

UDK 624.131.55.001.8

Primljeno 5. 7. 2002.

Spektri odgovora za seizmičku procjenu zgrada

Mustafa Hrasnica

Ključne riječi

zgrada,
seizmička procjena,
spektar odgovora,
nelinearni proračun,
spektar ubrzanja,
pomak

Key words

building,
seismic evaluation,
response spectrum,
nonlinear analysis,
acceleration spectrum,
displacement

Mots clés

bâtiment,
évaluation sismique,
spectre des réponses,
calcul non-linéaire,
spectre des accélérations,
déplacement

Ключевые слова

здание (сооружение),
сейсмическая оценка,
спектр ответа,
нелинейный расчёт,
спектр ускорения,
сдвиг

Schlüsselworte:

Gebäude,
seismische Abschätzung,
Spektrum der Antworten,
nonlineare Berechnung,
Spektrum der
Beschleunigung,
Verschiebung

M. Hrasnica

Prethodno priopćenje

Spektri odgovora za seizmičku procjenu zgrada

Opisane su metoda postupnog guranja (*Pushover Analysis*) i metoda spektra kapaciteta (*Capacity Spectrum Method*) koje se primjenjuju u seizmičkoj procjeni postojećih i novih zgrada. Nelinearnim statičkim proračunom dobiva se krivulja kapaciteta konstrukcije, a zahtjev potresa predstavljen je spektrima ubrzanja. Obje krivulje su u formatu spektralno ubrzanje - spektralni pomak. Usporedba kapaciteta konstrukcije i zahtjeva potresa daje podatke o mogućem odgovoru konstrukcije na potres.

M. Hrasnica

Preliminary note

Response spectra for the seismic evaluation of buildings

Two methods that are used in the seismic evaluation of existing and new buildings, i.e. the pushover analysis and the capacity spectrum method, are described. The capacity curve for structures is obtained by nonlinear static analysis, and the earthquake demand is represented through acceleration spectra. Both curves are in the spectral acceleration - spectral displacement format. The comparison of structural capacity and earthquake demand provides an answer about possible response of structures to earthquake action.

M. Hrasnica

Note préliminaire

Spectres de réponse pour l'évaluation sismique des bâtiments

L'article décrit la méthode de la poussée progressive (*Pushover Analysis*) et la méthode du spectre de la capacité (*Capacity Spectrum Method*), utilisées pour l'évaluation du risque sismique dans les bâtiments existants et futurs. Le calcul statique non-linéaire permet d'obtenir la courbe de la capacité de la construction, tandis que la consigne sismique est représentée par les spectres de l'accélération. Les deux courbes sont dans le format accélération spectrale-déplacement spectral. Une comparaison de la capacité de la construction et la consigne sismique renseigne sur la réponse possible de la construction au séisme.

M. Храсница

Предварительное сообщение

Спектры ответа для сейсмической оценки зданий (сооружений, объектов)

В работе описан метод постепенного толкания (*Pushover Analysis*) и метод спектра мощности (*Capacity Spectrum Method*), применяемые в сейсмической оценке существующих и новых зданий. Нелинейным статическим расчётом получается кривая мощности конструкции, а вызов (требование) встряхивания (сотрясения) представлен/о спектрами ускорения. Обе кривые находятся в формате: спектральное ускорение – спектральный сдвиг. Сравнение мощности конструкции и требования встряхивания (сотрясения) даёт ответ о возможном ответе конструкции на встряхивание (сотрясение).

M. Hrasnica

Vorherige Mitteilung

Spektra der Antworten für die seismische Abschätzung von Gebäuden

Beschrieben sind Methoden des stufenweisen Anschließens (*Pushover Analysis*) und Methoden des Kapazitätsspektrums (*Capacity Spectrum Method*) die in der seismischen Abschätzung bestehender und neuer Gebäude angewendet werden. Mit unlinearer statischer Berechnung gewinnt man die Kapazitätsspektrumkurve der Konstruktion, wobei die Anforderung des Erdbebens durch Beschleunigungsspektra dargestellt wird. Beide Kurven sind im Format Spektralbeschleunigung-Spektralverschiebung. Der Vergleich zwischen der Konstruktionskapazität und der Anforderung des Erdbebens ergibt die Antwort über die mögliche Antwort der Konstruktion auf das Erdbeben.

Autor: Doc. dr. sc. **Mustafa Hrasnica**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Univeziteta u Sarajevu, BIH

1 Uvod

Razorno je djelovanje jačih potresa naročito izraženo u gusto izgrađenim gradskim sredinama u kojima se mogu očekivati najteže posljedice i za ljude i za građevinske objekte. S druge strane, većinu građevina čine postojeće zgrade, koje u najvećem broju ne ispunjavaju uvjete određene najnovijim tehničkim propisima za projektiranje i izvođenje građevina izloženih utjecaju potresa.

Osnovni cilj pravilnog projektiranja i izvođenja građevina jest očuvanje ljudskih života. To znači da se zgrade i pri najjačim potresima koji se očekuju u vijeku trajanja građevine ne bi trebale srušiti, ali se značajna oštećenja ne mogu izbjeći. Pitanje isplativosti popravka nakon težih oštećenja, odnosno dvojba rušiti ili sanirati posebna je tematika. Osim razmatranja tzv. sigurnosnih potresa, nekada želimo ustanoviti i za koju jačinu potresa možemo očekivati pojavu prvih oštećenja i na nenosivim i na nosivim elementima. Takvi se potresi mogu pojaviti više puta u vijeku trajanja neke zgrade. Posebno značenje imaju građevine u kojima su smještena kritična postrojenja, značajna za funkcioniranje cijelog društva. Takva bi postrojenja trebala funkcionirati i nakon snažnijih potresa.

Uvažavajući navedeno, važno je poznavati (pretpostaviti) kako će se ponašati neka promatrana konstrukcija za očekivani potres (potres koji se smatra mjerodavnim za planiranje građevina u nekom području). Drugim riječima, želimo provjeriti jesu li njezina nosivost, krutost i duktilnost dostatni da bismo postigli:

- ograničenje deformacija
- željenu razinu nosivosti konstruktivnih elemenata
- disipaciju energije unesene potresom.

Ovi zahtjevi mogu se označiti i kao osnovni ciljevi za dobro projektirane "aseizmičke" konstrukcije. Kritički osvrt na navedene konstruktivne zahtjeve daje ocjenu podobnosti promatrane konstrukcije.

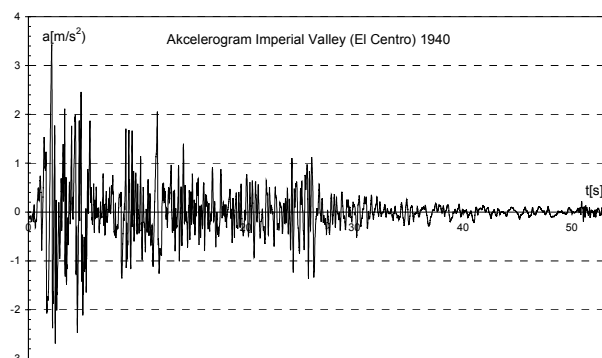
Nakon sagledavanja mogućeg odziva konstrukcije na potres može se pristupiti sanaciji, odnosno pojačanju nosivog sustava, ako smatramo da neki od zahtjeva nije ispunjen. Pritom svakako treba voditi računa da se poboljšanjem jednoga važnog svojstva nosivog sustava ne naruši drugo. Primjerice, povećanje krutosti radi ograničenja pomaka može smanjiti duktilnost konstrukcije.

U svrhu analiziranja ponašanja konstrukcije za djelovanje nekog očekivanog potresa razvijene su metoda spektra kapaciteta (*Capacity Spectrum Method*) i metoda postupnog guranja (*Pushover Analysis*) koje će biti razmotrene u idućim odjeljcima.

2 Tradicionalni prikaz spektara odgovora

Za inženjersko vrednovanje zapisa nekog potresa, iskazanog u obliku toka ubrzanja za trajanja potresa (slika 1.) i

za praktično projektiranje rabe se spektri odgovora (*response spectra*) [2, 4, 5, 8, 10]. Pod pojmom spektri odgovora podrazumijevaju se spektri pomaka, brzine i ubrzanja. U praksi se najviše rabe spektri ubrzanja, a predočeni u svom jednostavnom "zaglađenom" obliku oni su i sastavni dio svih suvremenih tehničkih norma za planiranje i građenje u seizmičkim područjima [6].



Slika 1. Akcelerogram potresa

Postupak proračuna spektara odgovora može se prikazati po koracima kako slijedi:

1. akcelerogram nekog potresa
2. sistem s jednim stupnjem slobode (ISS) s odabranim prigušenjem
3. bira se period osciliranja T_i
4. linearna dinamička analiza sustava s ISS u vremenu t
5. izdvajamo apsolutnu vrijednost maksimalnog odgovora
6. unosimo vrijednosti u spektralni dijagram
7. ponavljamo korake 3-6 za dovoljan broj perioda T_i
- 8.a ponavljamo korake 2-7 za novu veličinu prigušenja ili
- 8.b ponavljamo korake 3-6 za drugi akcelerogram potresa.

Ulazni podatak za proračun spektra odgovora jest akcelerogram nekog od potresa iz povijesti (primjer na slici 1.), koji apliciramo kao opterećenje za nosivi sustav sa jednim stupnjem slobode (ISS) gdje biramo čvrstu vrijednost prigušenja ξ . Ako se ne rade spektri za različite iznose prigušenja uobičajeno se usvaja $\xi = 5\%$. Krutost sustava ISS biramo tako da postignemo željenu veličinu perioda T . Zatim se provodi linearna dinamička analiza za odabrani vremenski interval t , a to je uglavnom dužina trajanja zapisa ubrzanja, tj. akcelerograma. Drugim riječima, u vremenu t , rješavamo poznatu jednadžbu:

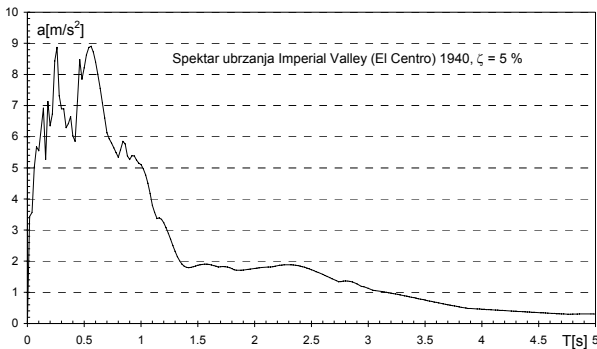
$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = -m \cdot \ddot{u}_g \quad (1)$$

gdje su:

- m - koncentrična masa sustava ISS
- c - prigušenje

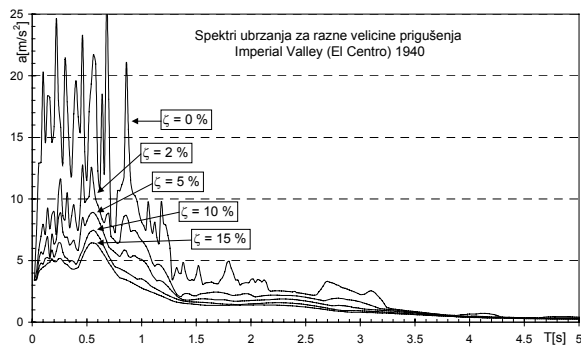
- k - krutost
- \ddot{u} - ubrzanje
- \dot{u} - brzina
- u - pomak
- \ddot{u}_g - ubrzanje tla.

Rješenje se uobičajeno dobiva uz primjenu nekog numeričkog postupka, a ubrzanja tla su zadana kao čvrste vrijednosti u vremenskim razmacima od npr. $\Delta t = 0,01 - 0,02$ sekunde. Iz cjelokupnog proračuna izdvaja se apsolutna vrijednost maksimalnog odgovora, ubrzanje, brzina ili pomak i unosi se u odgovarajući dijagram. Postupak se ponavlja za razne veličine perioda T_i i dobiva se željeni spektar odgovora. Na slici 2. je primjer spektra ubrzanja za akcelerogram potresa prikazanog na slici 1., uz pretpostavku prigušenja od 5%.



Slika 2. Spektar ubrzanja za akcelerogram potresa sa slike 1.

Cjelokupni opisani postupak možemo ponavljati za razne vrijednosti prigušenja i dobiti familiju krivulja. Primjer je pokazan na slici 3. S druge strane, mogu se uraditi spektri odgovora za razne akcelerograme, a za neku čvrstu veličinu prigušenja. Jedan takav primjer prikazan je na slici 4., gdje su uočljive velike razlike između pojedinih zapisa gibanja tla.

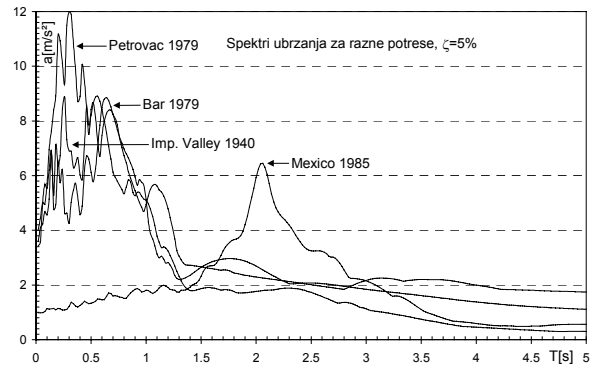


Slika 3. Spektri ubrzanja za razne veličine prigušenja

Rješenja jednadžbe (1) u sebi sadrže tzv. Duhamelove integrale, a nakon transformacija i pojednostavljenja [2, 4, 5, 10], koja ne utječu mnogo na točnost rezultata, dobivaju se jednostavne međusobne relacije između spektralnih pomaka Sd , brzine Sv i ubrzanja Sa :

$$Sa = \omega^2 \cdot Sd \tag{2}$$

$$Sd = \frac{1}{\omega} \cdot Sv \tag{3}$$



Slika 4. Spektri ubrzanja za akcelerograme nekoliko različitih potresa

Ovi izrazi omogućavaju tzv. tripartitno predstavljanje spektara odgovora. Drugim riječima, sva tri spektra prikazana su na jednom dijagramu koji se radi u logaritamskom razmjeru [2, 4, 5, 10].

3 Spektri odgovora u ADRS – formatu

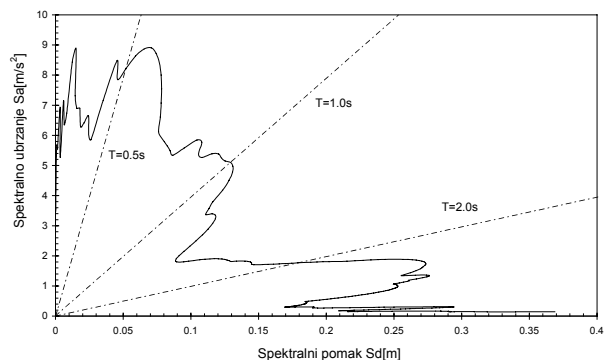
Tradicionalno je predstavljanje spektara odgovora u obliku $Sa-T$ odnosno $Sd-T$. Ili, na apscisi su periodi osciliranja, a na ordinati veličine promatranoga spektralnog odgovora, Sa , ili Sv , ili Sd . Za inženjere – projektante zanimljiva su spektralna ubrzanja Sa i spektralni pomaci Sd , koji su međusobno povezani formulom (2). Koristeći se formulom (2) i poznatom ovisnosti iz dinamike konstrukcija između kružne frekvencije ω i perioda osciliranja T :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \tag{4}$$

slijedi:

$$Sa = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot Sd \tag{5}$$

Na osnovi (5) crtaju se spektri odgovora u obliku $Sa-Sd$, poznatom [1, 3, 7] kao ADRS-format (*Acceleration Displacement Response Spectra*). Jedan takav primjer je



Slika 5. Primjer za spektar u ADRS - obliku

spektar na slici 5., gdje je spektar ubrzanja sa slike 2., koristeći se prethodnim formulama, transformiran u ADRS – format.

U takvom načinu prikazivanja periodi osciliranja T su predstavljeni radijalnim pravcima koji polaze iz ishodišta koordinatnog sustava.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{Sd}{Sa}} \quad (6)$$

Idea je da se na jednom dijagramu predstave i spektri ubrzanja Sa i spektri pomaka Sd . Za konvertiranje tradicionalnog $Sa-T$ dijagrama u $Sa-Sd$ dijagram, svakoj točki "i" s koordinatama Sa_i i T_i treba pridružiti vrijednost Sd_i prema jednadžbi:

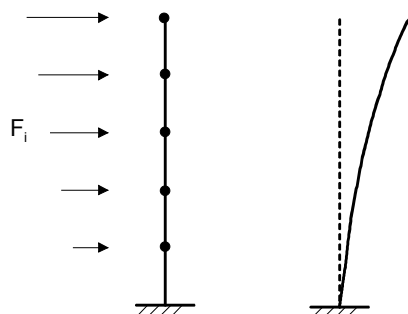
$$Sd_i = \frac{T_i^2}{4\pi^2} \cdot Sa_i \quad (7)$$

Spektralno ubrzanje se u dijagramima često predstavlja kao dio gravitacijskog ubrzanja g .

4 Metoda postupnog guranja (*Pushover Analysis*)

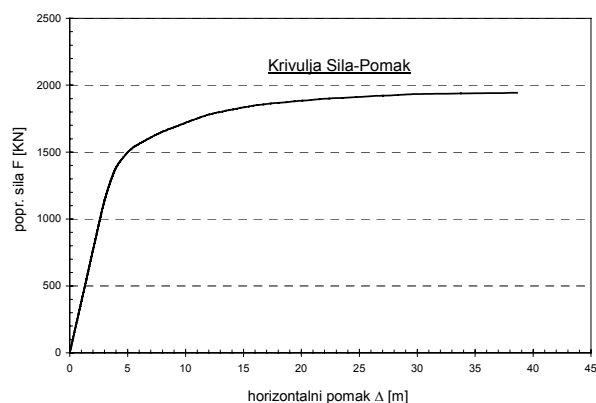
Ukupni kapacitet neke konstrukcije ovisi o tzv. kapacitetima nosivosti i deformabilnosti. Za uobičajeno opterećenje konstrukcije ostaju u linearno-elastičnom području rada materijala i odnos između nosivosti i deformacije je jednostavan. Opterećenje potresom, ovisno o njegovoj jačini, uzrokuje prelazak dijelova nosivog sistema u nelinearno područje rada materijala. Zbog toga je za inženjere veoma zanimljivo pretpostaviti ponašanje konstrukcije pošto njezini pojedini elementi prekorače svoju granicu linearno-elastičnog ponašanja. U tu svrhu razvijena je metoda postupnog guranja poznata kao *Pushover Analysis* [1, 3, 7].

Postupak predstavlja nelinearnu statičku analizu nekog odabranog modela konstrukcije izloženog realnom vertikalnom opterećenju i horizontalnom opterećenju niza poprečnih sila apliciranih u razinama katova (kod zgrada). Raspodjela horizontalnih sila po visini bira se tako da približno odgovara prvoj vlastitoj formi konstrukcije (slika 6.).



Slika 6. Raspodjela sila u skladu sa prvom vlastitom formom

Veličina sila se postupno (inkrementalno) povećava i prati se odgovor konstrukcije. Za početnu raspodjelu sila može se uzeti prva vlastita forma pomnožena s dijelom težine svakog kata. Kao mjerodavni prikaz ponašanja nosivog sustava uobičajeno se prate promjene pomaka najvišega kata u ovisnosti o ukupnoj apliciranoj horizontalnoj (poprečnoj) sili, dijagram $F-\Delta$. Dobivena krivulja (slika 7.) se naziva krivulja kapaciteta. Krivulja na slici 7. jest odnos između ukupne poprečne sile i pomaka vrha zgrade jedne sedmerokatne armiranobetonske konstrukcije mješovitoga nosivog sustava, koja je dobivena prethodno opisanom metodom.



Slika 7. Krivulja kapaciteta

Postupak može trajati dok ne dođe do potpune degradacije nosivog sustava, konstrukcija izgubi statičku stabilnost, ili dok se ne dostignu neke unaprijed utvrđene granice, obično izražene veličinom maksimalnog pomaka koji se želi postići. Može se uočiti da stupnjevitim dostizanjem granice tečenja pojedinih elemenata konstrukcije veličina nagiba na krivulju kapaciteta postaje sve manja (slika 7.). Drugim riječima, tangencijalna krutost "duboko" u nelinearnom području može pasti na svega nekoliko postotaka od svoje početne veličine, koja se obično naziva i elastična krutost.

Pri konstruiranju krivulje kapaciteta pretpostavljeno je da u odgovoru nosivog sustava izloženog potresu dominira prva vlastita forma osciliranja. To je općenito točno za zgrade niže i srednje visine sa maksimalnim osnovnim periodom osciliranja od približno 1 sekunde. Za zgrade s značajno dužim osnovnim periodom osciliranja preporučljivo je razmotriti i učinke viših vlastitih forma [7].

Jednostavniji oblik *Pushover* analize predviđa apliciranje niza horizontalnih sila u visinama katova proporcionalno prvoj vlastitoj formi, a intenzitet sila se postupno povećava. Daljnje bi poboljšanje postupka bilo da se nakon svake promjene krutosti, tj. dostizanja granice tečenja u nekom konstruktivnom elementu, redefinira model. To znači proračunati novi osnovni period osciliranja (nešto duži), pripadajuću osnovnu formu i novu raspod-

jelu horizontalnih sila. To bi predstavljalo proširenje opsega proračuna u odnosu na jednostavniji oblik nelinearne statičke analize koji se primjenom nekih računalnih programa može provesti u jednom “prolazu” [12].

5 Konverzija krivulje kapaciteta u koordinate ADRS - spektra

Krivulja kapaciteta je prema prethodnome izražena u koordinatama odnosno dijagramu sila–pomak ($F-\Delta$). Da bismo usporedili kapacitet promatrane konstrukcije sa “zahtjevom” koji ona treba ispuniti, a koji je izražen spektrom odabranog potresa, moramo izvršiti konverziju njezinih koordinata u format spektralno ubrzanje – spektralni pomak ($Sa-Sd$) odnosno u ADRS-format. U tu svrhu koristimo se [1] faktorom participacije prve vlastite forme (PF_1) i koeficijent participacije mase prve vlastite forme α_1 . Oni se proračunavaju prema formulama dinamike konstrukcija [1] kako slijedi:

$$PF_1 = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot \phi_{i1}}{\sum_{i=1}^n m_i \cdot \phi_{i1}^2} \quad (8)$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n m_i \cdot \phi_{i1} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n m_i \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n m_i \cdot \phi_{i1}^2 \right]} \quad (9)$$

gdje su:

PF_1 - faktor participacije prve vlastite forme

α_1 - koeficijent participacije mase prve vlastite forme

m_i - masa u visini kata i

ϕ_{i1} - amplituda prve vlastite forme u razini kata

n - broj katova

Nakon proračuna koeficijenata PF_1 i α_1 slijedi konvertiranje svake točke na $F-\Delta$ dijagramu s pomoću obrazaca:

$$Sa = \frac{F/W}{\alpha_1} \quad (\text{izraženo kao dio od } g) \quad (10)$$

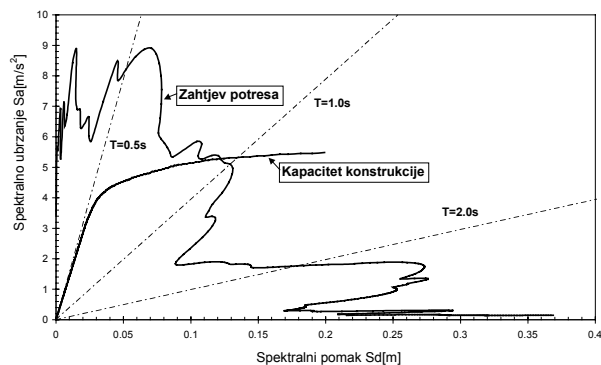
$$Sa = \frac{\Delta_{krov}}{PF_1 \cdot \phi_{krov,1}} \quad (11)$$

Ovdje je F ukupna aplicirana horizontalna (poprečna) sila, a W je ukupna težina zgrade, mjerodavna u seizmičkoj analizi. Kao što je već rečeno, najviše nas zanimaju pomaci na vrhu zgrade koje možemo označiti preciznije sa Δ_{krov} . Svakoju točki na krivulji kapaciteta $F-\Delta$ (odnosno

$F-\Delta_{krov}$) odgovara jedna točka sa koordinatama (Sa, Sd). Ova krivulja, sada u ADRS-formatu zove se krivulja spektra kapaciteta. Na slici 9. označena je kao kapacitet konstrukcije.

6 Metoda spektra kapaciteta (Capacity Spectrum Method)

Promatrajući rečeno (odjeljci 3. i 4.) i predočeno (slike 6. i 9.) vidimo da u istom formatu (ADRS-format) imamo predstavljene: s jedne strane kapacitet nosive konstrukcije preko krivulje kapaciteta konvertirane u krivulju spektra kapaciteta i s druge strane spektar odabranog potresa odnosno zahtjev koji treba ispuniti promatrana konstrukcija. Tako na jednom dijagramu $Sa-Sd$ možemo preklopiti dvije krivulje, kapacitet konstrukcije i zahtjev potresa (slika 9.). Ovaj postupak usporedbe kapaciteta konstrukcije i opterećenja potresom naziva se metoda spektra kapaciteta [1, 3, 7].



Slika 9. Metoda spektra kapaciteta

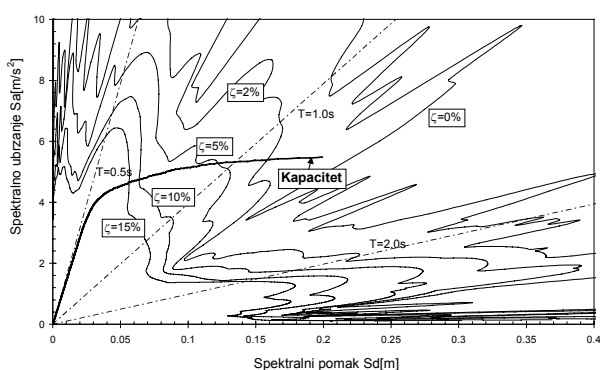
Sjecište dviju krivulja, kapaciteta i zahtjeva jest točka koja aproksimira odgovor konstrukcije na zadano opterećenje (*performance point*). Drugim riječima, ova točka pokazuje uvjete pod kojima je seizmički kapacitet konstrukcije jednak seizmičkom zahtjevu za konstrukciju izloženu nekom odabranom potresu. Globalno promatrano, ako krivulja kapaciteta prodire kroz krivulju zahtjeva, promatrana će građevina izdržati predviđeni potres (uz manja ili veća oštećenja, ovisno o veličini nelinearnih deformacija). Pomaci su veličine koje mogu veoma dobro karakterizirati ponašanje konstrukcije za djelovanje nekog pretpostavljenog potresa i važni su u procesu projektiranja novih ili procjene postojećih zgrada [11].

Promatrajući spektar kapaciteta uočavamo da su periodi osciliranja T_i predstavljeni radijalnim pravcima koji polaze iz ishodišta koordinatnog sustava $Sa-Sd$. Za neku točku na ADRS-spektaru period T_i može se proračunati prema obrascu (6). Radijalni pravac perioda T poklapa se s krivuljom spektra kapaciteta u području linearno-elastičnog ponašanja promatrane konstrukcije, odnosno

do pojave prvih plastifikacija u pojedinim elementima. Ovaj period koji odgovara punoj elastičnoj krutosti konstrukcije naziva se i početnim periodom osciliranja. U području gdje konstrukcija trpi nelinearne deformacije točkama na krivulji spektra odgovaraju radijalni pravci manjeg nagiba, tj. dužih perioda osciliranja. To je logično, jer pojavom nelinearnih deformacija i mjestimičnih plastifikacija, krutost konstrukcije opada i period osciliranja se produžava.

Uspoređujući krivulje “kapaciteta” i “zahtjeva” vidimo koliki iskorak u nelinearno područje mora napraviti neka konstrukcija da bi ispunila zahtjeve potresa.

Spektri ubrzanja, kao i ADRS-spektri, uglavnom se, najprije konstruiraju za iznos prigušenja od 5%. Radi se o tzv. viskoznom prigušenju i takav spektar predstavlja zahtjev potresa kada bi se promatrana nosiva konstrukcija ponašala linearno-elastično. Poznato je da već tijekom umjereno jakih potresa dijelovi konstrukcija prelaze u nelinearno područje rada materijala i, ovisno o svojoj duktilnosti, manje ili više uspješno vrše disipaciju energije unesene potresom. Ova se pojava u metodi spektra kapaciteta želi obuhvatiti putem dodatnog, tzv. efektivnog prigušenja (može iznositi i do 40%) [10]. Njime se na posredan način obuhvaća nelinearan rad konstrukcije. Uobičajeni iznos viskoznog prigušenja od 5%, karakterističan za linearno-elastični odgovor konstrukcije se povećava za dodatno prigušenje. Time se i “zahtjev” potresa izražen spektralnim krivuljama u Sa-Sd formatu značajno smanjuje. Nelinearno ponašanje i disipacija energije unesene potresom podrazumijevaju dovoljnu duktilnost konstrukcije. Krivulja kapaciteta i spektri za različite iznose prigušenja u ADRS-formatu prikazani su na slici 10.

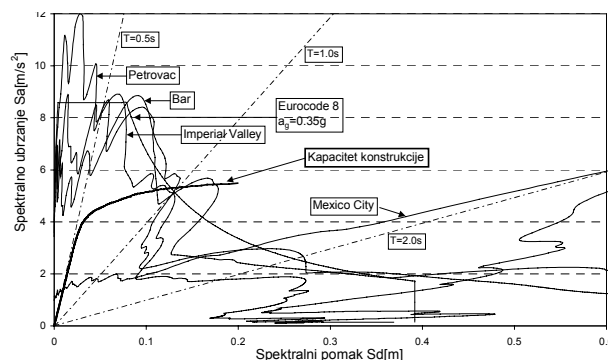


Slika 10. Kapacitet i ADRS-spektri za razne iznose prigušenja, potres Imp. Valley 1940.

Promatrajući sliku 10. jasno je da dodatno odnosno efektivno prigušenje ima pozitivan učinak jer umanjuje zahtjev potresa postavljen nekoj konstrukciji. Sjecište krivulje spektra kapaciteta sa spektralnom krivuljom za odgovarajuće prigušenje daje procjenu veličine nelinearnog

pomaka, što je veoma zanimljivo s inženjersko-projektantskog stajališta. Zahtjev potresa je najčešće predstavljen odabranim intenzitetom tzv. zaglađenih spektara prema tehničkim propisima ili je to, pak, odabrani zapis potresa prema lokalnim uvjetima terena i građevine. Za armiranobetonske konstrukcije vrlo je realan iznos efektivnog prigušenja (uključuje i viskozno prigušenje) od 15–20 % [1].

Spektri odgovora za razne potrese bitno se razlikuju (slika 5.) pa tako i moguće ponašanje konstrukcije. Na slici 11. su u ADRS-formatu predloženi krivulja kapaciteta i spektri različitih potresa za prigušenje od 5%. Osim spektara konstruiranih na osnovi akcelerograma četiriju potresa iz prošlosti, predstavljen je i spektar ubrzanja prema EC8 za srednju kategoriju tla i maksimalno ubrzanje od 0,35 g, što približno odgovara IX. zoni prema opisnim ili skalama intenziteta. Zahtjevi koje mora ispuniti konstrukcija razlikuju se od jednog do drugog spektra odnosno potresa. Također je vidljivo da zaglađeni spektar iz propisa dobro aproksimira spektre potresa na relativno tvrdom tlu. Svakako, ako se uzme u obzir disipacija energije odnosno efektivno prigušenje, zahtjevi postavljeni konstrukciji se smanjuju.



Slika 11. Usporedba kapaciteta sa ADRS-spektrima različitih potresa za prigušenje od 5%

7 Zaključak i pravci daljnjih istraživanja

Metoda spektra kapaciteta i metoda postupnog guranja učinkovita su sredstva za inženjersku analizu ponašanja konstrukcije u nelinearnom području rada materijala. To je naročito važno za opterećenje potresom. Krivulje spektra kapaciteta daju veoma dobru sliku odnosa nosivosti i deformacije konstrukcije.

Opisani je postupak naročito dobar za procjenu postojećih građevina. Velik broj postojećih zgrada ne zadovoljava najnovije seizmičke propise. Metoda spektra kapaciteta može na relativno jednostavan način pokazati kakvi su zahvati na nosivoj konstrukciji potrebni da bi se mogao očekivati njezin povoljan odziv na potres. Osnovne mjere koje se poduzimaju su poboljšanja:

- nosivosti,
- krutosti,
- duktilnosti,
- ili eventualno ugrađivanje posebnih izolatora za dispaciju seizmičke energije.

Naravno, prethodna su svojstva, posebice prva tri, međusobno spregnuta i neophodno je voditi računa da se prekomjernim poboljšanjem jednog ne ugrozi drugo. Primjerice, značajno povećanje krutosti radi smanjenja veličina deformacija može umanjiti duktilnost konstrukcije koja je važna za dispaciju energije unesene potresom.

Opisane metode imaju i svoja ograničenja. Cjelokupni predočeni postupak uzima u obzir dinamički odgovor samo u prvoj (osnovnoj) vlastitoj formi. Za velik broj zgrada ova pretpostavka nema velike posljedice na kvalitetu, odnosno primjenljivost inženjerske analize. Međutim, u specifičnim slučajevima, posebice kod visokih građevina, trebalo bi u obzir uzeti još nekoliko vlastitih forma. Jedno daljnje ograničenje nadovezuje se na prethodno. Metoda spektra kapaciteta razvijena je za simetrične zgrade kod kojih je dominantan odgovor u prvoj vlastitoj formi. Kako na najjednostavniji način obuhvatiti nesimetrične zgrade [9], predmet je tekućih, a sigurno i budućih istraživanja.

LITERATURA

- [1] ATC 40 *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Applied Technology Council, California Seismic safety Commission, Nov. 1996.
- [2] Bachmann, H.: *Erdbebensicherung von Bauwerken*, Birkhäuser Verlag Basel, 1995.
- [3] Badoux, M.: *Comparison of seismic retrofitting strategies with the capacity spectrum method*, 11th European Conference on Earthquake Engineering, 1998.
- [4] Chopra, A. K.: *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1995.
- [5] Čaušević, M.: *Potresno inženjerstvo (odabrana poglavlja)*, Školska knjiga Zagre, 2001.
- [6] Eurocode No 8 (EC 8), European Prestandard (ENV 1998), *Design Provisions for earthquake resistance of structures, Part 1 General and building*, European Committee for Standardization, 1994.-1996.
- [7] Freeman, S. A.: *Development and use of capacity spectrum method*, 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 1998.
- [8] Filiatrault, A.: *Éléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures*, Édition de l'École Polytechnique de Montréal, 1996.
- [9] Hrasnica, M.: *Nelinearni odgovor višekatnih zgrada izloženih utjecaju potresa*, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Zagreb, 1999.
- [10] Newmark, N. M.; Hall W. J.: *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkely, California, 1982.
- [11] Otani, S.: *Development of performance-based design methodology in Japan* Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes, Fajfar&Krawinkler(eds), Balkema Rotterdam, 1997.
- [12] Prakash, V.; Powell, G.H.: *DRAIN-2DX, DRAIN-3DX and DRAIN-BUILDING: Base Program Design Documentation*, Structural Engineering, Mechanics, and Materials, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, Report No. UCB/SEMM-93/16, 1993.