

Primljen / Received: 6.11.2015.

Ispravljen / Corrected: 29.8.2016.

Prihvaćen / Accepted: 30.9.2016.

Dostupno online / Available online: 10.3.2017.

Utjecaj horizontalne krivine i kuta kosine stupova na seizmički odziv ab mostova

Autori:



Mr.sc. **Nina Serdar**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Crne Gore
Građevinski fakultet
ninas@ac.me



Prof.dr.sc. **Srđan Janković**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Crne Gore
Građevinski fakultet
srdjan@t-com.me



Prof.dr.sc. **Mladen Ulićević**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Crne Gore
Građevinski fakultet
mladen@t-com.me

Prethodno priopćenje

Nina Serdar, Mladen Ulićević, Srđan Janković

Utjecaj horizontalne krivine i kuta kosine stupova na seizmički odziv ab mostova

U radu je analiziran utjecaj radijusa horizontalne krivine, kuta kosine stupova i oblika stupova na seizmički odziv mosta. Ukupno je analizirano 18 mostova okvirnog sustava. Za potresne zapise koji po magnitudi, udaljenosti od rasjeda i uvjetima temeljnog tla odgovaraju određenoj lokaciji, provedeno je više od 2700 nelinearnih dinamičkih analiza. U analizi odziva uočeno je da manji radijus krivine znači i veću oštećljivost sustava.

Ključne riječi:

most u krivini, kosi most, probabilistički model odziva, mjera intenziteta

Preliminary note

Nina Serdar, Mladen Ulićević, Srđan Janković

Influence of horizontal curvature radius and bent skew angle on seismic response of RC bridges

The influence of horizontal curvature radius, bridge bents skew angle, and type of column bents, on the seismic response of bridges is studied in the paper. A total of eighteen frame-system bridges were analysed. More than 2700 nonlinear dynamic analyses were conducted for earthquake records matching a particular location by the magnitude, distance from fault, and foundation soil conditions. The response analysis shows that the system's vulnerability increases with a decrease in curvature radius.

Key words:

curved bridge, skewed bridge, probabilistic response model, intensity rating

Vorherige Mitteilung

Nina Serdar, Mladen Ulićević, Srđan Janković

Einfluss von Horizontalkrümmung und Neigungswinkel der Stützen auf die seismische Antwort von Stahlbetonbrücken

In dieser Arbeit werden Einflüsse von Radius der Horizontalkrümmung, Neigungswinkel der Stützen und Stützenform auf die seismische Antwort von Brücken analysiert. Insgesamt wurden 18 Rahmenbrücken untersucht. Für Erdbebenaufzeichnungen, die in Bezug auf Magnitude, Entfernung von der Verwerfung und Baugrundeigenschaften einer bestimmter Lokalität entsprechen, wurden über 2700 nichtlineare dynamische Analysen durchgeführt. Die Antwortanalyse hat gezeigt, dass einem kleineren Radius auch eine größere Beschädigung des Systems entspricht.

Schlüsselwörter:

gekrvte Brücke, schräge Brücke, probablistisches Antwortmodell, Intensitätsmaß

1. Uvod

Mostovi su, u smislu oštećljivosti uslijed potresnog djelovanja, jedna od slabijih karika u prometnoj infrastrukturi. Oni se prema svim suvremenim propisima projektiraju tako da se ne sruše uslijed jakih potresa (potres s povratnim periodom od 475 godina prema EN 1998-2). Međutim, i u slučaju velikih oštećenja mostova, osim ekonomskih gubitaka od neposrednih troškova sanacije, javljaju se i posredni gubici izazvani nefunkcioniranjem mosta ili funkcioniranjem u smanjenom kapacitetu. U tom smislu važno je predvidjeti seizmički odziv konstrukcije mosta i prepoznati parametre koji utječu na oštećljivost mosta kako bi se izbjegla rušenja u slučaju jakih potresa i dovela oštećenja na prihvatljivu razinu u slučaju slabijih potresa, a to je svakako neosporan zadatak koji se nameće u istraživanjima.

U ovom se radu usredotočuje na analizu seizmičkog odziva mostova u krivini i kosih mostova. Te su konstrukcije u smislu uklanjanja u zadane parametre prometnica veoma poželjne, a ponekad i nužne. Nalaze se u sklopu svih složenijih raskršća, na priključenjima, nadvožnjacima, nathodnicima itd. U prometnom smislu te konstrukcije su pogodne, ali je iskustvo pokazalo da je njihov odziv uslijed seizmičkih djelovanja manje predvidljiv i svakako različit u odnosu na odziv mostova u pravcu. U prošlosti su pri djelovanju jačih potresa (Northridge 1994., Wenchuan-Kina 2008., Chile 2010. itd.) mostovi u krivini, kao i kosi mostovi, doživjeli neke neočekivane slomove i oštećenja.

Specifičnost u ponašanju pri potresnom djelovanju, kod ovih mostova, očituje se u kombinaciji odziva konstrukcije u dva ortogonalna smjera. Istovremeno se u stupovima javlja koso savijanje uz znatne utjecaje torzije. Povećanja uzdužnih, posmičnih i torzijskih utjecaja u stupovima i znatne rotacije rasponske konstrukcije, potječu od aktiviranja torzijskih oblika titranja [1]. Veće rotacije rasponske konstrukcije, oko osi uspravne na njenu ravninu, dalje uzrokuju veće pomake nad krajnjim osloncima. To objašnjava činjenicu da je osim oštećenja u stupovima, gubitak oslonca rasponske konstrukcije mosta nad upornjacima još jedan karakterističan oblik sloma. Zbog svega navedenog, možemo reći da je potrebno posebnu pozornost usmjeriti na takve konstrukcije i nastaviti istraživanja radi boljeg razumijevanja seizmičkog odziva.

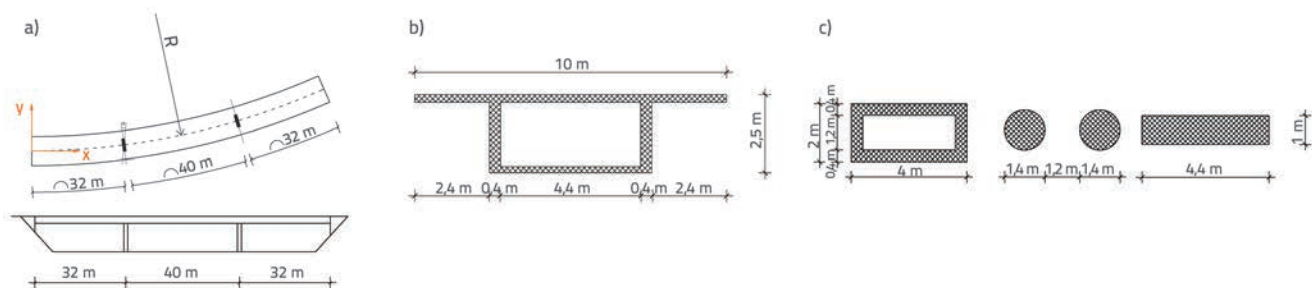
Vrlo je ograničen broj radova u literaturi koja se bave seizmičkim odzivom AB mostova u krivini i AB kosih mostova. U istraživanjima Tondinija i Stojadinovića [2] dokazuje se da

uslijed seizmičkih djelovanja dolazi do povećanja oštećljivosti mostova sa smanjenjem radijusa krivine. Ta istraživanja bila su usredotočena na mostove s jednim tipom stupova, i to jednodijelnim kružnim stupovima, za variranje njihove visine. Utjecaj kuta kosine stupova na seizmički odziv mosta istraživao je kod mostova u pravcu [3, 4]. Rezultati istraživanja su pokazali da povećanje kuta kosine stupova utječe na povećanje oštećljivosti konstrukcije, pogotovo za mostove sa slobodnim oslanjanjem nad upornjacima. Daljnja istraživanja, što je naznačeno i u spomenutoj literaturi, trebala bi obuhvatiti varijacije oblika srednjih stupova, utjecaj kuta kosine stupova kod mostova u krivini, analizu kratkih mostova, analizu rušenja i drugih razina oštećenja.

U ovom radu predstavljena je analiza seizmičkog odziva AB mostova, preko tri polja sa sandučastim poprečnim presjekom rasponske konstrukcije, uz varijaciju tri parametra: radijusa horizontalne krivine, kuta kosine stupova i oblika stupova. Cilj je ocijeniti utjecaj variranih parametara na ponašanje konstrukcije kroz probablistički pristup. To zahtijeva uspostavljanje probablističkog modela odziva (PSDM), koji povezuje odziv konstrukcije (engl. *Engineering Demand Parameter* - EDP) i mjeru intenziteta potresa (engl. *Intensity Measure* - IM). Ova metodologija je u literaturi poznata kao PBEE metodologija [5]. Analiza odziva konstrukcije provedena je za ukupno 18 prototipskih mostova. Razmatrana su tri kuta kosine stupova u odnosu na os mosta (0° , 20° i 30°), dvije vrijednosti horizontalne krivine (most u pravcu, što odgovara beskonačnoj vrijednosti krivine, i most u krivini $R=150$ m koja je veća od propisane minimalne vrijednosti radijusa krivine na putovima s mjerodavnom računskom brzinom do 60 km/h) i tri oblika stupa. Mostovi su svrstani u tri tipa - A, B i C prema obliku stupova. Tip A odgovara sandučastom poprečnom presjeku, tip B odgovara dvojnomo kružnom stupu i tip C odgovara pravokutnom poprečnom presjeku stupa.

2. Opis prototipskih mostova

Istraživani prototip mosta ima tri polja sa srednjim rasponom od 40 m i krajnjim rasponima 32 m (slika 1.). Za mostove u krivini raspon se odnosi na odgovarajuću dužinu kružnog luka. Rasponska konstrukcija je sandučasti poprečni presjek širine 10 m i visine 2,5 m. Visina stupova od temelja do rasponske konstrukcije je 10 m. Stupovi su ukliješteni u temelje. Veza stupa



Slika 1. a) shema mosta u tlocrtu i presjeku; b) poprečni presjek rasponske konstrukcije; c) poprečni presjeci stupova za tip A, B i C

i rasponske konstrukcije je monolitna. Poprečni presjek stupova je sandučasti, dvojni kružni odnosno pravokutni, zavisno od razmatranog tipa mosta A, B ili C. Iznad upornjaka je konstrukcija mosta oslonjena preko 4 uzdužno pomična elastomerna ležaja. Karakteristike betona odgovaraju razredu čvrstoće C30/37. Kvaliteta armature je B500B. Proračun konstrukcije i dimenzioniranje napravljeni su u skladu s europskim normama EN 1991-2 [6], EN 1992-1-1 [7] i EN 1998-2 [8]. Prostorni model u linearnoj analizi je napravljen u programskom paketu SAP 2000 v.14. [9] od linijskih elemenata za stupove i za rasponsku konstrukciju s odgovarajućim geometrijskim karakteristikama (tablica 1.).

Rasponskoj konstrukciji su zadane karakteristike neraspucalog betonskog presjeka, a za stupove je procijenjena proračunska krutost na savijanje prema dodatku C EN 1998-2 [8]. Svaki raspon modeliran je s deset linijskih elemenata čime je na zadovoljavajući način aproksimirana horizontalna krivina u kojoj se most nalazi. Stupovima su na mjestu ukleštenja u temelje spriječeni svi pomaci i rotacije, dok je rasponskoj konstrukciji nad upornjacima spriječen pomak u vertikalnom i poprečnom smjeru i oslobođena rotacija oko osi uspravne na uzdužnu ravninu mosta. Seizmička analiza je napravljena pomoću modalnog proračuna primjenom spektra odziva. Dvanaest prvih oblika titranja je uzeto u obzir, što je bilo dovoljno da zbroj proračunskih modalnih masa bude veći od 90 %. Horizontalno seizmičko opterećenje zadano je kroz projektni spektar odziva koji odgovara tlu kategorije B i osnovnom ubrzanju tla od $a_g = 0,4$ g. Usvojeno je duktilno ponašanje konstrukcije i faktor ponašanja q koji je iskazan u tablici 1. Vertikalno seizmičko opterećenje pri dimenzioniranju stupova je zanemareno. Postotci armiranja u stupovima navode se u tablici 1.

3. Nelinearno modeliranje konstrukcije

U ovom se poglavlju opisuju glavni aspekti modeliranja konstrukcije mostova za potrebe nelinearne dinamičke analize (NDA). Brojni su se autori bavili pitanjima modeliranja konstrukcije i materijala, a ovdje će biti primijenjene preporuke dane u literaturi [10]. Modeliranje je napravljeno u programu za

Tablica 1. Geometrijske karakteristike i opis konstrukcije

Opis sustava mosta	Okvirna konstrukcija preko 3 polja, raspona 32 m - 40 m - 32 m
Kut kosine stupova	0°, 20°, 30°
Radijus horizontalne krivine	Most u pravcu, $R = \infty$; Most u krivini, $R = 150$ m
Geometrijske karakteristike rasponske konstrukcije	$EA = 1,97 \cdot 10^8$ kN; $El_x = 1,8 \cdot 10^8$ kNm ² ; $El_y = 1,3 \cdot 10^9$ kNm ² ; $GJ = 1,55 \cdot 10^8$ kNm ²
Oblik i dimenzije stupova	Tip A: Sandučasti poprečni presjek $b \times d = 2 \times 4$ m; $d_{zida} = 0,4$ m Tip B: Dva kružna stupa promjera 1,4 m Tip C: Pravokutni stup $1 \times 4,4$ m
Faktor ponašanja q (preporučene vrijednosti)	Tip A: $q_{uzdužno} = q_{poprečno} = 3,2$ Tip B: $q_{uzdužno} = q_{poprečno} = 3,5$ Tip C: $q_{uzdužno} = 3,5$; $q_{poprečno} = 3$
Uzdužna armatura u stupovima (broj šipki $\times \phi$)	Tip A: $\rho_L = 2\%$ (2 \times 2 \times 14 $\phi 28$ na kraćim stranama i 2 \times 2 \times 21 $\phi 28$ na dužim stranama) Tip B: $\rho_L = 2,7\%$ (40 $\phi 36$) Tip C: $\rho_L = 3,3\%$ (2 \times 24 $\phi 36$ na kraćim stranama i 2 \times 48 $\phi 36$ na dužim stranama)
Poprečna armatura u stupovima (ϕ /uzdužni razmak)	Tip A: $\rho_{Tx} = 0,4\%$ (uzdužno); $\rho_{Ty} = 0,55\%$ (poprečno) ($\phi 10/15$) Tip B: $\rho_T = 1,21\%$ ($\phi 20/8$) Tip C: $\rho_{Tx} = 1,5\%$ (uzdužno); $\rho_{Ty} = 0,7\%$ (poprečno) ($\phi 16/11,5$)

Tablica 2. Karakteristike ovijenog i neovijenog betona i čelika

Ovijen beton	
$f_{cm,c}$ - maksimalna tlačna čvrstoća bazirana na srednjoj vrijednosti tlačne čvrstoće f_{cm} , prema [7] (tipA-tipB-tipC)	57-57-54 MPa
$\epsilon_{c1,c}$ - deformacija pri naprezanju $f_{cm,c}$ (tipA-tipB-tipC)	0,008-0,008-0,007
$\epsilon_{cu,c}$ - maksimalna deformacija	0,033
Vlačna čvrstoća	0
Neovijen beton	
f_{cm} - srednja vrijednost tlačne čvrstoće	38 MPa
ϵ_{c1} - deformacija pri naprezanju f_{cm}	0,0022
$\epsilon_{cu,1}$ - maksimalna deformacija	0,0035
Vlačna čvrstoća	0
Modul elastičnosti	33 GPa
Čelik	
f_{ym} - srednja vrijednost naprezanja pri tečenju	575 MPa
Modul elastičnosti	200 GPa

nelinearnu analizu SeismoStruct verzija 7.0.3. [11]. Rasponska konstrukcija modelirana je linijskim elementima koji prolaze kroz težišta poprečnih presjeka. Kako se tijekom potresnog djelovanja ne očekuje da rasponska konstrukcija uđe u nelinearno područje, za njeno modeliranje su korišteni elastični elementi. Pridružene geometrijske karakteristike odgovaraju geometrijskim karakteristikama neraspucalog poprečnog presjeka, prema preporukama europske norme [8]. Svaki je raspon modeliran s osam jednakih elastičnih linijskih elemenata i tako je na zadovoljavajući način aproksimirana horizontalna krivina u kojoj se most nalazi.

Manderov jednoosni nelinearni model betona upotrijebljen je za modeliranje ovijenog betona [12]. Ponašanje pod cikličkim opterećenjem modelirano je prema prijedlogu u [13]. Karakteristike čelika uzete su prema normi [8]. Karakteristike materijala prikazane su u tablici 2.

S obzirom na to da se znatno plastično ponašanje očekuje u stupovima, stup je modeliran kao jedinstveni neelastični element koji počinje pri temelju i završava na dnu rasponske konstrukcije. Ovdje je za modeliranje neelastičnog ponašanja primijenjen princip raspodijeljene nelinearnosti. Poprečni presjek je podijeljen na materijal betonske jezgre-ovijeni beton, beton zaštitnog sloja-neovijeni beton i armaturni čelik. Na razini poprečnog presjeka, stanje naprezanja i deformacija se dobiva integracijom nelinearnih jednoosnih odziva (naprezanje-deformacija) pojedinačnih "vlakana" na koje je poprečni presjek podijeljen. Duž elementa zadano je pet presjeka u kojima se obavlja integracija. Elastičnim krutim elementom modelirana je veza između stupa i rasponske konstrukcije. Elastičnim štapnim elementom modelirana je integrirana naglavna greda, kod mosta s dvojnim stupovima, s povećanom torzijskom krutošću zbog utjecaja velike krutosti na savijanje rasponske konstrukcije. Za modeliranje upornjaka upotrijebljen je pojednostavljeni model. Upornjak je modeliran kao beskonačno krut linijski element, bez mase, širine rasponske konstrukcije. Masa upornjaka je zanemarena jer se pretpostavlja da na ukupni odziv dugačkih mostova nema veći utjecaj. Linijski element upornjaka je u sredini preko krutog čvora spojen s rasponskom konstrukcijom. Na krajevima ovog elementa modelirani su spojni elementi nulte dužine, u vertikalnom i horizontalnim smjerovima, kojima su obuhvaćene karakteristike tla iza upornjaka. U uzdužnom smjeru mosta zadani su *link* elementi nulte dužine, koji nemaju krutost u vlaknu, a krutost u tlaku se aktivira kada je pomak u uzdužnom smjeru jednak širini dilatacije iznad upornjaka. Krutost *link* elementa ($K_{abt,L}$) izračunana je prema preporukama Caltransa [14], i ovisi o inicijalnoj krutosti tla (K), visini upornjaka (h) i širini upornjaka (w), prema izrazu u jednadžbi (1). Kako u uzdužnom smjeru postoje dva *link* elementa, njima je pridružena krutost koja je jednaka polovini proračunane vrijednosti.

$$K_{abt,L} = K_i \cdot w \cdot \left(\frac{h}{1,7} \right) \tag{1}$$

Za dijagram sila-pomak za *spojni* element u uzdužnom smjeru usvojeno je elastično idealnoplastično ponašanje [14].

U poprečnom smjeru krutost tla je također modelirana *link* elementom

nulte dužine. Ti elementi predstavljaju otpor sustava nasipa iza krajnjeg stupa i bočnih krilnih zidova. Doprinos u krutosti koja potječe od zaštitnog zida i ležaja ovdje je zanemarena radi pojednostavnjenja. Poprečna krutost se dobiva korekcijom krutosti u uzdužnom smjeru množenjem vrijednosti u jednadžbi (1) s koeficijentima efikasnosti krilnog zida ($C_L = 2/3$), faktorom participacije ($C_w = 4/3$) i odnosom širina krila i zida krajnjeg stupa [15]. Tako izračunana krutost pridružuje se s pola izračunane vrijednosti svakom od dva *link* elementa na krajevima beskonačno krutog štapa.

U vertikalnom smjeru zadana je velika krutost oslonca koja odgovara krutosti tla ispod temelja. Zanemaren je utjecaj elastičnog materijala ležaja i nasipa na vertikalnu krutost tla. Modalno prigušenje je uzeto u iznosu od 5 %.

4. Rezultati modalne analize

Za sve ispitivane mostove napravljena je modalna analiza. Nađeno je prvih dvanaest oblika titranja. U tablici 3. prikazana su prva tri perioda titranja za mostove tipa A, B i C. Stupovi visine svega deset metara (odnos raspona i visine stupa $L/H = 4$) uvjetovali su kruće konstrukcije, tj. relativno niže periode titranja. Vrijednost perioda osnovnog oblika titranja, koji je za sve tipove mosta bio u poprečnom smjeru, iznosila je okvirno od 0,6 do 0,9 s. Navedeni prvi periodi titranja su oni s najvećom magnitudom u razmatranom smjeru. Iako u ovom radu nije navedena

Tablica 3. Prva tri tona titranja za mostove tipa A, B i C

Tip mosta	Radijus krivine [m]	Kut kosine stupova	Period titranja T [s]			
			I oblik (poprečni smjer)	II oblik (uzdužni smjer)	III oblik	
A	∞	0°	0,596	0,327	0,230	uzdužni smjer
		20°	0,600	0,326	0,235	
		30°	0,606	0,325	0,241	
	150	0°	0,596	0,328	0,231	
		20°	0,604	0,327	0,239	
		30°	0,609	0,326	0,242	
B	∞	0°	0,867	0,749	0,431	poprečni smjer
		20°	0,882	0,729	0,433	
		30°	0,892	0,710	0,435	
	150	0°	0,849	0,731	0,438	
		20°	0,867	0,706	0,437	
		30°	0,877	0,696	0,438	
C	∞	0°	0,608	0,546	0,319	poprečni smjer
		20°	0,644	0,511	0,313	
		30°	0,672	0,486	0,306	
	150	0°	0,608	0,537	0,323	
		20°	0,658	0,498	0,315	
		30°	0,678	0,486	0,311	

raspodjela proračunskih modalnih masa po oblicima titranja, za tipove mostova A i C koji imaju relativno krute stupove u odnosu na rasponsku konstrukciju, prema očekivanju viši oblici titranja znatnije utječu na dinamički odziv tih konstrukcija, odnosno ovi mostovi ne titraju pretežno u prvom tonu.

Uočeno je da povećanjem kuta kosine stupova dolazi do skraćivanja perioda titranja u uzdužnom smjeru. Ovo vrijedi i za mostove u pravcu i za mostove u krivini. Znatnije smanjenje perioda uočeno je kod mostova tipa B i tipa C, dok je mnogo manje bilo izraženo za mostove tipa A. S povećanjem kuta kosine dolazi i do povećanja perioda titranja u poprečnom smjeru. Smanjenje radijusa krivine za mostove tipa B dovelo je do redukcije perioda titranja u poprečnom i uzdužnom smjeru, kao i do smanjenja perioda titranja za most tipa C u uzdužnom smjeru, i to za sve kutove kosine. Most tipa A ima relativno krute stupove u odnosu na rasponsku konstrukciju u oba smjera, kao i most tipa C u poprečnom smjeru. Time je smanjen prevladavajući utjecaj rasponske konstrukcije na dinamički odziv mosta i istaknut utjecaj viših oblika titranja i krutosti stupova na most. Na taj način smanjenje radijusa krivine nije se na isti način odrazilo na prve periode titranja za mostove tipa A i C u poprečnom smjeru, uspoređujući s utjecajem smanjenja radijusa krivine na periode titranja mosta tipa B.

Zbog ograničenja prostora, u ovom radu nisu prikazani faktori sudjelovanja modalnih masa za znatne oblike titranja kao ni oblici titranja i modalni pomaci, ali su oni analizirani i zaključeno je da se kombiniranje modalnih odziva u dva ortogonalna smjera kod mostova u krivini povećava s povećanjem kuta kosine stupova. Poprečni oblici titranja nisu sasvim poprečni, već imaju i znatnu uzdužnu komponentu pomaka. Znatnije kombiniranje uzdužnih i poprečnih tonova titranja javlja se kod mosta tipa B (mostovi s dvojnim kružnim stupovima) u odnosu na preostala dva tipa. Kod mostova u krivini primjetan je porast doprinosa torzijskog oblika titranja.

5. Izbor potresnih zapisa i mjere intenziteta

Izbor potresnih zapisa za nelinearne dinamičke analize proveden je prema unaprijed definiranom potresnom scenariju i uvjetima tla. Vrijednosti magnitude $M = 7$ i udaljenosti lokacije od rasjeda $R_L = 20$ km vrijednosti su za razmatranu lokaciju. Utjecaji bliskih potresa nisu razmatrani. Tlo na lokaciji poklapa se s tlom kategorije B, kako je ona definirana u normi EN 1998-1.

Najlogičniji način za procjenjivanje odziva konstrukcije bio bi da se izabere veći broj potresa koji su u skladu sa zadanim potresnim scenarijem i da oni takvi, ne skalirani, budu ulaz za nelinearne dinamičke analize. Ovaj pristup praktično nije moguć. Naime, ne postoji dovoljan broj zapisa koji su po magnitudi, udaljenosti i uvjetima tla usklađeni sa zadanim potresnim scenarijem. Zato su uvjeti pretrage ublaženi kako bi ona rezultirala većim brojem potresnih zapisa.

To znači da su iz dostupnih potresnih baza (European Strong Motion Database i PEER Strong Motion Database) izdvojeni potresi koji zadovoljavaju uvjete: $6,2 < M < 7,6$, $15 \text{ km} < R_L < 30$

km i $360 \text{ m/s} < v_{s,30} < 800 \text{ m/s}$ (gdje je $v_{s,30}$ brzina posmičnih valova u tlu do dubine 30 m). Pretraga je rezultirala izborom 38 parova zapisa (jedan par zapisa čine dvije ortogonalne horizontalne komponente ubrzanja).



Slika 2. Rezultirajući spektri ubrzanja skaliranih i nescaliranih potresnih zapisa

Skaliranje potresa izvedeno je samo po amplitudi, bez promjene njihovog frekvencijskog sadržaja. Zapisi su skalirani s faktorima 1, 2, 4 i 8, što je rezultiralo sa 152 potresna zapisa koji služe kao unos za NDA. Istovremeno su obje horizontalne komponente jednog potresnog zapisa zadane na konstrukciju, jedna u globalnom smjeru X, a druga u globalnom smjeru Y. Skaliranje je bilo potrebno jer se konstrukciju htjelo uvesti u nelinearno područje rada. Pri tome razmatrani su samo oni odzivi konstrukcije kod kojih duktilnost pomaka nije veća od 4. Više autora smatra da ova granica duktilnosti pomaka predstavlja približno granicu graničnog stanja koje odgovara velikim oštećenjima u stupovima i graničnog stanja rušenja konstrukcije [16, 17]. Drugim riječima, u ovom radu nije analizirano stanje rušenja razmatranih mostova. Na slici 2. prikazani su rezultirajući spektri ubrzanja izabranih potresa, dobiveni kao vektorski zbroj dviju horizontalnih komponenti spektra ubrzanja. Rezultirajući spektar kao prikaz seizmičkog djelovanja kod mostova primijenjen je i u normi EN 1998-2.

Izbor mjere intenziteta - IM (engl. *Intensity Measure* - IM), koja će uspješno kvantificirati potresni zapis, vrlo je osjetljivo pitanje u seizmičkoj analizi konstrukcija. Uspješnom mjerom intenziteta smatra se ona, koja u korelaciji s razmatranim odzivom konstrukcije ima malo rasipanje (jednadžba (3)). U prijašnjim istraživanjima mjere poput vršnog ubrzanja tla, PGA (engl. *Peak Ground Acceleration* - PGA), ili vršnog pomaka tla, PGD (engl. *Peak Ground Displacement* - PGD), bile su široko zastupljene. PGA je mjera koja je i danas pretežno zastupljena u seizmičkim

pravilnicima. Naknadna istraživanja su ipak pokazala da ne postoji univerzalna mjera intenziteta koja je pogodna za sve tipove konstrukcija, ali i da su se mjere poput spektralnog ubrzanja, brzine i pomaka izdvojile kao relativno dobre mjere s aspekta uspješnosti [18].

Iz popisa mjera intenziteta preporučenih u literaturi [19] ovdje će biti prikazani rezultati za one mjere koje su se pokazale uspješnim, ali i za one koje su u uobičajenoj praksi u upotrebi, poput PGA. Osim mjera dobivenih iz pojedinačnih horizontalnih komponenti zapisa (prefiks *trans* ispred naziva mjere), u ovom istraživanju korištene su i mjere koje proizlaze iz rezultirajućih zapisa ubrzanja, brzine i pomaka i rezultirajućih spektara (prefiks *rez* ispred naziva mjere). Pojam rezultirajući podrazumijeva zapis ili spektar dobiven kao vektorski zbroj pojedinih zapisa/spektara dviju horizontalnih komponenti. Drugi autori [4] istraživali su mjere rezultirajućih PGA i PGV kod kosih mostova u pravcu, i pokazalo se da je rezultirajuća PGV bila dobra mjera intenziteta. Taj pristup razmatranja rezultirajućih mjera u ovom je radu proširen i na sve mjere spektralnih vrijednosti kao i na mjere koje direktno ovise o njima ($rez_S_a(T_1)$, $rez_S_v(T_1)$, $rez_Cordova$ itd.). Konačan popis analiziranih mjera intenziteta prikazan je u tablici 4.

Tablica 4. Analizirane mjere intenziteta

Mjere (IMs)	Opis
trans_PGA	Maksimalno ubrzanje komponente koja djeluje u poprečnom smjeru
trans_PGV	Maksimalna brzina komponente koja djeluje u poprečnom smjeru
trans_Sa(T ₁)	Spektralno ubrzanje u prvom tonu komponente koja djeluje u poprečnom smjeru
rez_PGA	Maksimalno rezultirajuće ubrzanje dviju horizontalnih komponenti
rez_PGV	Maksimalna rezultirajuća brzina dviju horizontalnih komponenti
rez_Sa(T ₁)	Spektralno ubrzanje u prvom tonu rezultirajućeg spektra
rez_Sv(T ₁)	Spektralna brzina u prvom tonu rezultirajućeg spektra
rez_Sd(T ₁)	Spektralni pomak u prvom tonu rezultirajućeg spektra
rez_Cordova	Cordova mjera intenziteta [20] koristeći vrijednosti s rezultirajućih spektara i računa se kao: $S_a = S_a(T_1) \sqrt{\frac{S_a(2T_1)}{S_a(T_1)}}$

6. Analiza seizmičkog odziva konstrukcije

U ovom poglavlju prikazana je analiza seizmičkih odziva zakrivljenih i kosih mostova. Cilj je te analize identificirati utjecaj radijusa horizontalne krivine, kuta kosine stupova i oblika stupova na seizmički odziv konstrukcije. S tim u vezi provedene

su nelinearne dinamičke analize (NDA) na mostovima opisanim u poglavlju 2. Za odziv konstrukcije izabran je maksimalni relativni pomak vrha stupa podijeljen s visinom stupa (engl. *Column Drift Ratio* - CDR) koji je bilježen u svakoj NDA. Pri tome razmatran je maksimalni relativni pomak stupa, CDR, u poprečnom smjeru (globalnom smjeru Y) kao i rezultirajući CDR dobiven iz poprečnog i uzdužnog CDR (globalnog smjera Y i X). Prikazani su i rezultati analize uspješnosti razmatranih mjera intenziteta potresa - IM korelacijom tih mjera s odzivom konstrukcije - EDP. Izvedene krivulje EDP-IM su bazirane samo na parovima odziva i intenziteta za koje nije prekoračena vrijednost duktilnosti pomaka 4.

Na slici 2. prikazani su u boji spektri onih potresa koji su u konstrukcijama izazivali duktilnost pomaka veću od 4. Kao što se vidi, karakteristike tih zapisa su veće vrijednosti spektralnog ubrzanja na širem opsegu perioda, što ističe važnost takozvanog omekšanja konstrukcije i produljenja perioda titranja u nelinearnom području rada na ponašanje mosta uslijed seizmičkih djelovanja.

U probablističkoj seizmičkoj analizi odziva pretpostavlja se da je raspodjela odziva konstrukcije (EDP) po intenzitetu potresa (IM) lognormalna i da se ta veza može napisati u logaritamskoj formi kao u jednadžbi (3):

$$\ln(EPD) = a + b \ln(IM) \quad (3)$$

Koeficijenti a i b , kao i rasipanje $\sigma_{EDP/IM}$ rezultata, dobivaju se iz regresijske analize. Rasipanje se računa kao kvadratni korijen iz zbroja kvadrata pogrešaka podijeljen s brojem uzoraka (rezultata) umanjnim za jedan. Vrijednosti rasipanja za sve mostove i ispitivane mjere intenziteta prikazane su u tablici 5. Mjere koje su vezane za poprečni smjer kombinirane su s odzivom konstrukcije u poprečnom smjeru, a rezultirajuće mjere kombinirane su s rezultirajućim odzivom.

Iz priloženih rezultata se vidi da se među mjerama koje ne ovise o karakteristikama konstrukcije izdvaja po uspješnosti mjera intenziteta trans_PGV s rasipanjem od 0,315 do 0,418. Najveće rasipanje za ovu IM se javlja kod mosta tipa B (dvojni kružni stupovi). Upravo za most tipa B, mjera rez_PGV s rasipanjem od 0,317 do 0,347 pokazuje veću uspješnost od trans_PGV. Mjere intenziteta vezane za ubrzanje pokazale su veliko rasipanje, što je i bilo očekivano kad se uzmu u obzir veličine osnovnih oblika titranja. Ovi rezultati poklapaju se s rezultatima istraživanja iz [21] dobiveni za druge vrste konstrukcija koje su imale veći period titranja.

Od mjera koje ovise o karakteristikama konstrukcije, točnije o periodima titranja, Cordova mjera intenziteta izračunana iz rezultirajućih spektara ubrzanja pokazuje najmanje rasipanje koje je u granicama od 0,247 do 0,344. Posebno se ta mjera ističe kod konstrukcija B i C, kod kojih takozvano omekšavanje konstrukcije uslijed djelovanja jačih potresa i "produljenje" perioda titranja ima znatan utjecaj na odziv konstrukcije. Osim te mjere i mjere rez_Sa(T₁), rez_Sv(T₁) i rez_Sd(T₁) pokazuju relativno dobru i međusobno sličnu uspješnost. Ovdje je uočeno

Tablica 5. Rasipanja rezultata istraživanih mjera intenziteta

Tip mosta	R [m]	α	Mjere intenziteta								
			Trans_PGA	Trans_PGV	Trans_Sa(T1)	rez_PGA	rez_PGV	rez_Sa(T1)	rez_Sv(T1)	rez_Sd(T1)	rez_cord
			σ_{EDPIJM}								
A	∞	0°	0,556	0,391	0,350	0,485	0,403	0,307	0,280	0,307	0,344
		20°	0,527	0,348	0,315	0,482	0,389	0,284	0,272	0,284	0,318
		30°	0,495	0,328	0,323	0,495	0,397	0,306	0,297	0,306	0,319
	150	0°	0,534	0,344	0,371	0,459	0,357	0,295	0,270	0,296	0,325
		20°	0,496	0,341	0,325	0,487	0,327	0,279	0,255	0,279	0,306
		30°	0,506	0,364	0,36	0,467	0,385	0,269	0,247	0,270	0,285
B	∞	0°	0,579	0,418	0,412	0,51	0,321	0,263	0,276	0,263	0,247
		20°	0,589	0,425	0,411	0,569	0,318	0,262	0,279	0,261	0,254
		30°	0,578	0,396	0,380	0,565	0,317	0,269	0,281	0,268	0,251
	150	0°	0,573	0,408	0,410	0,577	0,347	0,266	0,278	0,266	0,261
		20°	0,547	0,357	0,391	0,53	0,342	0,274	0,295	0,274	0,254
		30°	0,537	0,366	0,374	0,575	0,311	0,265	0,283	0,265	0,248
C	∞	0°	0,487	0,358	0,336	0,517	0,409	0,282	0,305	0,288	0,261
		20°	0,548	0,373	0,374	0,53	0,444	0,374	0,331	0,302	0,280
		30°	0,543	0,347	0,354	0,57	0,474	0,331	0,338	0,332	0,282
	150	0°	0,504	0,347	0,321	0,534	0,415	0,308	0,322	0,308	0,286
		20°	0,427	0,315	0,378	0,546	0,444	0,31	0,314	0,310	0,249
		30°	0,501	0,34	0,391	0,615	0,477	0,358	0,365	0,358	0,293

da sve rezultirajuće spektralne mjere u vezi s rezultirajućim relativnim pomakom vrha stupa daju bolje probabilističke modele odziva od odgovarajućih parova intenzitet-odziv izračunanih za pojedinačni smjer. Iako se Cordova mjera izračunana iz rezultirajućeg spektara izdvojila po uspješnosti, ovdje je drugi kriterij, i to kriterij praktičnosti u računanju mjere, opredijelio drugu po uspješnosti mjeru rez_Sd(T1) za mjeru intenziteta u probabilističkom seizmičkom modelu odziva (PSDM). I dalje se može reći da rezultirajući spektralni pomak ima zadovoljavajuću uspješnost s rasipanjem koje je od 0,261 do 0,358, pri čemu su najbolje mjere one čije je rasipanje u granicama od 0,2 do 0,3 [10].

Utjecaj radijusa krivine na probabilistički model odziva je takav da za sve razmatrane slučajeve koeficijent σ raste s opadanjem radijusa krivine (slika 3.) Nije otkrivena pravilnost u utjecaju radijusa krivine na rasipanje rezultata. Samo u slučaju mostova tipa A i tipa C (s jednodijelnim stupovima) s porastom kuta kosine raste i regresijski koeficijent a . Za mostove s dvojnim stupovima (tip B) koji su imali izraženo kombiniranje odziva u dva smjera, ovaj trend nije uočen.

Na slici 3. prikazani su dijagrami veze rez_CDR i rez_S_d(T₁) za sve ispitivane tipove mostova.

Jedan od trendova uočenih u PSDM je da mostovi u pravcu, tipa A i C, pokazuju trend rasta odziva sa porastom kuta kosine stupova. Razlika je u tome da su pravci predviđanja odziva (regresijski pravci) za most tipa A paralelni (slika 3.a), a mostovi tipa C pokazuju malo kompleksnije ponašanje. Kod njih se pravci

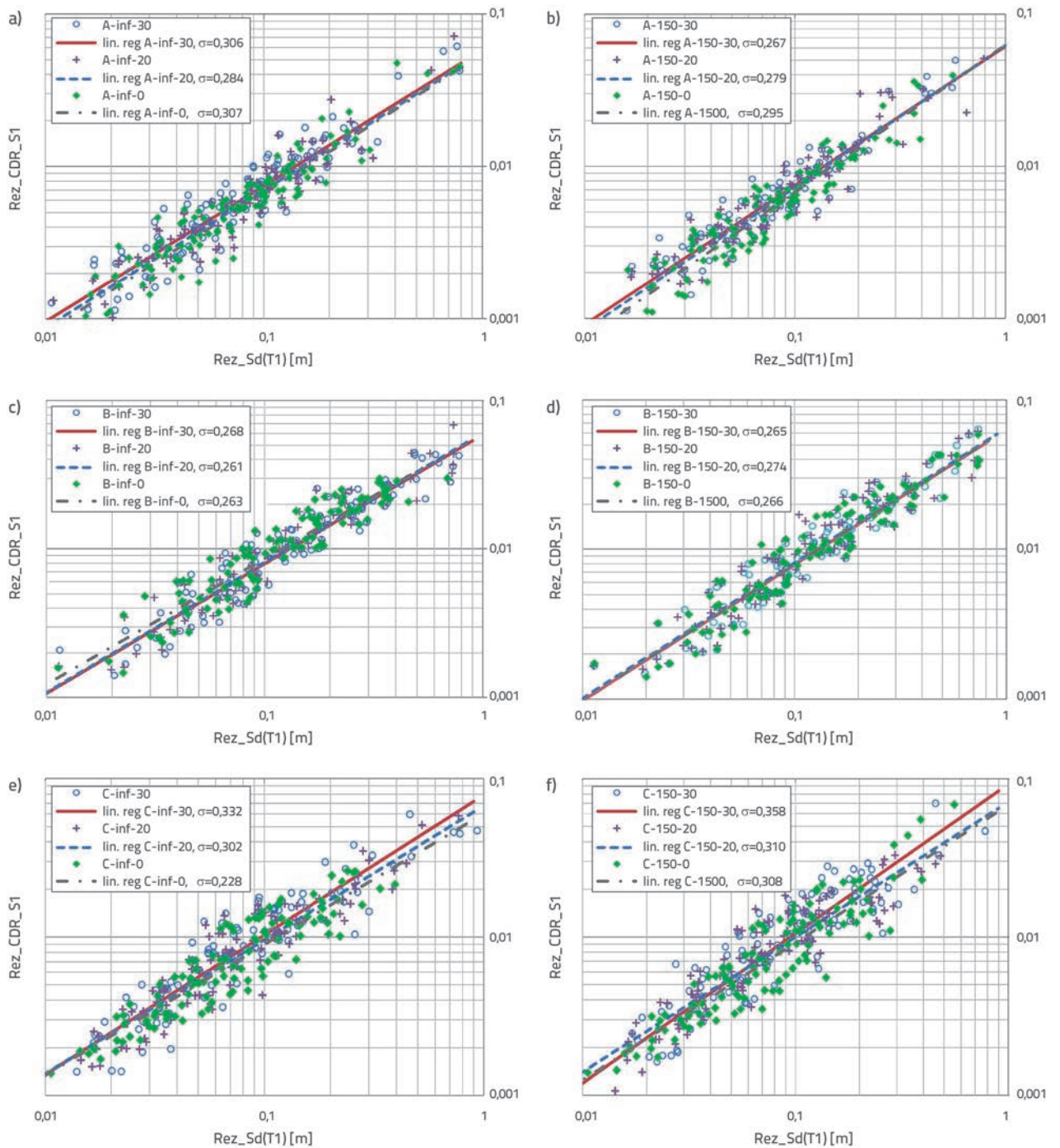
predviđanja sijeku i pokazuju da se porast odziva konstrukcije s porastom kuta kosine događa samo za veće intenzitete potresa (slika 3.e). Kod mostova u pravcu tipa B, pravci predviđanja se također sijeku, ali je trend ponašanja takav da se odzivi konstrukcija izjednačavaju za veće intenzitete dok za manje intenzitete manji kut kosine stupova daje veći odziv konstrukcije. Očigledno da je kod konstrukcija B važnost kombiniranja odziva u uzdužnom i poprečnom smjeru izraženije za veće intenzitete potresa i utječe na veličinu relativnog pomaka vrha stupa.

Također je uočeno i da mostovi u krivini tipa B, za razliku od mostova u pravcu tipa B, imaju pravce predviđanja koji su paralelni i gotovo se poklapaju, što navodi na zaključak da je taj most s dvojnim kružnim stupovima minimalno osjetljiv na promjenu kuta kosine stupova (slika 3.d).

Za konstrukcije mostova tipa A i C u krivini može se reći da pokazuju slično ponašanje kao mostovi u pravcu, tj. s povećanjem intenziteta potresa uočava se da mostovi s većim kutom kosine stupova daju i veći odziv konstrukcije (slike 3.b i 3.f).

Utjecaj horizontalne krivine mosta za sve tipove mostova je takav da se odziv konstrukcije povećava s porastom intenziteta potresa i opadanjem radijusa krivine (s veličine beskonačnosti R = inf, što odgovara mostu u pravcu do ispitivane vrijednosti R = 150 m).

Krivulje oštećljivosti odziva, prikazane na slici 4., potvrđuju navedena zapažanja. Te krivulje predstavljaju vjerojatnost prekoračenja rezultirajućeg CDR vrijednosti od 0,02 (P(EDP|EDP > rez pomak = 2 %)), i konstruiraju se kao kumulativna funkcija

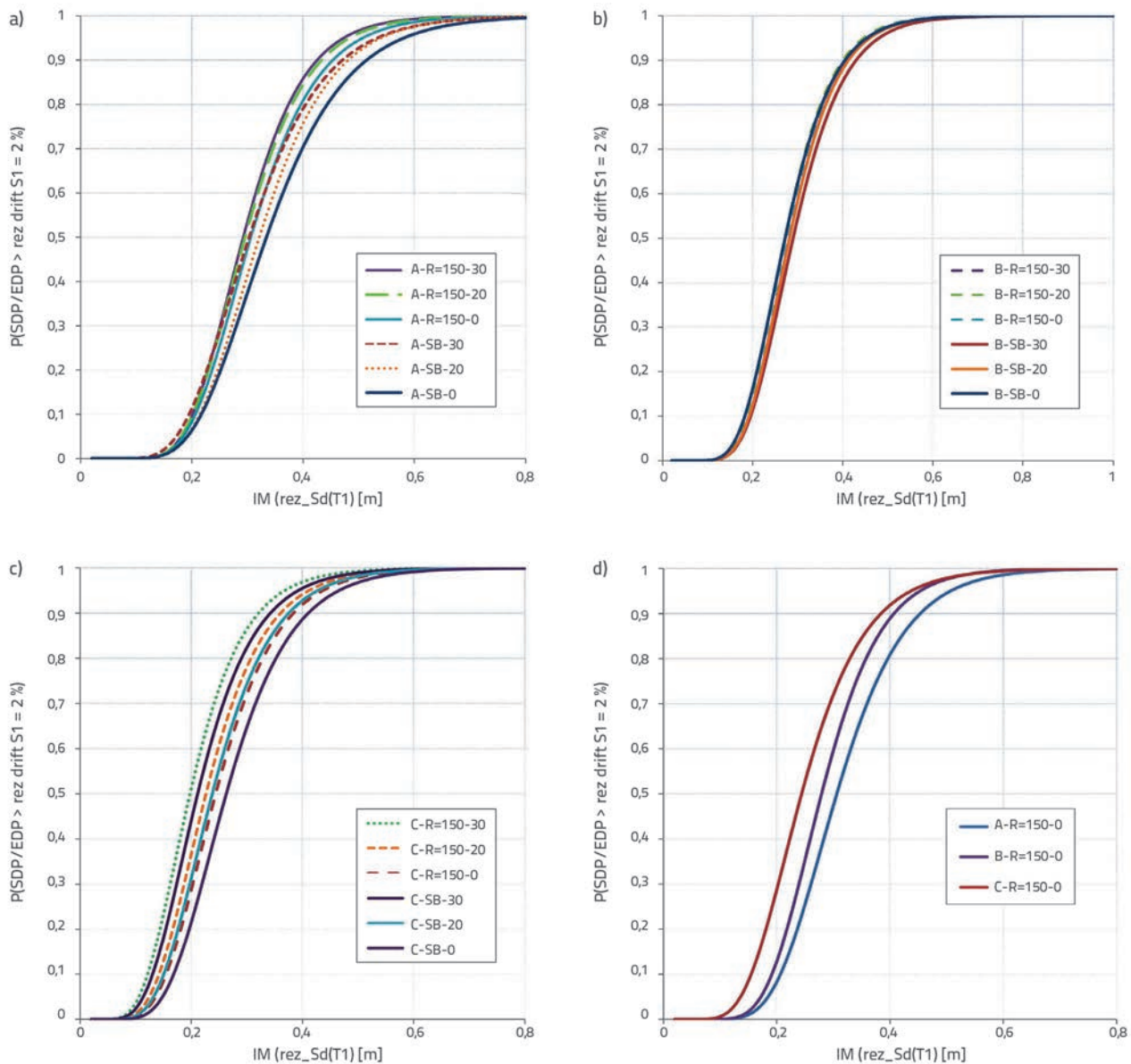


Slika 3. Veza EDP-IM za: a) most A u pravcu; b) most A u krivini; c) most B u pravcu; d) most B u krivini; e) most C u pravcu; f) most C u krivini

lognormalne raspodjele odziva uz pomoć prije određenih koeficijenata a , b i rasipanja σ . Za ovu razinu CDR [22, 23] presjeci stupova se znatno plastificiraju, dolazi do otpadanja većih površina zaštitnog sloja, otvaranja i propagacije pukotina, ali je konstrukcija i dalje izvan zone rušenja. Prema [24], to odgovara stanju znatnih oštećenja.

Manji radijus horizontalne krivine znači i veću osjetljivost mosta, odnosno veću vjerojatnost prekoračenja. Sličan utjecaj

ima i povećanje kuta kosine stupova, osim kod mostova tipa B u pravcu gdje se uočava da povećanje kuta kosine stupova znači i blago manju oštetljivost mosta. To se može objasniti povećanjem torzijske krutosti mosta s povećanjem kuta kosine stupova, što dovodi do manjih rotacija rasponske konstrukcije u ravni i manjih pomaka u stupovima. Kod mostova tipa B u krivini, ovaj utjecaj nije uočen, a odzivi su gotovo nezavisni od kuta kosine stupova. Najveći utjecaj variranih parametara na



Slika 4. Krivulje oštećljivosti odziva za: a) mostove tipa A; b) mostove tipa B; c) mostove tipa C; d) usporedba krivulja oštećljivosti za mostove tipa A, B i C u krivini

odziv javlja se kod mostova tipa C s pravokutnim stupovima. Najmanju osjetljivost na promjenu radijusa krivine i kuta kosine uočava se kod mostova tipa B. Također, uspoređujući mostove tipa A, B i C u krivini uočava se najveća oštećljivost mostova s pravokutnim stupovima u usporedbi s preostala dva tipa.

7. Zaključak

Cilj je ovog rada da se na osnovi probabilističkog seizmičkog modela ocijeni utjecaj horizontalne krivine mosta i kuta kosine stupova na seizmički odziv mosta. Analizirano je osamnaest prototipskih mostova, s tri tipa stupova, dva radijusa krivine i tri kuta kosine stupova. Rezultati provedenih analiza upućuju na sljedeće:

- Povećanje kuta kosine stupova uvjetuje skraćivanje perioda titranja u uzdužnom smjeru i povećanje perioda titranja u poprečnom smjeru. Također, povećanje kuta kosine uzrokuje značajnije kombiniranje modalnih odziva dvaju ortogonalnih smjerova kod mostova s dvojnim stupovima, a kod mostova s pravokutnim i sandučastim stupovima jača doprinos rotacijskog oblika titranja;
- Najveću uspješnost pokazuju mjere intenziteta potresa koje ovise o karakteristikama konstrukcije, izračunane iz rezultirajućih spektralnih vrijednosti kad se kombiniraju s rezultirajućim maksimalnim relativnim pomakom stupa. Rezultirajuće spektralne vrijednosti intenziteta dobivaju se kao vektorski zbroj spektralnih vrijednosti dviju horizontalnih komponenti. Kada se tako izračunane spektralne vrijednosti

- primjene za mjeru intenziteta, dobivaju se manja rasipanja rezultata, uspoređujući s rasipanjima kad se koriste spektralne vrijednosti iz pojedinih komponenti;
- Rezultirajući spektralni pomak, izračunan iz rezultirajućeg spektra pomaka, u prvom obliku je pogodna mjera intenziteta. Ta mjera ima malo veće rasipanje rezultata od Cordove mjere intenziteta, ali radi jednostavnosti u računanju dobiva prednost u odnosu na nju;
 - Utjecaj horizontalne krivine je takav da se oštetljivost odziva povećava sa smanjenjem radijusa krivine;
 - Mostovi s izraženijim doprinosom torzijskih tonova titranja pokazuju veću osjetljivost na promjenu parametara radijusa i kuta kosine stupova. S opadanjem radijusa i porastom kuta kosine stupova, oštetljivost mosta raste;
 - Povećanje kuta kosine stupova povećava odziv konstrukcije, osim kod mostova s dvojnim stupovima. Mostovi tog tipa u pravcu pokazuju suprotan trend u ponašanju, što se može

objasniti povećanjem torzijske krutosti mosta i posljedično manjim pomacima u stupovima. Mostovi s dvojnim stupovima u krivini gotovo su neosjetljivi na promjenu parametara kuta kosine stupova.

Navedeni rezultati i zaključci odnose se na mostove na krutom tlu i na mostove kod kojih je masa upornjaka zanemarena zbog veće duljine mostova. Utjecaji mekog tla kao i utjecaji bliskih potresa na ponašanje konstrukcije nisu razmatrani. U budućim istraživanjima trebalo bi obuhvatiti i ove parametre. Uz to, buduća istraživanja trebaju se usmjeriti i na fleksibilnije konstrukcije mostova, tj. one s većom visinom stupova, ali i analizirati još neke vrijednosti horizontalne krivine mosta. Detaljnija analiza rušenja ovih konstrukcija s definiranjem kriterija rušenja, na primjer prema vrijednosti duktilnosti pomaka ili duktilnosti zakrivljenosti presjeka karakteristične za granično stanje rušenja, također treba biti predmet daljnjih istraživanja.

LITERATURA

- [1] Priestley, M.N.J., Seible, F., Calvi, G.M.: *Seismic design and retrofit of bridges*, Wiley, NY, 1996, <https://doi.org/10.1002/9780470172858>
- [2] Tondini, N., Stojadinovic, B.: Probabilistic seismic demand model for curved reinforced concrete bridges, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10 (2012), pp.1455-1479, <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9362-y>
- [3] Zakeri, B., Padgett, J., Ghodrati Amiri, G.: Fragility Assessment of Skewed Single-Frame Concrete Box Girder Bridges, *ASCE Journal of Constructed Facilities*, 28 (2014) 3, pp. 571-582.
- [4] Kaviani, P., Zareian, F., Taciroglu, E.: Performance-Based Seismic Assessment of Skewed Bridges, *Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report 2014/01*, Berkeley, California, USA, 2014.
- [5] Cornell, C.A., Krawinkler, H.: Progress and challenges in seismic performance assessment, *Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Center News*, 3 (2000) 2, pp. 4.
- [6] EN 1991-2:2003, Action on structures-Part 2: Traffic loads on bridges
- [7] EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings
- [8] EN 1998-2:2005, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges
- [9] Computers and Structures, Inc., 2009. SAP 2000 Nonlinear, Version 14.0.0, Structural Analysis Program, Berkeley, CA.
- [10] Avrim, A., Mackie, K., Stojadinović, B.: Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California, *Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report 2008/03*, Berkeley, California, USA, 2008.
- [11] SeismoSoft, 2014, SeismoStruct - v. 7.0.3 A computer Program for Static and Dynamic Non-linear Analysis of Framed Structures, Available from: <http://www.seissoft.com>
- [12] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.: Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, 114 (1988) 8, pp. 1804-1826.
- [13] Martinez-Rueda, J.E., Elnashai A.S.: Confined concrete model under cyclic load, *Materials and Structures*, 30 (1997) 197, pp. 139-147.
- [14] Caltrans: Seismic design criteria 1.4. California Department of Transportation, Sacramento, CA, 2006.
- [15] Maroney, B.H., Chai, Y.H.: Seismic design and retrofitting of reinforced concrete bridges. *Proceedings of 2nd International Workshop, Earthquake Commission of New Zealand, Queenstown, New Zealand*, 1994.
- [16] Hwang, H., Liu, J.B., Chiu, Y.H.: Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges, Report No. MAEC RR-4, Center for Earthquake Research Information, 2000.
- [17] Choi, E., DesRoches, R., Nielson, B.: Seismic Fragility of Typical Bridges in Moderate Seismic Zones, *Engineering Structures*, 26 (2004) 2, pp.187-199.
- [18] Mackie, K., Stojadinovic, B.: Seismic demands for performance-based design of bridges, *Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report 2003/16*, Berkeley, California, USA, 2003.
- [19] Kramer, S.: *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall International Series, 1996.
- [20] Cordova, P.P., Deierlein, G.G., Mehanny, S.S.F., Cornell, C.A.: Development of two-parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure, *The second US-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforcement Concrete Building Structures*, Sapporo, Hokkaido, pp. 187-206, 2001.
- [21] Pejović, J., Janković, S.: Dependence of RC high-rise buildings response on earthquake intensity, *GRAĐEVINAR*, 67 (2015) 8, pp. 749-759, <https://doi.org/10.14256/JCE.1205.2014>
- [22] Yi, J., Kim, S., Kushiya, S.: PDF interpolation technique for seismic fragility analysis of bridges, *Engineering Structures*, 29 (2007) 7, pp.1312-1322.
- [23] Li, J., Spenser, B.Jr., Elnashai, A.: Bayesian Updating of Fragility Functions Using hybrid Simulations, *Journal of Structural Engineering*, 139 (2013) 7, pp. 1160-1171.
- [24] EN 1998-3:2005, Design of structures for earthquake resistance Part 3: Assessment and retrofitting of buildings