de doctorat este structurată în 8 capitole și 3 anexe.

Primul capitol are caracter introductiv și fixează repere necesare studiilor efectuate în următoarele capitole. Prin urmare sunt prezentate aspecte referitoare la conformarea structurilor specifice clădirilor înalte din beton armat, evoluția în timp a acestor tipuri de

structuri precum și particularitățile și condițiile de utilizare în zone seismice ale a materialelor cu rezistențe superioare folosite de regulă în structurile înalte din beton armat.

Al doilea capitol al tezei este consacrat prezentării stadiului actual al cercetărilor referitoare la modelarea structurilor înalte din beton armat insistându-se asupra metodelor avansate de calcul la acțiuni seismice, modului de descriere a inelasticității materialelor și elementelor din beton armat sau a modului de considerare a amortizării vâscoase și a neliniarității geometrice.

Capitolul 3 este dedicat prezentării unor studii numerice comparative între rezultatele analizelor seismice obținute prin utilizarea unei metode simplificate de calcul (metoda de calcul modal cu spectre de răspuns) și cele obținute din analize dinamice neliniare. Pentru aceste studii de caz s-au considerat 21 de structuri specifice clădirilor înalte din beton armat (structuri din cadre exterioare rigide, structuri tubulare, structuri bazate pe interacțiunea dintre cadre exterioare rigide și pereți, structuri tub în tub sau structuri cu outriggere și centuri perimetrice). De asemenea în acest capitol se insistă și asupra eficacității economice a fiecărui tip de structură pentru diferite regimuri de înălțime.

În *capitolul 4* se prezintă modul în care variația valorilor factorilor de comportare utilizați în dimensionarea preliminară afectează răspunsul seismic neliniar pentru structurile descrise în capitolul anterior.

Pe baza rezultatelor obținute în capitolele 3 și 4 în *capitolul 5* se propun 2 relații de corelare între valorile drifturilor unghiulare maxime obținute utilizând metode de calcul simplificate și cele rezultate din analize dinamice neliniare. Aceste relații de echivalență sunt determinate utilizându-se un procedeu statistic de regresie multiplă cu 2 parametri. Primul parametru este reprezentat de un coeficient propus pentru considerarea influenței relative a modurilor superioare de vibrație raportate la contribuția primului mod. Al doilea parametru este factorul de reducere al forțelor seismice laterale.

În *capitolul 6* este prezentat modul în care reducerea fracțiunii din amortizarea critică influențează răspunsul structural pentru clădirile mai înalte de 30 de etaje. De asemenea este prezentat distribuția energiei disipate inelastic pe diferite grupuri de elemente.

Capitolul 7 prezintă comparații între răspunsurile structurale obținute cu și fără considerarea efectelor $P-\Delta$, pentru structurile alcătuite din cadre mai înalte de 20 de etaje. De asemenea se evaluează dacă limitările coeficientului de sensibilitate la influența efectelor de ordinul 2, definite în normativul P100-1/2006, conduc la rezultatele preconizate.

Capitolul 8 este dedicat unei prezentări generale a tezei, reluării concluziilor pe capitole și formulării concluziilor finale ale tezei, contribuțiilor personale și direcțiilor viitoare de cercetare.

Anexa A prezintă încărcările considerate la dimensionarea și analiza structurilor considerate pentru studiile de caz aferente tezei.

Anexa B prezintă rezultatele dimensionării preliminare pentru fiecare structură analizată cu ilustrarea dimensiunilor secțiunilor transversale ale elementelor, armările și procentele de armare rezultate și valorile eforturilor unitare normale și tangențiale maxime în secțiunile elementelor. În *anexa C* sunt reprezentate grafic accelerogramele sintetice utilizate.

2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR

Problema comportării și a calculului la acțiuni seismice în cazul structurilor înalte din beton armat constituie o preocupare de actualitate care, în ultimii decenii, a făcut obiectul unui număr important de studii și cercetări. Prin urmare în literatura de specialitate se găsesc numeroase lucrări referitoare la principiile de bază și regulile de conformare pentru tipurile de structuri aplicabile pentru structuri înalte sau superînalte, cum ar fi Smith și Coull (1991), Taranath (1997, 2010).

De asemenea pe această temă, în ultimii ani, au fost realizate o serie de proiecte ample de cercetare printre care se remarcă cele realizate de Pacific Earthquake Engineering Research Center (2010), Applied Technology Council 72-1 (2010), Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council (2008). În urma acestor proiecte au fost propuse ghiduri de proiectare în care se găsesc recomandări referitoare la alcătuirea de ansamblu, metodele de proiectare seismică, modelarea excitației seismice și criteriile de acceptare pentru structurile înalte. De asemenea în aceste ghiduri de proiectare sunt prezentate recomandări referitoare la modelarea structurilor înalte (modelarea amortizării, neliniaritatea geometrică, modelarea plasticității elementelor din beton armat).

Un alt amplu proiect de cercetare referitor la structuri înalte și materialele utilizate a fost realizat de către ministerul construcțiilor din Japonia în colaborare cu diverse institute de cercetare între anii 1988-1993 denumit „Development of Advanced Reinforced Concrete Buildings using High Strength Concrete and Reinforcement”. Acest proiect are o solidă bază experimentală, rezultatele fiind diseminate prin numeroase lucrări, una dintre cele mai cuprinzătoare fiind cea a lui Aoyama (2001).

Pe lângă proiectele de cercetare de mare amploare se observă un interes crescând în mediile academice din întreaga lume în ceea ce privește modelarea și metodele de calcul la acțiuni seismice pentru clădiri înalte și superînalte. Comportarea structurilor este ilustrată de regulă prin studii de caz care utilizează modele matematice bazate pe metoda elementului finit Lin și alții (2009) sau Miao și alții (2009).

De asemenea în jurnalele de specialitate se găsesc o serie de articole referitoare la aplicarea metodelor avansate de calcul și particularitățile de modelare pentru clădirile înalte. Printre acestea se remarcă aspecte referitoare la dimensionarea preliminară și optimizarea structurilor înalte Al-Ansari (2011), Hoseini și Imagh-E-Naiini (1999), modelarea comportării materialelor utilizate Cusson și Paultre (1994), Muruguma și Watanabe (1991), modelarea amortizării vâscoase Charney (2006), Goel și Chopra (1997), Hall (2006), Powell (2008), Satake și alții (2003), influența efectelor P- Δ Adam și alții (2004), ATC 72-1 (2010), comportarea histeretică a elementelor din beton armat Folinet (1995), Ibarra (2005), interacțiunea teren-structură și accelerograme utilizate Elasbee și Morray (1977), Stewart și Tileylioglu (2007), modelarea plasticității elementelor și valorile admisibile ale deformațiilor plastice, Haselton și alții (2008), scurtarea elementelor verticale puternic solicitate axial, Vafai și alții (2009).

PEER (2010) și ATC 72-1 (2010) au concluzionat că metodele de analiză seismică aplicabile pentru structurile înalte sunt analiza dinamică neliniară și analiza pushover multimodală. Însă analiza pushover prezintă unele complicații prin combinarea răspunsurilor modale pentru unele mărimi de răspuns cum ar fi spre exemplu rotirile plastice. Prin urmare metoda de analiză seismică cea mai recomandată pentru clădirile înalte este analiza dinamică neliniară. Modelarea degradărilor elementelor din beton armat

3. ANALIZA SEISMICĂ A STRUCTURILOR ÎNALTE

3.1. Introducere

3.1.1. Date generale

Acest capitol conține mai multe studii comparative cu scopul evidențierii diferențelor dintre rezultatele obținute folosind metode de calcul convenționale (calcul modal cu spectre de răspuns) și cele obținute în urma efectuării de analize dinamice neliniare pentru diferite tipuri de structuri înalte din beton armat. De asemenea este prezentată o analiză comparativă a eficacității fiecărui tip de structură pentru o gamă largă de regimuri de înălțime (20-70 etaje). Această evaluare ține cont atât de considerente de performanță structurală cât și de considerente economice. Pentru aceste studii de caz s-au considerat structuri alcătuite din cadre rigide, structuri bazate pe interacțiunea dintre cadre exterioare rigide și pereți, structuri tubulare, structuri tub în tub și structuri alcătuite dintr-un nucleu central outriggere și centuri perimetrice.

Dimensionarea preliminară a structurilor a fost realizată în conformitate cu normativele curente și respectând principiile metodei proiectării capacității de rezistență. Rezultatele dimensionării preliminare sunt prezentate în anexa B a tezei.

3.1.2. Ipoteze de modelare

Toate structurile analizate au o infrastructură similară de tip podium cu 4 niveluri subterane cu o înălțime de nivel de 4 m și cu dimensiuni în plan de 65 x 65 m. Modelarea interacțiunii teren-structură la nivelul fundației de suprafață și a pereților de subsol de pe contur a fost realizată printr-o metodă simplificată, utilizând resoarte elastice.

Pentru dimensionarea și analiza structurilor se utilizează rezistențele medii ale materialelor. În cazul betonului se folosește C60/75 ($f_{cm} = 68$ MPa), iar pentru armatură se utilizează ($f_{ym} = 575$ MPa) pentru toate elementele cu excepția armăturii transversale din stâlpi unde este necesară folosirea unor armături realizate din oțeluri cu limită superioară de curgere pentru a obține o confinare eficientă a betonului de înaltă rezistență. Prin urmare se va folosi un oțel cu limita de curgere de 800 Mpa. Pentru modelarea cu fibre a pereților și pentru determinarea curbelor limită de interacțiune pentru stâlpi este necesară cunoașterea legilor materialelor. Pentru determinarea capacității stâlpilor se utilizează 2 legi de comportare pentru beton confinat, respectiv pentru betonul neconfinat. Pentru beton neconfinat se utilizează legea descrisă în SR-EN 1992-1-1:2004, iar pentru beton confinat se

utilizează modelul Cusson Paultre (1994). În cazul modelării cu fibre se utilizează o lege constitutivă trilineară. Pentru armături se utilizează o lege constitutivă biliniară fără consolidare.

3.2. Studii numerice pentru structuri plane

Pentru aceste studii numerice s-au considerat două tipuri de structuri pentru mai multe regimuri de înălțime (5 - 30 etaje). Prima structură este reprezentată de un cadru cu o deschidere de 6 m și cu o înălțime de nivel de 3,5 m. A doua structură este un perete independent cu o lungime de 7 m și o înălțime de nivel de 3,5 m. Dimensionarea preliminară a fost realizată respectând principiile metodei proiectării capacității de rezistență și în conformitate cu normativele românești în vigoare utilizându-se un factor de comportare de 6,75 pentru cadru și 5,35 pentru perete.

Rezultatele analizelor seismice pentru structura din cadre

Comparând rezultatele celor două tipuri de analize (elastic spectral și dinamic neliniar) se constată ca drifturile unghiulare asociate stării limită ultime determinate din calculul dinamic neliniar sunt mai mari decât drifturile de cod pentru structurile cu $T_1 > 3s$ (figurile 3.1). Aceste depășiri au valori între 4 - 13 % pentru cadrul de 20 de etaje, 1 - 57 % pentru cadrul de 25 de etaje, respectiv 2 - 89 % pentru cadrul de 30 etaje. Amplificările deplasărilor relative de nivel sunt localizate la partea superioară a structurii (aproximativ 2/3 din înălțimea totală a clădirii). Pentru structurile cu mai puțin de 20 de etaje se observă că, de regulă, valorile drifturilor de cod nu sunt depășite de valorile medii rezultate din analizele neliniare.

Rezultatele analizelor seismice pentru peretele independent

Comparând rezultatele celor două tipuri de analize (elastic spectral și dinamic neliniar) se constată ca drifturile unghiulare asociate stării limită ultime determinate din calculul dinamic neliniar sunt mai mari decât drifturile de cod pentru structurile cu $T_1 > 3s$ (figurile 3.8). Aceste depășiri au valori între 8 - 65 % pentru cadrul de 20 de etaje, 4 - 59 % pentru cadrul de 25 de etaje, respectiv 10 - 133 % pentru cadrul de 30 etaje. Amplificările deplasărilor relative de nivel sunt localizate de asemenea la partea superioară a structurii. Pentru structurile cu mai puțin de 20 de etaje se observă că, de regulă, valorile drifturilor de cod nu sunt depășite de valorile medii rezultate din analizele neliniare.

Concluzii și comentarii

În concluzie pentru ambele tipuri de structuri se observă că în cazul clădirilor de peste 20 de etaje ($T_1 > 3s$) drifturile rezultate din analizele neliniare sunt mai mari decât drifturile de cod determinate din calcule simplificite, iar aceasta tendință tinde să se accentueze odată cu înălțimea clădirii. Acest lucru este cauzat de faptul că odată cu creșterea înălțimii

structurii aportul modurilor superioare (modurile 2, 3 și 4) raportat la contribuția primului mod crește semnificativ, atât prin mărirea maselor modale cât mai ales prin coeficienții de amplificare dinamică. Forțele de nivel asociate modurilor superioare nu au același semn pe întreaga înălțime a structurii și conduc la răspunsuri amplificate la partea superioară, iar pentru structuri foarte flexibile pot depăși semnificativ contribuția primului mod. De asemenea odată cu intensificarea incursiunilor postelastice structurile devin mai flexibile, perioadele cresc, iar comportarea descrisă anterior se accentuează.

Mai departe este de a fi extinsă studiul aspectelor prezentate în această lucrare pentru structuri tridimensionale, mai complexe, în care cele două tipuri de structuri studiate interacționează, iar acțiunea seismică are mai multe componente direcționale.

3.3. Structuri numerice structuri tridimensionale

Descrierea structurilor analizate

Pentru fiecare structură analizată se consideră aceleași dimensiuni în plan (35x35 m), aceeași înălțime de nivel (3,5 m), infrastructuri similare de tip podium cu 4 subsoluri (65 x 65 m) și aceleași caracteristici ale terenului. În această lucrare se analizează comportarea fiecărui tip de structură pentru serii a câte 3 regimuri de înălțime corespunzătoare intervalelor de eficacitate structurală și economică recomandate în literatura de specialitate pentru fiecare sistem structural.

În cazul structurilor alcătuite din cadre exterioare rigide limita de înălțime recomandată pentru care acestea sunt eficiente economic este de 30 etaje (Taranath, 2010), prin urmare au fost analizate clădiri cu P+20, P+25 și P+30 etaje. Pentru aceleași intervale de înălțime ca și pentru cadrele rigide a fost studiată comportarea unor structuri tubulare și structuri bazate pe interacțiunea dintre cadre exterioare rigide și pereți. Pentru aceste ultime două tipuri de structuri studiul se va extinde și pentru regimuri de 30 - 50 etaje.

Pentru regimuri de înălțime superioare (50, 60 și 70 de etaje) se vor analiza structuri tub în tub (tuburi perimetrice și nuclee centrale alcătuite din pereți) și structuri cadre rigide - nucleu central cu outriggere.

Rezultatele analizelor neliniare

În general pentru clădirile regulate cu înălțime medie sau redusă, conformate și dimensionate respectând codurile de proiectare, analizele neliniare indică valori ale răspunsului structural inferioare celor rezultate din calculele convenționale. Totuși în cazul clădirilor înalte analizate în acest capitol se constată că pentru structurile cu o perioadă proprie fundamentală mai mare de 3 s calculele dinamice neliniare reliefează o concentrare a drifturilor unghiulare maxime în partea superioară a structurii, cu valori mai mari decât cele rezultate din calculul elastic echivalent. Această tendință tinde să se accentueze odată cu creșterea înălțimii structurii. De asemenea zona de amplificare a deplasărilor relative de nivel rezultată din calculul neliniar tinde să migreze către vârful structurii odată cu creșterea flexibilității acesteia. Se observă că această limită de 3 s corespunde graniței dintre amplificarea și dezamplificarea dinamică a răspunsului asociat primului mod de vibrație. Prin

urmare se observă că pentru structurile de 20 de etaje din cadre rigide ($T_1 = 2,72$ s) și structurile alcătuite din cadre exterioare rigide și pereți ($T_1 = 2,52$ s) răspunsul maxim rezultat din calcul elastic este mai mare decât cel aferent calculului neliniar. Pentru celelalte structuri se observă valori superioare ale valorilor medii ale drifturilor unghiulare de vârf rezultate din analizele dinamice neliniare raportate la rezultatele calculelor elastice. În cazul structurilor din cadre rigide rezultă depășiri de până la 23 % și 41 % pentru structurile de 26, respectiv 31 de etaje. În cazul structurilor tubulare avem amplificări cu până la 8 %, 24 %, 40%, 41%, 80% și 159% corespunzătoare clădirilor de 21, 26, 31, 31 (varianta 2), 41 respectiv 51 etaje. Pentru structurile din cadre rigide și pereți se observă depășiri de maxim 13 %, 20%, 12%, 42 % și 119 % asociate clădirilor de 26, 30, 30 (varianta 2), 41, respectiv 51 etaje. În cazul structurilor tub în tub rezultă depășiri de până la 63 %, 87 % și 190 % pentru clădirile de 51, 61, respectiv 71 etaje. Pentru structurile cu outriggere și centuri perimetrice rezultă amplificări de maxim 34 %, 69 % și 113 % pentru clădirile de 51, 61 respectiv 71 etaje. Prin urmare este evidentă tendința de creștere odată cu flexibilitatea structurilor a diferențelor între valorile drifturilor unghiulare maxime obținute cu cele două metode considerate.

Amplificările drifturilor unghiulare în parte superioară a structurii sunt generate de concentrarea deformațiilor plastice maxime în grinzile cadrelor perimetrice în această zonă. Pentru sistemele dinamice flexibile apare tendința de defazaj între sensurile forțelor dinamice aplicate la bază și cele ale răspunsului la vârful structurii. Prin urmare în cazul grinzilor de partea superioară nu se produc cicluri complete de deformație în ambele sensuri și astfel rotirile plastice tind să devină cumulative. Totuși valorile maxime ale rotirilor plastice sunt mai mici decât cele admisibile, evaluate cu diferite relații propuse în literatura de specialitate. De asemenea amplitudinile rotirilor plastice tind să se reducă odată cu creșterea înălțimii structurilor.

Un alt aspect ce merită menționat se referă la faptul că pe măsură ce crește înălțimea clădirilor drifturile unghiulare maxime sunt din ce în ce mai mici în raport cu valorile admisibile. Acest lucru se datorează faptului că dimensiunile elementelor verticale nu mai sunt determinate, de regula din condițiile de limitare a deplasărilor laterale sau a eforturilor unitare tangențiale, ci de limitarea forțelor axiale adimensionalizate.

Forțele tăietoare de nivel rezultate din analiza neliniară au valori mai mari decât cele asociate calculului elastic. Prin urmare și forțele tăietoare din elemente vor avea valori mai mari decât cele rezultate din calculul static. Însă la dimensionarea armăturii transversale a elementelor seismice se consideră forțele tăietoare asociate mecanismului de plastificare. De asemenea în dimensionarea preliminară se consideră coeficienți de siguranță mai mari pentru rezistențele materialelor. Prin urmare forțele tăietoare capabile ale grinzilor au valori cu minim 25 % mai mari decât cele rezultate din analiza neliniară. În cazul stâlpilor se constată suprazistențe și mai mari (de minim 3,8 ori) deoarece cantitatea de armatură transversală din stâlpi este dictată de asigurarea unei bune confinări a betonului de înaltă rezistență, în acest scop utilizându-se armături cu limită de curgere de 800 Mpa. Pentru pereți forțele tăietoare capabile au valori cu minim 21 % mai mari decât cele rezultate din analiza neliniară.

Exemplu de reprezentare a rezultatelor prezentate în teză

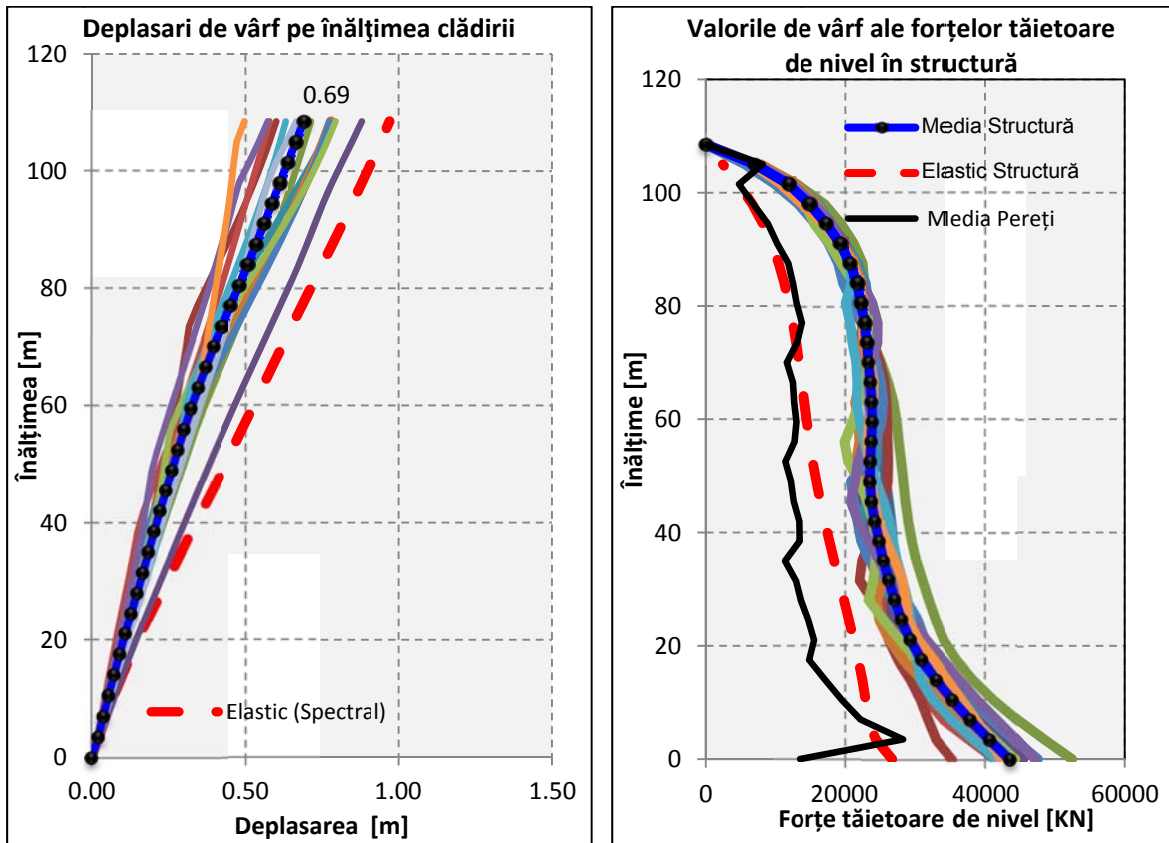


Figura 3.1 Valorile maxime ale deplasărilor de vârf și forțelor tăietoare de nivel pentru structura alcătuită din cadre rigide - pereți P+30 etaje

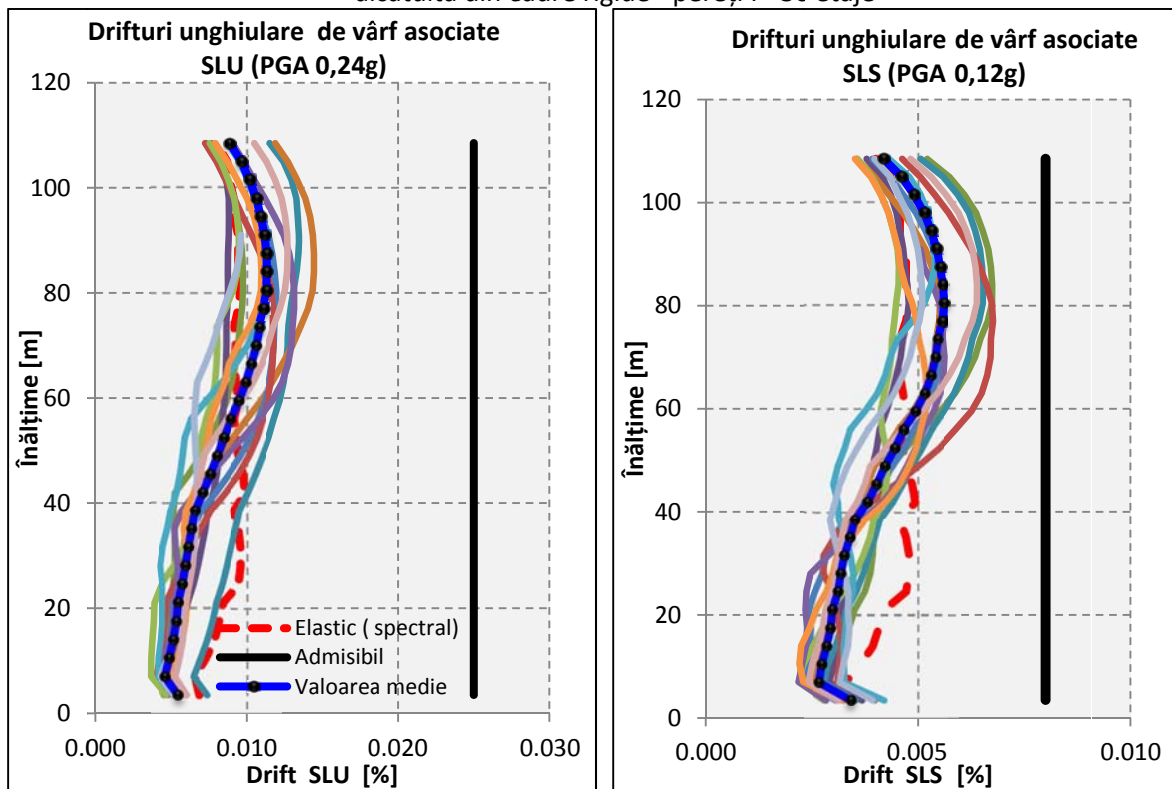


Figura 3.2 Valorile maxime ale drifturilor asociate SLU, respectiv SLS pe înălțimea structurii P+30 etaje alcătuită din cadre exterioare rigide și pereți

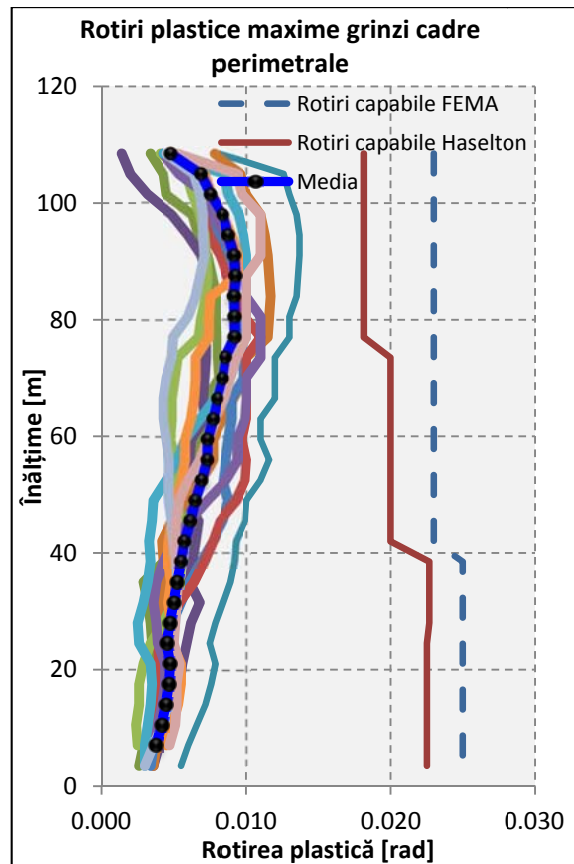


Figura 3.3 Valorile maxime ale rotirilor plastice ale grinzilor perimetrice structura alcătuită din cadre rigide - pereți P+30 etaje

Analizând consumurile specifice rezultate pentru studiile de caz aferente acestui capitol se constată că dimensionarea utilizând metode convenționale conduce la valori ale cantităților de materiale mai mari pentru structurile cu pereți decât cele cu aceeași înălțime alcătuite din cadre. Astfel în cazul clădirilor cu regim de înălțime de 21 - 31 etaje rezultă un surplus al necesarului de materiale pentru structurile cu pereți distribuit astfel: 15 - 30 % pentru beton, 13 - 18 % pentru suprafața de cofrare, 18 - 41 % pentru armatură, respectiv 31 - 60 % pentru momentul de răsturnare la nivelul fundației. Pentru structurile de 31 - 51 etaje diferențele sunt mai reduse 11 - 15 % pentru beton, 8 - 12 % pentru suprafața de cofrare, 3 - 9 % pentru armatură, respectiv 4-31 % pentru momentul de răsturnare la nivelul fundației. Acest lucru se datorează faptului că prin utilizarea pereților structurile devin mai rigide, perioadele proprii fundamentale scad și implicit amplificarea dinamică crește rezultând eforturi mai mari în elementele structurale. Rezultatele analizelor dinamice neliniare indică performanțe structurale mai bune pentru structurile cu pereți comparativ cu structurile în cadre exemplificate prin concentrări mai puțin accentuate și valori mai mici ale drifturilor maxime în partea superioară.

De asemenea pentru clădirile de 51 - 71 etaje se constată creșteri reduse ale cantității de beton prin introducerea outriggerelor și a centurilor perimetrice. Însă cantitatea de armatură scade cu 7 - 8 % pentru structurile cu outriggere. Acest lucru se datorează faptului că utilizarea acestor sisteme adiționale favorizează preluarea momentelor de răsturnare prin cupluri de forțe axiale în stâlpi, reducându-se astfel momentele la nivelul elementelor

cadrelor perimetrare, în special în grinzi. De asemenea utilizarea sistemelor adiționale permite un control mai bun al drifturilor prin reducerea concentrărilor valorilor maxime pe înălțime în condițiile utilizării unor deschideri mai mari la nivelul fațadei, ceea ce reprezintă un avantaj major din punct de vedere funcțional și arhitectural.

4. INFLUENȚA FACTORILOR DE REDUCERE A FORȚELOR LATERALE ASUPRA COMPORTĂRII STRUCTURILOR ÎNALTE DIN BETON ARMAT

4.1. Introducere

Atât studiile de caz aferente capitolul 3 al prezentei lucrări cât și literatura de specialitate indică faptul că analiza dinamică neliniară reprezintă unul din principalele instrumente în analiza structurilor înalte din beton armat. Totuși dimensionarea preliminară realizată cu utilizarea unei metode convenționale reprezintă o etapă importantă în acest proces. În filozofia curentă de proiectare a structurilor din beton armat pentru dimensionarea armăturii elementelor structurale se folosesc forțe laterale reduse, iar o mare parte din energia indusă de seism în structură este disipată prin direcționarea de incursiuni postelastice concentrate în zone convenabil alese. Capacitatea de deformare postelastice a structurii este asigurată prin respectarea regulilor și condițiilor de conformare și detalieri prescise în normative și ghiduri de proiectare.

Factorii de reducere ai forțelor laterale, denumiți și factori de comportare recomandați în codurile de proiectare sunt calibrați pentru structuri obișnuite de înălțime mică sau medie și prin urmare s-ar putea să fie nepotiviți pentru structurile înalte. De regulă valorile acestor factori de comportare sunt determinate utilizând analize de tip pushover. Însă analiza statică neliniară nu este aplicabilă pentru structuri înalte din cauza influenței semnificative a modurilor superioare de vibrație. O metodologie de determinare a influenței factorilor de reducere a forțelor laterale asupra răspunsului seismic în cazul structurilor înalte poate fi reprezentată de efectuarea unor studii parametrice utilizând diferite valori ale acestor factori pentru o gamă largă de tipuri de structuri înalte.

4.2. Descriere programului de studii numerice

Prin urmare în acest capitol sunt prezentate variațiile valorilor drifturilor unghiulare asociate stării limite ultime pentru structurile descrise în capitolul anterior pentru diferite valori ale factorilor de comportare, alese inițial. Pentru structurile alcătuite din cadre rigide și structurile tubulare s-au considerat factori de comportare cu valori de 4, 5, 6 și 6,75, iar pentru structurile alcătuite din cadre rigide și pereți valori de 3, 4, 5 și 6. De asemenea va fi prezentată variația cantităților de armatură asociate dimensionărilor preliminare folosind aceste valori.

4.3. Comentarii și concluzii

Variația factorului de comportare utilizat în dimensionarea preliminară de la o valoare de la 6,75 la 4 pentru structurile alcătuite din cadre conduce la o variație a valorilor drifturilor unghiulare rezultate din calculul neliniar de maxim 40 %. În cazul structurilor din cadre rigide și pereți o variație a q de la 6 la 3 conduce la o variație la nivelul drifturilor unghiulare rezultate din calculul neliniar de maxim 20 %. Prin urmare eliminarea concentrărilor valorilor maxime ale deplasărilor relative de nivel doar prin simpla modificare a factorilor de reducere a forțelor seismice laterale la nivelul dimensionării inițiale nu este o soluție viabilă.

Deși la prima vedere am putea considera că drifturile unghiulare se vor reduce odată cu utilizarea unor factori de comportare cu valori mai mici, acest lucru nu este valabil pe întreaga înălțime a structurii. La partea inferioară a structurii drifturile scad în general cu reducerea factorilor de comportare. Totuși în partea superioară se observă o tendință de amplificare a deplasărilor relative de nivel. Acest lucru poate fi determinat de creșterea energiei induse în structură de către seism odată cu întârzierea plastificării elementelor determinată de mărirea capacităților acestora. Acest lucru este ilustrat și de faptul odată cu reducerea factorilor de comportare se observă o creștere a energiei totale induse de seism în structură. De asemenea se observă că în urma dimensionării preliminare reducerea factorilor de comportare conduce la creșteri ale capacităților elementelor mai accentuate la etajele inferioare raportate la cele de la etajele superioare cu procente care variază între 1 - 13 %. Prin urmare deformațiile plastice maxime se vor concentra în zonele relativ mai slab armate.

5. RELAȚII DE ECHIVALENȚĂ ÎNTRE DRIFTURILE UNGHIULARE MAXIME REZULTATE DIN CALCULUL ELASTIC ȘI NELINIAR PENTRU STRUCTURI ÎNALTE DIN BETON ARMAT

5.1. Introducere

Studiile de caz prezentate în capitolele 3 și 4 sugerează faptul că pentru structurile cu o perioadă proprie fundamentală mai mare de 3 s valorile maxime ale drifturilor unghiulare obținute în urma analizelor dinamice neliniare depășesc valorile drifturilor rezultate din calcule convenționale. Aceste amplificări ale drifturilor sunt localizate de regulă la o distanță relativă de 0,5 - 0,9 din înălțimea totală a structurilor. Prin urmare este oportună determinarea unor relații de echivalență pentru o mai bună corelare a celor două tipuri de analize (liniar spectrală și dinamică neliniară). Astfel aceste ecuații pot fi utilizate pentru reducerea numărului de iterații necesare pentru proiectarea structurilor înalte din beton armat.

5.2. Identificarea parametrilor

Un prim pas în determinarea acestor relații este reprezentat de identificarea parametrilor care controlează acest tip de răspuns. Așa cum se observă în capitolul 3 al prezentei lucrări concentrarea drifturilor unghiulare maxime în zona superioară a structurii nu se manifestă pentru structurile cu mai puțin de 25 de etaje. De asemenea tendința de depășire a drifturilor rezultate din metode simplificate se accentuează odată cu creșterea flexibilității structurii. Prin urmare se poate supune că influența modurilor superioare este un factor determinant în fenomenul de concentrare a drifturilor unghiulare la partea superioară a structurilor.

Valorile relative pe înălțime și semnele forțelor sunt guvernate de valorile vectorilor proprii. Amplitudinile acestor forțe sunt determinate în principal de masa modală participantă pentru fiecare mod și de accelerațiile spectrale maxime corespunzătoare perioadelor pentru fiecare mod. Normativul P100-1-2006 definește variația accelerațiilor în funcție de zona spectrală prin coeficientul spectral de amplificare dinamică β . De regulă valorile β corespunzătoare perioadelor modurilor superioare se găsesc pe palierul de amplificare dinamică maximă spre deosebire de cazul modului propriu fundamental. De asemenea odată cu intensificarea incursiunilor postelastice structurile devin mai flexibile, perioadele cresc, iar comportarea descrisă anterior se accentuează.

Pentru cuantificarea influenței relative a modurilor superioare raportată la contribuția primului mod în această lucrare se propune coeficientul s definit de relația 5.1 denumit raport de influență modală.

$$s = \frac{\sum_{n=2}^4 M_n \cdot \beta_n}{M_1 \cdot \beta_1} \quad (5.1)$$

s = raport de influență modală.

M_n = masa modală corespunzătoare modului n .

β_n = coeficient spectral de amplificare dinamică, corespunzător perioadei modului n , evaluat conform relațiilor din P100-1/2006.

Al doilea parametru considerat este reprezentat de factorul de reducere a forțelor laterale q , a cărui influență asupra răspunsului nelinier al structurilor înalte din beton armat a fost ilustrată în capitolul 4.

Relațiile vor fi determinate utilizându-se un procedeu statistic de regresie liniară cu 2 parametri și vor avea forma:

$$dr = a \cdot s + b \cdot q + c \quad (5.2)$$

dr = raportul dintre drifturile unghiulare maxime rezultate din calculul nelinier și calculul elastic.

a, b, c – coeficienți ce urmează a fi determinați.

5.3. Relații de echivalență pentru structuri alcătuite din cadre

Prin aplicarea procedurii de regresie liniară multiplă descris anterior pentru valorile prezentate în figura 5.1 rezultă următoarea relație:

$$dr = 0,5 \cdot s - 0,12 \cdot q + 1,3 \quad (5.3)$$

pentru care valoarea coeficientului de determinare ajustat $R_a^2 = 0,91$ și o abatere medie de 9,22 % cu o variații între 1,3 - 28 %.

Ecuția 5.3 poate fi folosită pentru amplificarea drifturilor unghiulare maxime rezultate din calculul elastic cu metoda spectrelor de răspuns, în cazul structurilor din cadre, pentru intervalul de înălțime relativă 0,5 – 0,8 din înălțimea totală a structurii.

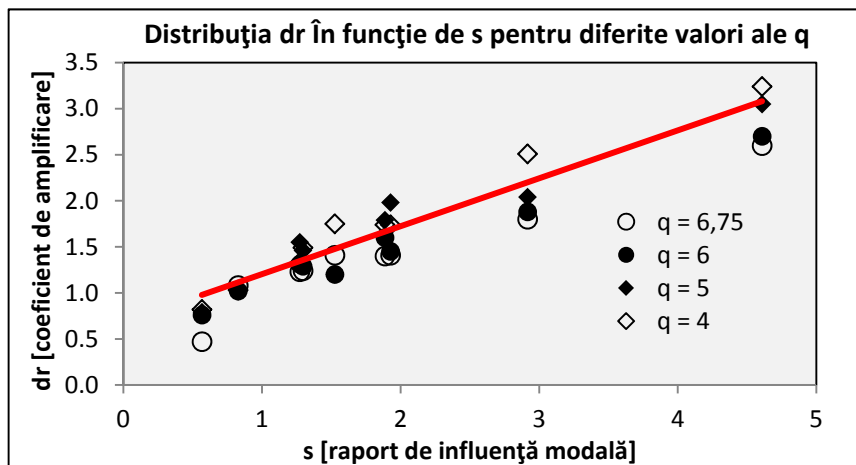


Figura 5.1 Valorile raportului dr în funcție de q pentru structurile din cadre

5.4. Relații de echivalență pentru structuri alcătuite din cadre și pereți

Prin aplicarea procedurii de regresie liniară multiplă descris anterior pentru valorile prezentate în figura 5.2 rezultă următoarea relație:

$$dr = 0,36 \cdot s - 0,1 \cdot q + 1 \quad (5.4)$$

pentru care valoarea coeficientului de determinare ajustat $R_a^2 = 0,95$ și o abatere medie de 7,3% cu o variații între 1 - 19%.

Ecuția 5.4 poate fi folosită pentru amplificarea drifturilor rezultate din calculul elastic cu metoda spectrelor de răspuns, în cazul stucturilor alcătuite din cadre rigide exterioare și pereți, pentru intervalul de înălțime relativă 0,5 - 1,0 din înălțimea totală a structurii.

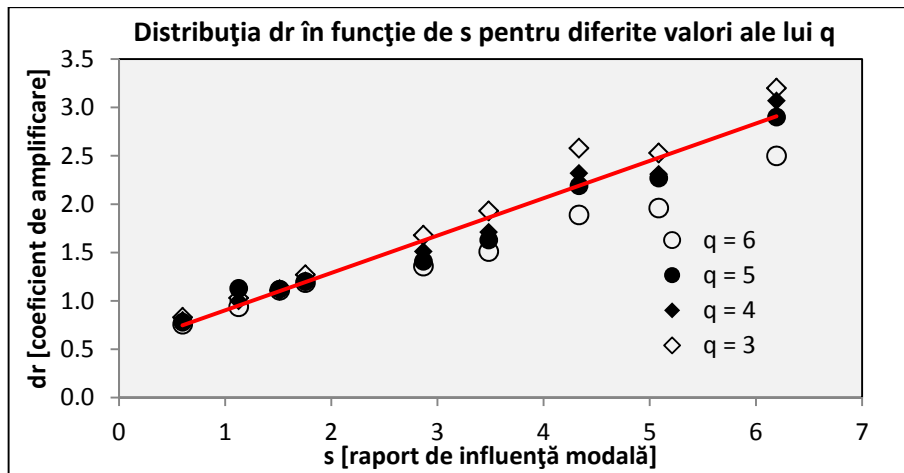


Figura 5.2 Valorile raportului dr în funcție de q pentru structurile din cadre rigide și pereți

6. INFLUENȚA AMORTIZĂRII VÂSCOASE ASUPRA COMPORTĂRII STRUCTURILOR ÎNALTE DIN BETON ARMAT

6.1. Introducere

Un alt aspect important referitor la proiectarea și comportarea structurilor înalte din beton armat este reprezentat de eficacitatea amortizării vâscoase în reducerea răspunsului structural. Majoritatea normativelor și ghidurilor de proiectare definesc influența amortizării vâscoase prin fracțiunea din amortizarea critică ξ , cu o valoare de 5 % pentru structurile din beton armat, indiferent de înălțime. Totuși mai multe studii experimentale precum cele prezentate de Ghoel și Chopra (1997) sau Satake și alții (2003) indică valori mai mici al fracțiunii din amortizarea critică pentru structurile mai înalte de 30 de etaje. Prin urmare o cantitate mai mică din energia indusă de seism în structură va fi disipată prin amortizare vâscoasă, urmând ca restul de energie să fie disipată prin celelalte mecanisme (energie disipată elastic, energie cinetică sau energie disipată inelastic). Odată cu mărirea cantității de energie disipată inelastic implicit vor crește și amplitudinile deformațiilor postelastice în structură rezultând astfel deplasări și drifturi mai mari.

6.2. Descriere programului de studii numerice

Pentru evaluarea reducerii fracțiunii din amortizarea critică odată cu creșterea înălțimii structurilor ATC 72-1 (2010) recomandă relații de evaluare a amortizării vâscoase, pentru analizele neliniare, în condițiile considerării disipării energiei hysteretice la definirea proprietăților componentelor elementelor structurale.

În acest capitol sunt prezentate studii comparative utilizând valori ale ξ obținute cu relațiile din ATC 72-1 și valori de 5 % pentru structurile cu o înălțime de peste 30 de etaje descrise în capitolul 3. Prin aceste studii se ilustrează modificarea răspunsului structural cu reducerea coeficienților de amortizare vâscoasă.

6.3. Concluzii și comentarii

Astfel pentru structurile tubulare se constată creșteri ale valorilor medii pentru drifturile unghiulare de vârf determinate din analizele neliniare cu 21 %, 22,4 % și 46,8 % asociate clădirilor cu o înălțime de 31, 41 respectiv 51 de etaje utilizându-se valori ale ξ de 3,87 %, 2,93 %, respectiv 2,35 %. În cazul structurilor din cadre rigide și pereți rezultă creșteri ale drifturilor unghiulare cu 16 %, 10 % și 20 % corespunzătoare clădirilor de 31, 41 respectiv 51 etaje utilizându-se valori ale ξ de 3,87 %, 2,93 %, respectiv 2,35 %. Pentru structurile tub în tub rezultă amplificări ale drifturilor unghiulare cu 12 %, 18% respectiv 13% aferente clădirilor de 51, 61 respectiv 71 de etaje utilizându-se valori ale ξ de 2,35 %, 1,97 %, respectiv 1,69 %. Aceste amplificări ale deplasărilor relative de nivel sunt determinate de creșterea deformațiilor plastice generate de creșterea cantității de energie disipate inelastic odată cu reducerea cantității de energie disipată prin amortizare vâscosă.

De asemenea se constată că pentru structurile înalte disiparea inelastică a energiei se concentrează în principal în grinzile cadrelor perimetrice (75 - 80 %). În elementele verticale (stâlpi și pereți) se disipă o cantitate nesemnificativă de energie inelastic (0 - 1%).

7. INFLUENȚA NELINIARITĂȚII GEOMETRICE PENTRU STRUCTURILE DIN CADRE

7.1. Introducere

Un alt aspect important în analiza structurilor înalte din beton armat poate fi reprezentat de influența neliniarității geometrice. Deși în literatura de specialitate se găsesc formulate mai multe teorii privind considerarea a acestui fenomen este în general acceptat că cea mai potrivită metodă de modelare a efectelor de ordinul 2 este utilizarea teoriei P - Δ . În acest caz se consideră doar deformația orizontală a structurii, iar ecuațiile de echilibru se scriu în funcție de poziția deformată a structurii.

În codul de proiectare seismică P100/1-2006, ca și în SR-EN 1998-1-1 se propune ca modul de evaluare influenței efectelor de ordinul 2 să fie determinat în funcție de valoarea coeficientului θ .

În acest capitol sunt prezentate studii parametrice pentru mai multe structuri reprezentative care pun în evidență influența efectelor P - Δ . Este de asemenea investigată variația pe înălțime a coeficientului θ pentru structurile considerate.

7.1. Descriere programului de studii numerice

Se analizează structurile tubulare și structurile alcătuite din cadre rigide cu înălțimi între 21 și 51 de etaje, descrise în capitolul 3. De asemenea se consideră aceleași ipoteze de modelare și aceleași accelerograme prezentate la începutul capitolului 3. În teză se prezintă valorile medii ale deplasărilor orizontale și ale drifturilor unghiulare obținute în urma efectuării unor analize dinamice neliniare cu și fără considerare a efectelor de ordinul 2.

7.2. Comentarii și concluzii

Se observă valori mari ale coeficientului de sensibilitate al deplasării relative de nivel θ pentru structurile înalte din beton armat, acesta putând reprezenta în anumite cazuri criteriul de dimensionare al secțiunilor transversale ale elementelor. Coeficientul de sensibilitate al deplasării relative de nivel θ depinde de valorile drifturilor unghiulare și de raportul dintre forțele axiale și forțele tăietoare totale de nivel. Pentru structurile înalte acest raport are o valoare mai mare decât în cazul clădirilor obișnuite deoarece tendința de creștere a forțelor seismice de nivel odată cu înălțimea este afectată de amplificarea dinamică mai mică în cazul primului mod, pe când foța axială crește aproximativ constant. Totuși rezultatele analizelor dinamice neliniare indică o influență redusă a efectelor $P - \Delta$ asupra răspunsului structural. Astfel prin considerarea explicită a efectelor de ordinul 2 rezultă valori medii ale drifturilor maxime mai mari cu cel mult 9 % pentru structurile tubulare de 31 - 51 etaje, 8 % pentru structurile tubulare de 21 - 31 etaje respectiv 9 % în cazul structurilor din cadre rigide de 21-31 etaje. Prin urmare metoda de evaluare a sensibilității structurilor la efectele de ordinul 2 recomandată în codurile curente de proiectare nu conduce la rezultate satisfăcătoare pentru structurile înalte. Observații similare privind aceste aspecte au fost formulate în ATC 72-1 (2010) sau de către Sullivan și alții (2008).

În general cercetările numerice indică faptul că efectele de ordinul 2 afectează considerabil răspunsul structural pentru clădirile la care există incursiuni inelastice importante pentru elementele de la baza structurii. În cazul structurilor analizate în această lucrare se constată comportare elastică sau dezvoltarea de rotiri plastice reduse la nivelul bazei stâlpilor cadrelor perimetrare.

În concluzie influența efectelor $P-\Delta$ este redusă pentru structurile înalte din beton armat în condițiile în care sunt respectate condițiile impuse de codurile de proiectare referitoare la limitarea eforturilor unitare normale și tangențiale pentru secțiunile transversale ale elementelor structurale sau menținerea deplasărilor relative de nivel sub limitele admisibile. Acest lucru este valabil chiar dacă valoarea coeficientului de sensibilitate al deplasărilor relative de nivel depășește limitele recomandate.

8. CONCLUZII

8.1.1. Concluzii finale

Studiile efectuate în această lucrare subliniază importanța utilizării metodelor avansate de calcul, în particular a analizelor dinamice neliniare, pentru proiectarea structurilor înalte din beton armat. Aceste tipuri de structuri sunt sisteme dinamice complexe cu incursiuni în domeniul postelastice, iar cercetarile numerice realizate indică faptul că utilizarea metodelor simplificate conduce la rezultate neacoperitoare.

De asemenea se constată că răspunsul structural nu poate fi controlat doar prin simpla variație a factorilor de comportare la nivelul dimensionării preliminare. Prin urmare

proiectarea structurilor înalte din beton armat trebuie realizată printr-un procedeu iterativ.

Concentrările valorilor maxime ale deplasărilor relative de nivel de la partea superioară a structurii, indicate de analiza neliniară pentru structurile cu perioada proprie fundamentală mai mare de 3 s, nu pot fi eliminate sau reduse semnificativ doar prin modificarea modului de armare. Sunt necesare ajustări la nivelul rigidităților relative dintre elemente adiacente sau chiar modificări ale modului de conformare de ansamblu a structurilor. Prin urmare în capitolul 5 se propun două relații simplificate de corelare a amplitudinilor drifturilor unghiulare maxime obținute folosind metode convenționale de calcul și cele obținute din analize dinamice neliniare. Astfel prin intermediul acestor ecuații se poate reduce numărul de iterații și implicit timpul necesar proiectării structurilor înalte din beton armat.

De asemenea se observă ca utilizarea analizelor convenționale indică performanțe structurale și economice superioare pentru structurile alcătuite din cadre rigide comparativ cu structurile care conțin și pereți. Acest lucru este în general infirmat de rezultatele obținute cu metode mai avansate de calcul.

Un alt aspect asupra caruia s-a insistat în această teză se referă la influența variației coeficienților de amortizare vâscoasă. Astfel, prin reducerea fracțiunii din amortizarea critică ξ în conformitate cu rezultatele ultimelor cercetări se obțin amplificări ale valorilor deplasărilor relative de nivel cu valori ce variază în general între 10 și 20 %.

De asemenea se constată că prin respectarea condițiilor de limitare a drifturilor unghiulare și a eforturilor unitare normale maxime în elementele verticale recomandate în codurile curente de proiectare influența efectelor de ordinul 2 nu este semnificativă în cazul structurilor de mai puțin de 50 de etaje din beton armat.

8.1.2. Contribuții personale

Principalele contribuții ale tezei pot fi sintetizate astfel:

- 1) Identificarea, prin analiza literaturii de specialitate a aspectelor specifice domeniului proiectării seismice a clădirilor înalte referitoare la tipurile de structuri aplicabile pentru clădirile înalte din beton armat, modelarea neliniară a structurilor precum și a particularităților de comportare și a condițiilor de utilizare în zone seismice ale materialelor cu rezistențe mecanice superioare folosite de regulă în aceste construcții.
- 2) Evaluarea modului în care utilizarea metodelor uzuale de proiectare și a recomandărilor din codurile curente de proiectare anticipează comportarea structurilor înalte din beton armat evidențiată prin utilizarea celor mai avansate metode de calcul și rezultatelor celor mai recente cercetări în domeniu. Acest aspecte sunt ilustrate prin numeroase studii de caz pentru o gamă variată de regimuri de înălțime. Prin urmare rezultă ca pentru structurile din beton armat, dimensionate și conformate cu respectare prevederilor din codurile curente, cu o perioada proprie fundamentală mai mare de 3 s metodele convenționale de calcul subestimează

valorile drifturilor unghiulare maxime. Acestea se concentrează de regulă în partea superioară a clădirii, iar această tendință se accentuează odată cu creșterea flexibilității structurii.

- 3) Propunerea unor relații simplificate pentru amplificarea valorilor drifturilor unghiulare obținute prin utilizarea unor metode convenționale astfel încât să corespundă rezultatelor obținute prin folosirea metodelor mai avansate de calcul și a celor mai recente cercetări în domeniul proiectării structurilor înalte. Cu ajutorul acestor relații se poate reduce numărul de iterații necesare în procesul de proiectare a structurilor înalte din beton armat.
- 4) Determinarea modului în care variația factorilor de reducere a forțelor seismice afectează răspunsul neliniar al tipurilor de structuri aplicabile pentru clădirile înalte din beton armat. Astfel s-a ajuns la concluzia că amplificările drifturilor unghiulare evidențiate de analizele neliniare nu pot fi reduse semnificativ sau eliminate doar prin modificarea factorilor de comportare considerați la nivelul dimesionării preliminare.
- 5) Evaluarea modului în care reducerea coeficienților de amortizare vâscoasă pentru structurile înalte afectează răspunsul seismic. Astfel utilizând valori ale fracțiunii din amortizarea critică evaluate cu relațiile propuse în cele mai recente ghiduri de proiectare se observă creșteri ale drifturilor unghiulare maxime cu valori ce variază între 10 și 20 % pentru structurile considerate.
- 6) Analizarea modului în care relațiile propuse în coduri pentru limitarea influenței efectelor de ordinul 2 sunt valabile și în cazul structurilor înalte alcătuite din cadre. Studiile numerice evidențiază faptul că deși valorile coeficientului de sensibilitate al deplasărilor relative θ propus în P100-1/2006 și SREN 1998-1-1 sunt foarte apropiate de limita admisibilă analizele neliniare indică creșteri reduse de maxim 9 % ale drifturilor unghiulare maxime prin utilizarea unui calcul de ordinul 2 consecvent.
- 7) Evidențierea unor aspecte de natura economică pentru diferitele sisteme structurale aplicabile pentru clădirile înalte din beton armat. De asemenea prezentarea modului în care creșterea înălțimii sau introducerea unor sisteme adiționale afectează consumurile de materiale.

8.1.3. Direcții viitoare de cercetare

Studiile efectuate în acesta lucrare evidențiază o tendință clară în ceea ce privește particularitățile de comportare ale clădirilor înalte din beton armat. Totuși observațiile au fost bazate pe analiza unui eșantion relativ redus de clădiri, în special în ceea ce privește variabilitatea în plan a structurilor. Pentru viitor prezintă interes modul în care prezența iregularităților în plan sau în elevație afectează comportarea structurilor înalte.

O altă posibilitate de continuare a studiilor efectuate în această teză este reprezentată de introducerea în relațiile propuse în capitolul 5 a influenței reducerii amortizării vâscoase odată cu creșterea înălțimii structurilor.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] **Aoyama, H., (2001)**, *Design of Modern Highrise Reinforced Concrete Structures*, Imperial College Press, London, p. 462.
- [2] **ATC 72, (2010)**, *ATC-72-1: Interim Guidelines on Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Buildings*, ATC-72-1, Applied Technology Council, Redwood City, California, p. 272.
- [3] **Computers & Structures Inc., (2011)**, *Components and Elements for Perform-3D and Perform-Collapse*, Computers & Structures Inc., Berkeley, California, p. 267.
- [4] **Cusson, D.,Paultre, P. , (1994)**, *High-Strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties*, ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 120, no. 3, p. 783-804.
- [5] **FEMA, (2000)**, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA 356 Report, prepared by the American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [6] **Goel, R.K., Chopra, A.K., (1997)**, *Vibration Proprieties of Buildings Determined from Recorded Earthquake Motions*, UCB/EERC Report 97/14, University of California, Berkeley, California.
- [7] **Haselton, C.B., Liel, A.B., Taylor Lange, S., Deierlein, G.G., (2008)**, *Beam-Column Element Model Calibrated for Predicting Flexural Response Leading to Global Collapse of RC Frame Buildings*, PEER Report 2007/3, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univeristy of California, Berkeley, California.
- [8] **Hangan, S. , Crainic L., (1980)**, *Concepte și metode energetice în dinamica construcțiilor*, Editura Academiei, București.
- [9] **Khan, F. R. and Rankine, J., (1980)**, *Structural Systems Tall Building Systems and Concepts*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat/American Society of Civil Engineers, vol. SC, p. 42
- [10] **Muguruma, H., Watanabe, F., (1991)**, *Ductility Improvement of High-Strength Concrete Columns with Lateral Confinement*, ACI, SP-121, p. 47-60.
- [11] **Otani, S., (2002)**, *Nonlinear Earthquake Response Analysis of Reinforced Concrete Buildings*, Departament of Architecture, Lecture Notes ,Graduate School of Engineering, University of Tokyo, Japan.
- [12] **Pacific Engineering Research Center, (2010)**, *Tall Buildings Initiative. Guidelines for Performace-Based Seismic Design of Tall Buildings*, version 1.0 , College of Engineering University of California, Berkeley, p.84.
- [13] **Taranath, S.T., (2010)**, *Reinforced Concrete Design of Tall Buildings*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, p. 923.