

ANALIZA ODNOSA ZAHTEVA I ODGOVORA SISTEMA ZA PROCENU PERFORMANSI U USLOVIMA SEIZMIČKOG DEJSTVA

Mladen Ćosić¹

Rezime

U ovom radu su prikazani aspekti analize odnosa zahteva koji se postavlja pred sistem i odgovora sistema u uslovima seizmičkog dejstva. Odgovor sistema se razmatra primenom nelinearne statičke seizmičke analize, dok se zahtev koji se postavlja pred sistem određuje iz spektra odgovora i krive zahteva. Ovakva metodologija određivanja odnosa zahtev/odgovor sistema preko nivoa ciljnog pomeranja, implementirana je u ATC propise kao metoda spektra kapaciteta. Razmatrani su mogući odnosi zahtev/odgovor sistema za različite nivoe ciljnog pomeranja, a preko performansi sistema: nivo deformacija, krutost sistema, duktilnost, egzistencija viskoznog i histerezisnog prigušenja. Na osnovu utvrđenih performansi u ovom radu, a za različite nivoe odnosa zahtev/odgovor sistema, moguće je vršiti kvalitativnu analizu za realne proračunske modele objekata.

Ključne reči: performanse sistema, metoda spektra kapaciteta, nelinearna statička seizmička analiza

1. UVOD

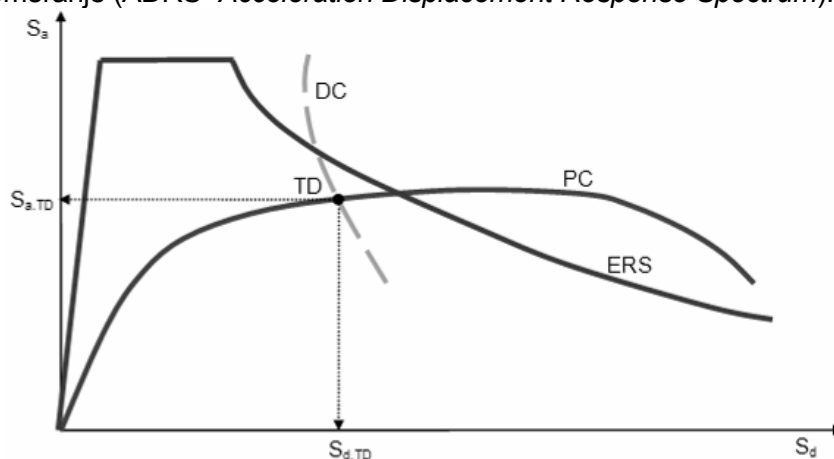
Razvoj savremene metodologije proračuna konstrukcija u uslovima seizmičkog dejstva prema konceptu PBEE performansi (PBEE- *Performance Based Earthquake Engineering*), zasniva se na primeni nelinearnih statičkih i dinamičkih analiza. Težište je na primeni nelinearne statičke seizmičke analize (NSPA- *Nonlinear Static Pushover*

¹ Mr, dipl.inž.građ., PhD student, mladen165@inffo.net

Analysis) i analize proračuna prema pomeranju (DDBD- *Direct Displacement Based Design*). Značajan napredak napravljen je i na polju primene nelinearnih dinamičkih analiza (NDA- *Nonlinear Dynamic Analysis*). Međutim, pošto se koncept PBEE analiza zasniva na analizi kapaciteta sistema do stanja kolapsa, to se moraju primeniti inkrementalne nelinearne dinamičke analize (INDA- *Incremental Nonlinear Dynamic Analysis*). Pošto se INDA analize još uvek ne primenjuju u praktične svrhe, to se za procenu nelinearnog odgovora uspešno primenjuju NSPA analize. Dakle, odgovor sistema se određuje na osnovu razvoja nelinearnih deformacija, a nivo merodavnog ciljnog pomeranja (TD- *target displacement*) se utvrđuje primenom metode spektra kapaciteta (CSM- *Capacity Spectrum Method*) [1]. Zahtev sistema se predstavlja preko krive zahteva (DC- *demand curve*), dok se odgovor sistema predstavlja preko krive kapaciteta ili *pushover* krive (PC- *pushover curve*). U PBEE metodologiji ovaj odnos se prikazuje kao odnos kapacitet/zahtev C/D (C- *capacity*/D- *demand*). Pošto se primenom CSM metode može grafički sagledati odnos C/D, to je i za analizu performansi u ovom radu primenjena CSM metodologija.

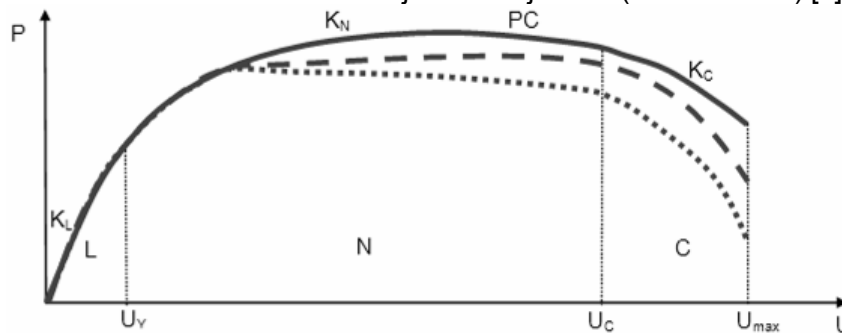
2. ANALIZA NELINEARNOG ODGOVORA SISTEMA

CSM metoda se zasniva na određivanju nivoa ciljnog pomeranja iz preseka PC i DC krive MDOF (*multi degree of freedom system*) sistema izloženog dejstvu zemljotresa. DC kriva se konstruiše iterativnim postupkom, a PC kriva iz inkrementalno-iterativne procedure. Na slici 1. prikazani su elastični spektar odgovora (ERS- *elastic response spectrum*), PC i DC kriva u formatu spektralno ubrzanje-spektralno pomeranje (ADRS- *Acceleration Displacement Response Spectrum*).



Slika 1. Određivanje TD pomeranja CSM metodom (ADRS format)

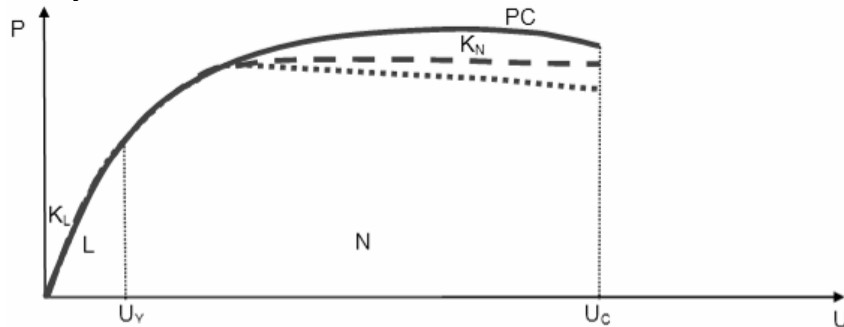
U ovom radu analiza odnosa C/D prikazana je u formatu P-U (sila-pomeranje) radi jednostavnosti, uzimajući u obzir da se DC kriva prethodno konvertuje iz ADRS formata u P-U format. Istraživanje sprovedeno u ovom radu zasniva se na ponašanju MDOF sistema zgrada u uslovima zemljotresnog dejstva. Generalna podela ponašanja zgrada pri nelinearnom odgovoru je na duktilne, neduktilne i prelazne kategorije između prethodne dve. Veliki broj testova sprovedenih na regularnim i neregularnim okvirima prezentovan u studiji [2] i preliminarnim istraživanjima, ukazuje na varijaciju u odgovoru pri nelinearnom ponašanju sistema. Na slici 2. prikazani su odgovori sistema sa egzistencijom linearnog (L- *linear*), nelinearnog (N- *nonlinear*) i domena kolapsa (C- *collapse*). Izražen N domen ukazuje na duktilno ponašanje zgrada sa mogućim vrednostima krutosti sistema u nelinearnom domenu $K_N > 0$, $K_N \approx 0$, $K_N < 0$, tako da je $K_N \leq K_L$. Ovakvo duktilno ponašanje zgrada je povoljno obzirom na mogućnost znatne disipacije histerezisne energije i plastifikaciju sistema povoljnim mehanizmima loma u uslovima dejstva zemljotresa (*ductile failure*) [3].



Slika 2. Odgovori sistema sa duktilnim ponašanjem $\square L$, $\square N$, $\square C$, $K_N \leq K_L$

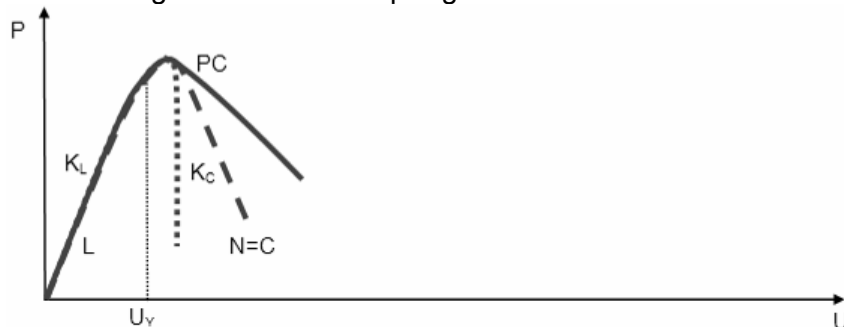
U određenom broju istraživanja [2], a posebno kod neregularnih okvirnih sistema zgrada niže spratnosti, utvrđeno je nepostojanje C domena. I pored toga što ovakva zgrada može razvijati povoljan mehanizam loma, određivanje nivoa TD pomeranja može predstavljati problem usled različitog odgovora sistema za različite tipove tla na kojem je objekat fundiran. Za tipove tla kod kojih je brzina smičućih seizmičkih talasa niža, nivo TD pomeranja se pomera ka C domenu, tako da se u određenim situacijama i ne može odrediti nivo TD pomeranja. Sa druge strane, ovakav odgovor sistema može biti i problem numeričkog rešenja, jer je za okvirne sisteme zgrada potreban veliki broj inkremenata i iteracija, a takođe potrebno je i pooštriti kriterijume tolerancije za rezidualno (neizbalansirano) opterećenje. Na slici 3. prikazani su odgovori sistema sa egzistencijom L i N domena, i

nepostojanjem C domena, a za različite vrednosti $K_N > 0$, $K_N \approx 0$, $K_N < 0$, tako da je $K_N \leq K_L$.



Slika 3. Odgovori sistema sa duktilnim ponašanjem □L, □N i bez C domena □C, $K_N \leq K_L$

Za razliku od duktilnog modela ponašanja zgrada, kod neduktilnog ili krtoeg mehanizma loma zgrada (*brittle failure*) nema N domena ili je isti u okviru C domena (slika 4.). Ovakav model ponašanja karakteriše nagli i iznenadan kolaps zgrada.

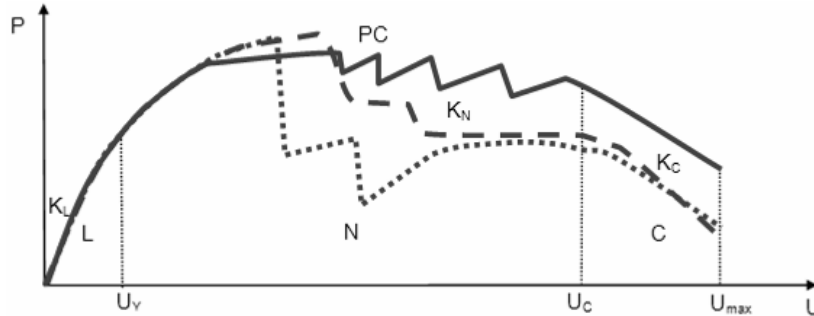


Slika 4. Odgovori sistema sa neduktilnim ponašanjem □L, □N, □C (ili □C)

Kod sledećeg modela karakteristična je nagla promena krutosti sistema (*saw-tooth shape*) $K_N > 0$, $K_N \approx 0$, $K_N < 0$ u N domenu (slika 5.). Sistem se generalno ponaša duktilno, dok je promena krutosti u N domenu frekventna, tako da određivanje nivoa TD pomeranja u ovom slučaju može biti veoma složeno. Problem se može rešiti primenom određenih postupaka, kao što je izjednačavanje energije deformacije u N domenu za dati model ponašanja i idealizovani sa konstantnim K_N .

Na osnovu prethodno izloženih modela nelinearnih odgovora sistema, može se konstatovati da prvi model najbolje opisuje duktilno ponašanje višespratnih okvirnih sistema zgrada, tako da će se u

daljim razmatranjima analiza C/D odnosa i procena performansi sprovesti za dati model.

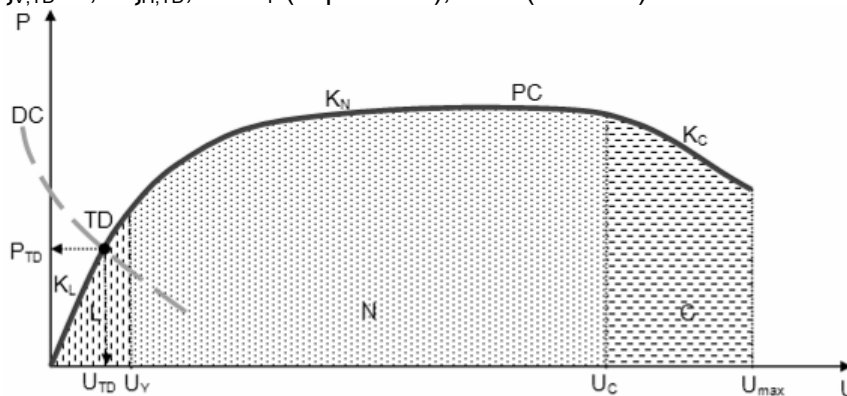


Slika 5. Odgovori sistema sa duktilnim ponašanjem $\square L$, $\square N$, $\square C$, (ili $\square C$) i promenljivim K_N

3. ANALIZA ODNOSA C/D I PROCENA PERFORMANSI

U procesu određivanja odnosa C/D i procena performansi sistema diskretne vrednosti PC i DC kriva razmatraće se kao skupovi uređenih parova $S_{PC}(U_{PC}, P_{PC})$ i $S_{DC}(U_{DC}, P_{DC})$. Ukoliko postoji presek PC i DC krive, onda je moguće odrediti TD pomeranje, a zatim utvrditi nivo duktilnosti μ_{TD} , viskozno $\xi_{V,TD}$ i histerezisno $\xi_{H,TD}$ prigušenje. U prvom slučaju (slika 6.) prikazan je model kod koga je nivo TD pomeranja određen u elastičnoj oblasti:

$$\begin{aligned}
 S_{DC} \cap S_{PC} = TD, \quad \square!TD: \quad & \square U_{TD} \square \square \square \square P_{TD} \square \square \\
 0 < U_{TD} \leq U_Y, \quad 0 < P_{TD} \leq P_Y, \quad & K = K_L \\
 \mu_{TD} \leq \mu = 1, \quad \mu_{TD} = U_{TD}/U_Y & \\
 \square \xi_{V,TD} > 0, \quad \square \xi_{H,TD}, \quad M = U_Y & \text{ (supremum), } m = 0 \text{ (infimum)}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

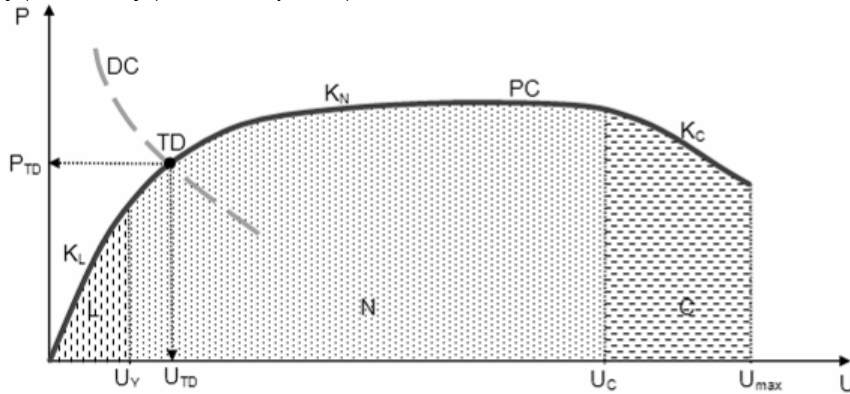


Slika 6. Analiza odnosa C/D za $0 < U_{TD} \leq U_Y$, $\mu_{TD} \leq \mu = 1$

Drugi slučaj odnosa C/D (slika 7.) je nešto povoljniji u odnosu na

prethodni, ali je u ovom slučaju duktilnost μ_{TD} manja od minimalno potrebne prema propisima $\mu_{CODE,min}$:

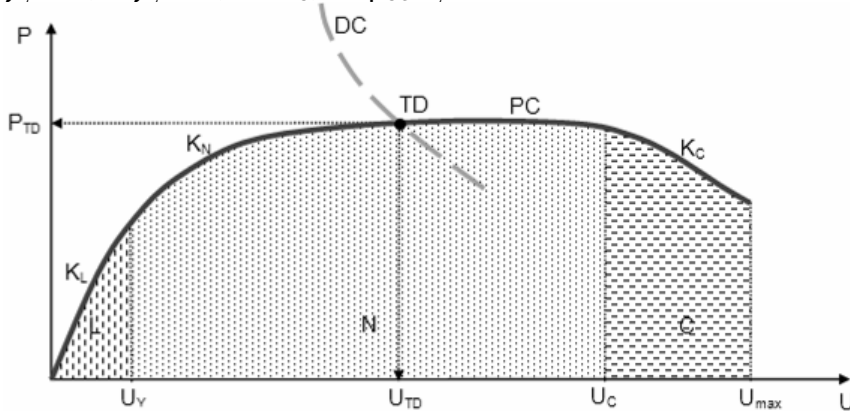
$$\begin{aligned}
 S_{DC} \cap S_{PC} = TD, \quad \square !TD: \quad \square U_{TD} \square \square \square P_{TD} \square \square \\
 U_Y < U_{TD} < \mu_{CODE,min} U_Y, \quad P_Y < P_{TD} < P_{\mu, CODE,min}, \quad K = K_N \geq 0, \quad K_N \square K_L \\
 \mu = 1 < \mu_{TD} < \mu_{CODE,min}, \quad \mu_{TD} = U_{TD}/U_Y, \quad \mu_{CODE,min} \approx 2 \\
 \square \xi_{V,TD} > 0, \quad \square \xi_{H,TD} > 0, \quad M = \mu_{CODE,min} U_Y, \quad m = U_Y
 \end{aligned}
 \tag{2}$$



Slika 7. Analiza odnosa C/D za $U_Y < U_{TD} < \mu_{CODE,min} U_Y, \mu = 1 < \mu_{TD} < \mu_{CODE,min}$

Treći slučaj odnosa C/D (slika 8.) je najpovoljniji jer je između ostalog i duktilnost μ_{TD} u granicama optimalno potrebne:

$$\begin{aligned}
 S_{DC} \cap S_{PC} = TD, \quad \square !TD: \quad \square U_{TD} \square \square \square P_{TD} \square \square \\
 \mu_{CODE,min} U_Y \leq U_{TD} \leq U_C, \quad P_{\mu, CODE,min} \leq P_{TD} \leq P_C, \quad K = K_N \geq 0, \quad K_N \square K_L \\
 \mu_{CODE,min} \leq \mu_{TD} \leq \mu_C, \quad \mu_{CODE,min} \approx 2, \quad \mu_{TD} = U_{TD}/U_Y \leq \mu_{CODE,max}, \quad \mu_C = U_C/U_Y \\
 \square \xi_{V,TD} > 0, \quad \square \xi_{H,TD} > 0, \quad M = U_C, \quad m = \mu_{CODE,min} U_Y
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

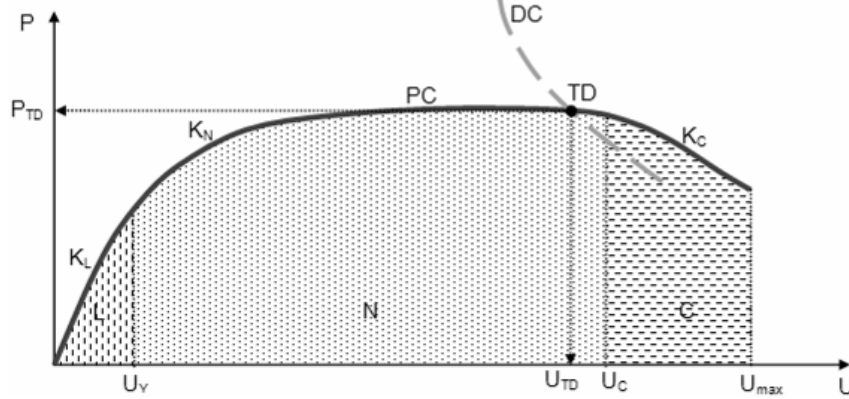


Slika 8. Analiza odnosa C/D za $\mu_{CODE,min} U_Y \leq U_{TD} \leq U_C, \mu_{CODE,min} \leq \mu_{TD} \leq \mu_C$

Četvrti slučaj odnosa C/D (slika 9.) je delimično povoljan zbog

prevelike realizovane duktilnosti μ_{TD} :

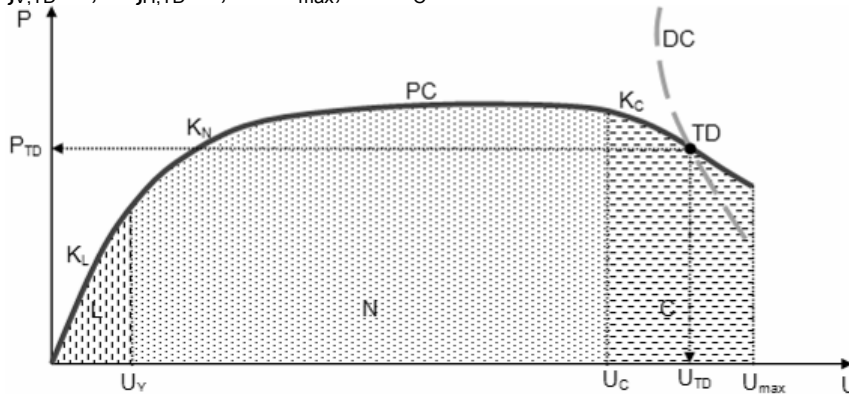
$$\begin{aligned}
 S_{DC} \cap S_{PC} = TD, \quad \square!TD: \quad \square U_{TD} \square \square \square P_{TD} \square \square \\
 \mu_{CODE,max} U_Y < U_{TD} \leq U_C, \quad P_{\mu, CODE,max} < P_{TD} \leq P_C, \quad K = K_N \geq 0, \quad K_N \square K_L \\
 \mu_{CODE,max} < \mu_{TD} < \mu_C, \quad \mu_{TD} = U_{TD}/U_Y, \quad \mu_C = U_C/U_Y \\
 \square \xi_{V,TD} > 0, \quad \square \xi_{H,TD} > 0, \quad M = U_C, \quad m = \mu_{CODE,max} U_Y
 \end{aligned}
 \tag{4}$$



Slika 9. Analiza odnosa C/D za $\mu_{CODE,max} U_Y < U_{TD} \leq U_C$, $\mu_{CODE,max} < \mu_{TD} < \mu_C$

Peti slučaj odnosa C/D (slika 10.) je nepovoljan zbog prevelike realizovane duktilnosti μ_{TD} i dobijenog nivoa TD pomeranja u kolapsnoj oblasti:

$$\begin{aligned}
 S_{DC} \cap S_{PC} = TD, \quad \square!TD: \quad \square U_{TD} \square \square \square P_{TD} \square \square \\
 U_C < U_{TD} \leq U_{max}, \quad P_C > P_{TD} \geq P_{max}, \quad K = K_C \\
 \mu_C < \mu_{TD} \leq \mu_{max}, \quad \mu_{TD} = U_{TD}/U_Y, \quad \mu_C = U_C/U_Y, \quad \mu_{max} = U_{max}/U_Y \\
 \square \xi_{V,TD} > 0, \quad \square \xi_{H,TD} > 0, \quad M = U_{max}, \quad m = U_C
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

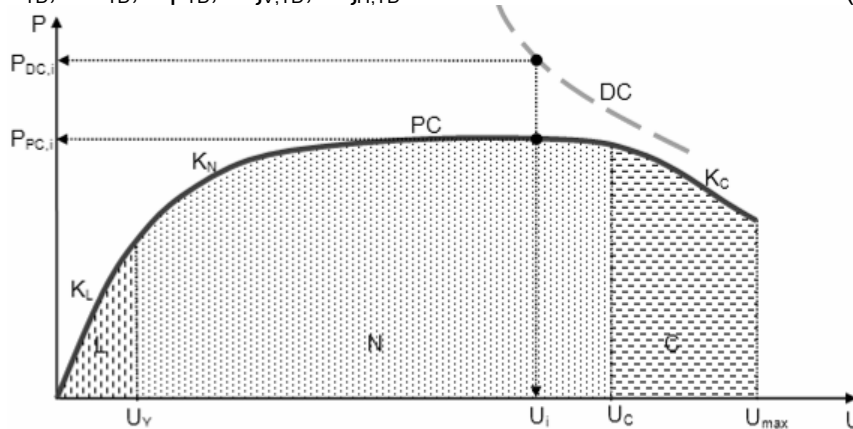


Slika 10. Analiza odnosa C/D za $U_C < U_{TD} \leq U_{max}$, $\mu_C < \mu_{TD} \leq \mu_{max}$

Šesti slučaj karakteriše situacija u kojoj nije moguće odrediti nivo TD pomeranja (slika 11.) jer nema preseka PC i DC krive:

$$S_{DC} \cap S_{PC} = \square, \square TD, \square U_i; P_{DC,i} > P_{PC,i} \quad (6)$$

$$\square U_{TD}, \square P_{TD}, \square \mu_{TD}, \square \xi_{V,TD}, \square \xi_{H,TD}$$



Slika 11. Analiza odnosa C/D kada $\square TD$

4. ZAKLJUČAK

Analiza odnosa C/D za procenu performansi sistema u uslovima seizmičkog dejstva zahteva razmatranje na više različitih nivoa: nosivost, krutost, duktilnost, prigušenje (viskozno, histerezisno, efektivno), indeks oštećenja (DI), globalni (DR) i međuspratni driftovi (IDR). Sa druge strane, PBEE metodologija zahteva multidisciplinarni pristup u određivanju ovih ključnih faktora preko NSPA, DDBD, NDA ili INDA analiza, a posebno se naglašava analiza sistema primenom inkrementalno-iterativnih procedura.

5. LITERATURA

- [1] ATC 40, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Volumes 1. and 2., Applied Technology Council, Redwood City, USA, 1996, 346p.
- [2] Ćosić M.: *Nelinearna statička seizmička analiza višespratnih okvira*, Magistarska teza, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2010, 230str.
- [3] Lađinović Đ., Folić R., Ćosić M.: *Comparative Analysis of Seismic Demands of Regular Multi-Story Concrete Frames*, Banja Luka Earthquake - 40 years of Construction Experience, International Conference on Earthquake Engineering, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 2009, pp. 129-143.