

SEIZMIČKA UČINKOVITOST POSTOJEĆIH MOSTOVA U HRVATSKOJ:

nedostaci, skrivene rezerve i seizmičko ocjenjivanje



Ana Mandić Ivanković

Sadržaj

1. Mostovi u HR
2. Seizmičko ocjenjivanje pri uobičajenoj uporabi mostova
 - Primjer 1: Prednapeti predgotovljeni gredni most sustava slobodno oslonjenih greda
 - Primjer 2: Armiranobetonski okvirni most na stupovima V oblika
 - Primjer 3: Dugi most sastavljen od 6 kontinuiranih roštiljnih rasponskih konstrukcija
3. Seizmičko ocjenjivanje razvijeno za lučne mostove
 - Primjer 4: Otkrivanje razina duktilnosti na Šibenskom mostu
4. Brzo ocjenjivanje oštećenja nakon potresa (Post Earthquake Rapid Damage Assessment)
 - Primjer 5: Oštećenja 8 mostova na području Gline
5. Nedostaci vs. skrivene rezerve
6. Zaključno

MOSTOVI U HRVATSKOJ



1. MOSTOVI U HRVATSKOJ

- ❑ Hrvatska je seizmički aktivna država → učinke potresa valja na odgovarajući način obuhvatiti u upravljanju postojećom prometnom infrastrukturom
- ❑ Mostovi su često njeni ključni elementi → sposobnost korištenja prometne infrastrukture odmah nakon potresa je iznimno važna
- ❑ Prvi i najvažniji korak → utvrditi postojeće stanje i kapacitet postojećih mostova s obzirom na njihovu seizmičku otpornost



1. MOSTOVI U HRVATSKOJ

- ❑ Potres je često vodeće opterećenje pri dimenzioniranju elemenata mosta (posebice stupova), pri utrošku materijala, detaljiranju i cjelokupnoj mehaničkoj otpornosti i stabilnosti mosta.
- ❑ Veliki broj mostova na ključnim prometnicama u Hrvatskoj projektiran je i izgrađen prije nego su norme HRN EN 1998 bile obavezne ili čak prije nego su i postojale.
- ❑ Ne postoji (još) zakonska regulativa vezana uz seizmičku otpornost postojećih mostova.

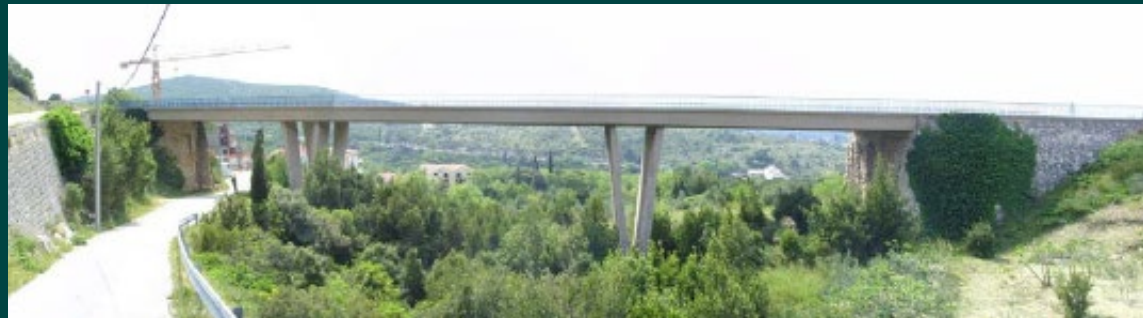


SEIZMIČKO OCJENJIVANJE PRI UOBIČAJENOJ UPORABI MOSTOVA



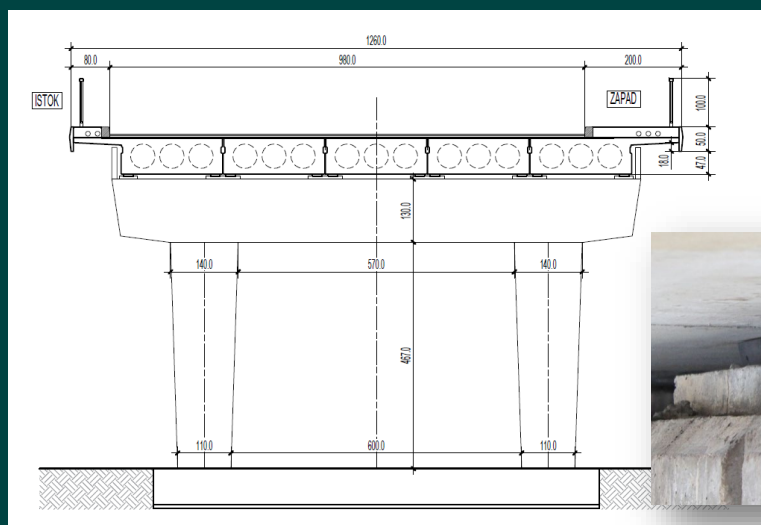
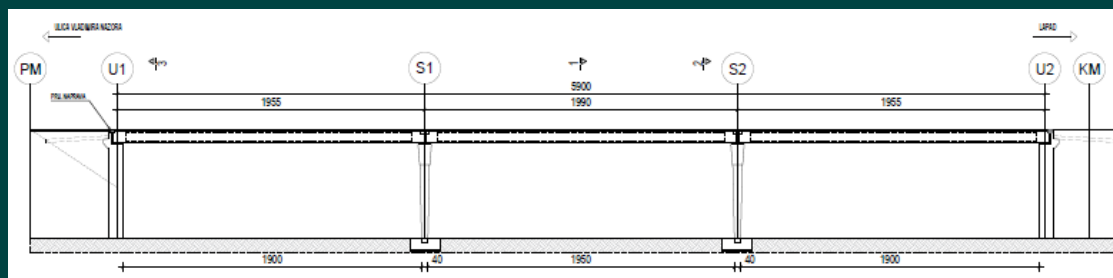
2. SEIZMIČKO OCJENJIVANJE PRI UOBIČAJENOJ UPORABI MOSTOVA

- ❑ Mostovi u visoko seizmičkim područjima
 - Vršno ubrzanje tla
- ❑ Primjer 1: Prednapeti predgotovljeni gredni most
 - $a_g=0.3g$
 - izgrađen 1980-ih
- ❑ Primjer 2: Armiranobetonski okvirni most na stupovima V oblika
 - $a_g=0.29g$
 - Izgrađen 1963
- ❑ Primjer 3: Niz od 6 kontinuiranih roštiljnih rasponskih konstrukcija
 - $a_g=0.23g$
 - Izgrađen 1973



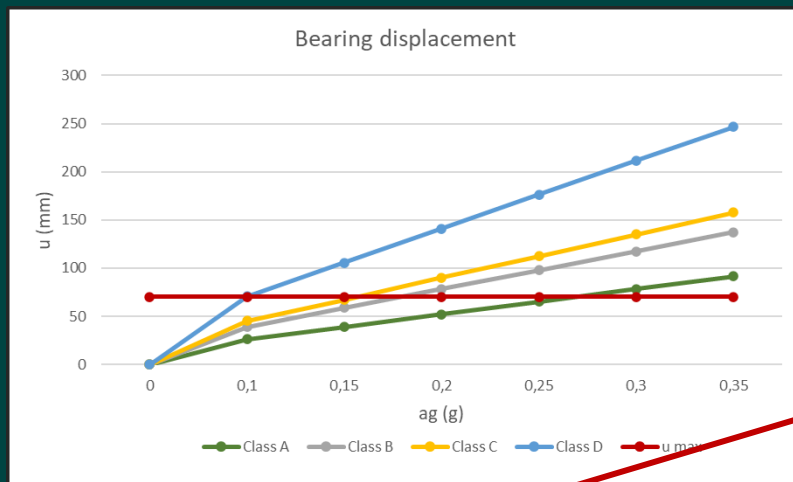
Primjer 1: PB predgotovljeni most sustava slobodno oslonjenih greda

- ❑ Slobodno oslonjeni roštilji
- ❑ Tipični raspon mosta $L=19,9$ m
- ❑ Poprečni presjek sastavljen samo od predgotovljenih nosača BEZ dobetonirane kolničke ploče
- ❑ “SAN” tip nosača, koji su se uglavnom koristili za nadvožnjake i male mostove
- ❑ Nosači su poduprijeti elastomernim ležajevima
 - $200 \times 150 \times 50$ mm (tip 1)
 - koji nisu usidreni ni u donji ni u gornji ustroj
 - maksimalni mogući pomak uslijed potresa - **70 mm** - dosegnut je pri otprilike $a_g = 0.25g$.
 - kritični elementi pod seizmičkim djelovanjem



Primjer 1: PB predgotovljeni most sustava slobodno oslonjenih greda

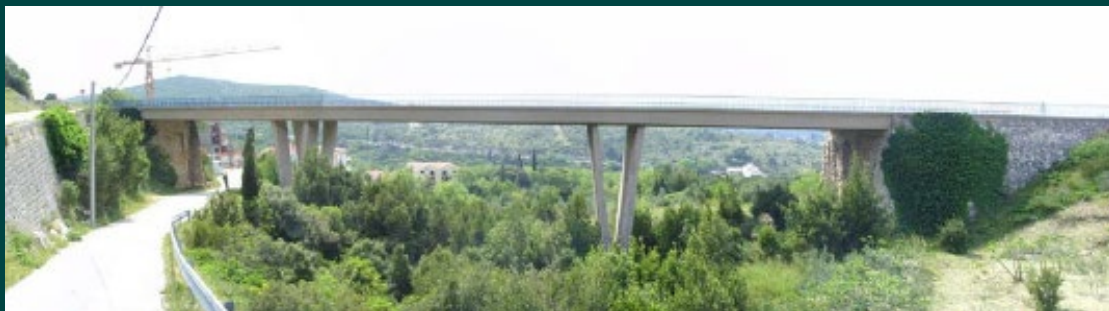
- ❑ Kako bi se dobio uvid u seizmički odgovor ovakvih mostova, provedena je linearna dinamička višemodalna spektralna analiza
- ❑ za različite intenzitete seizmičkog djelovanja i različite tipove temeljnog tla A, B, C, D



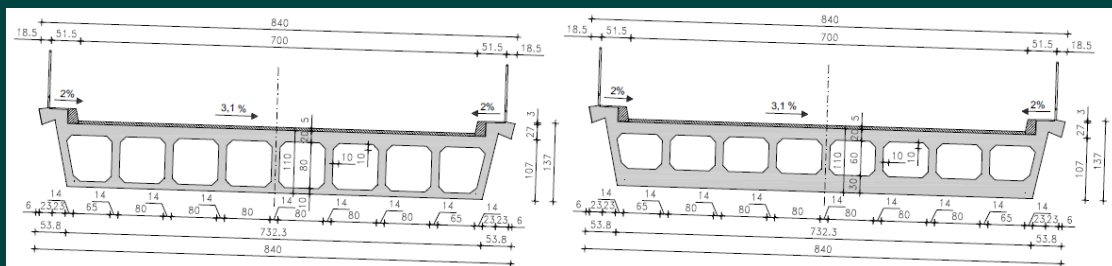
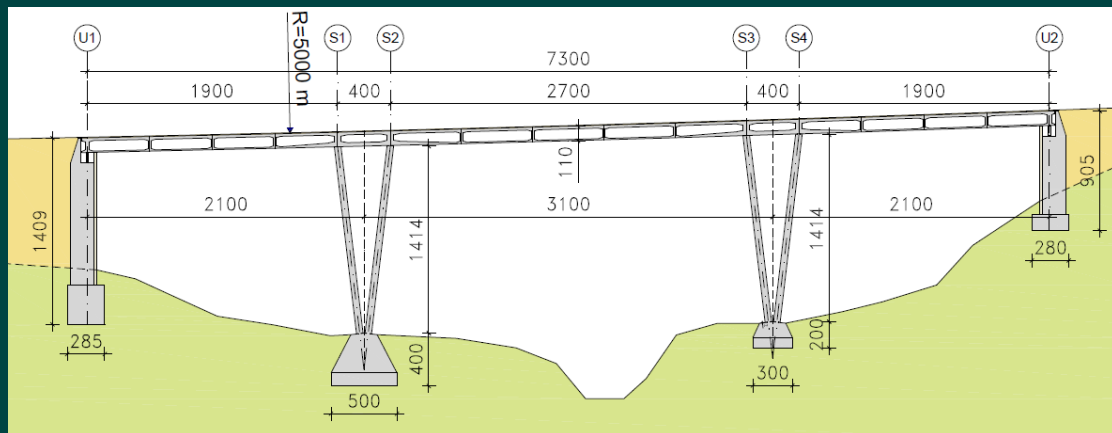
U poprečnom smjeru, ne postoje elementi koji ograničavaju pomak rasponskog sklopa pa se nakon otkazivanja ležaja, ovisno o intenzitetu seizmičkog djelovanja, mogu dogoditi veliki pomaci

U uzdužnom smjeru – pomak rasponskog sklopa ograničen je upornjakom te bi bilo kakav pomak, koji je veći od onoga koje dozvoljavaju prijelazne naprave, rezultirao udarom mosta u zid upornjaka s vjerojatnim oštećenjem obaju elemenata te drobljenjem prijelazne naprave

Primjer 2: Armiranobetonski okvirni most na stupovima V oblika

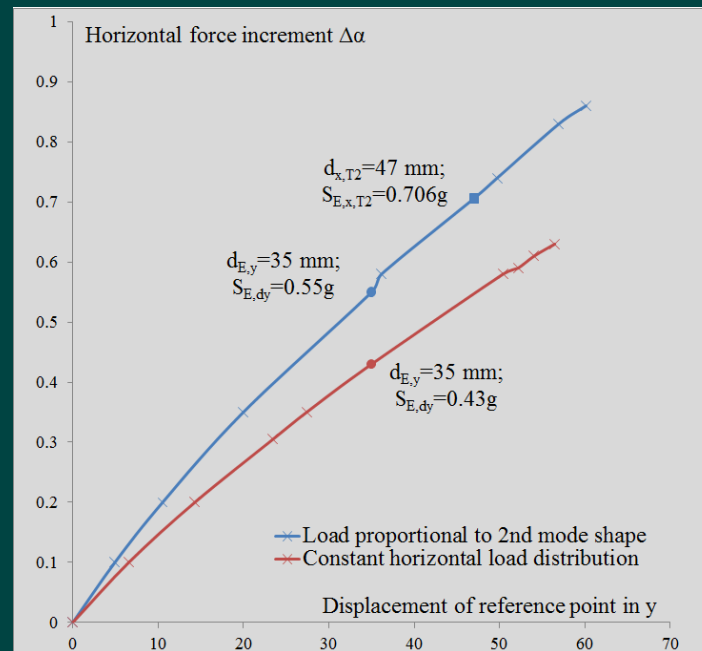
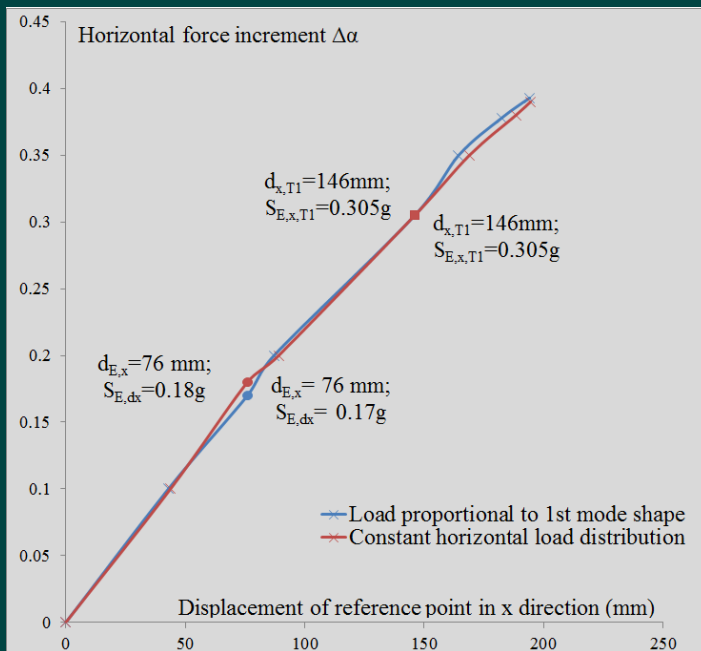


- Statički sustav zglobnog okvira s najvećim rasponom od 27 m
- Rasponska konstrukcija je poduprta stupovima V-oblika sa zglobom pri dnu te betonskim zglobnim ležajevima na upornjacima
- Rasponski sklop je armiranobetonska ploča oslabljena šuplinama



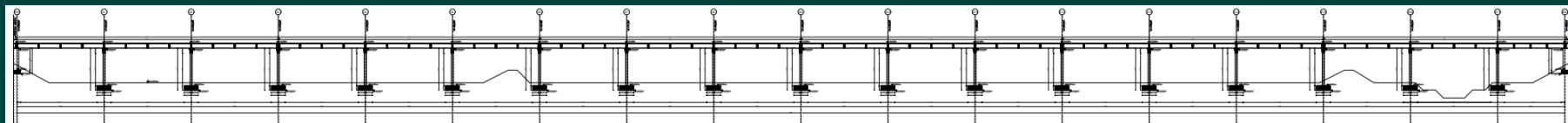
Primjer 2: Armiranobetonski okvirni most na stupovima V oblika

- Provedena je nelinearna statička pushover analiza – most se podvrgava horizontalnom opterećenju do dosezanja ciljanog pomaka
 - ciljani pomak – dobiva se iz linearne spektralne dinamičke analize
 - pushover analiza provedena je u oba horizontalna smjera, uzdužnom i poprečnom
 - krivulja sila-pomak konstrukcije (“krivulja kapaciteta”) – zahtjeve deformacije plastičnih zglobova do ciljanog pomaka
- pomaci koji odgovaraju dominantnim modalnim oblicima T_1 i T_2 ($d_{x,T1}$, $d_{y,T1}$) u uzdužnom odnosno poprečnom smjeru prekoračili su ciljane pomake (d_{Ex} , d_{Ey}): $d_{x,T1} > d_{Ex}$ i $d_{y,T1} > d_{Ey}$

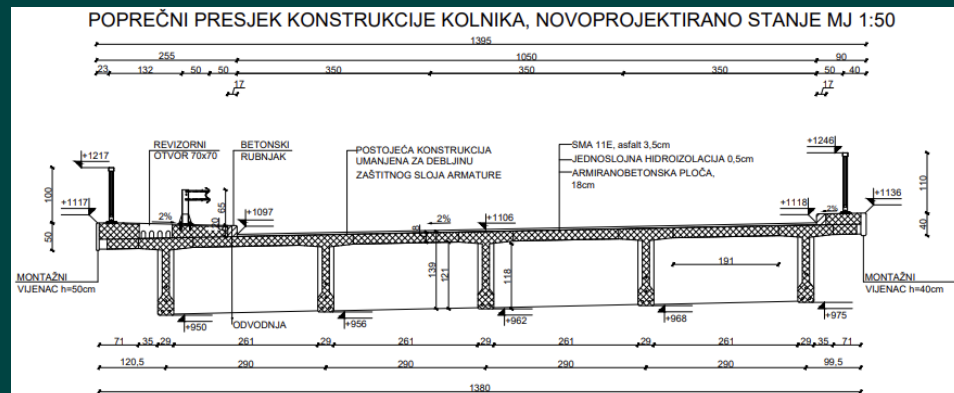
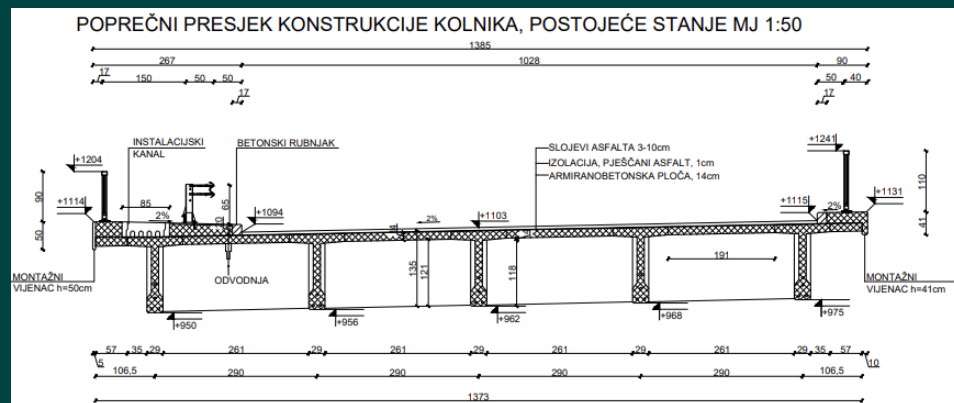


Primjer 3: Niz od 6 kontinuiranih roštiljnih rasponskih konstr.

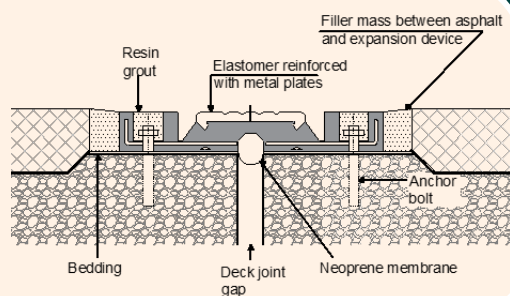
- $L_{uk} = 435,42 \text{ m}$
- Rasponi 24.5 m
- Prijelazne naprave na 7 mjesta



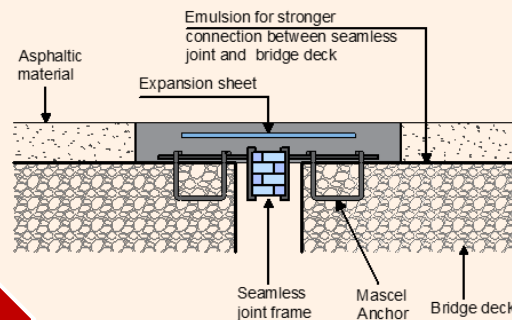
- U 2007. napravljen je projekt sanacije mosta.
- Veliki dio sanacije podrazumijevao je popravak i povećanje zaštitnog sloja do armature.
- Najzahtjevnija je bila upravo sanacija rasponskog sklopa.
 - Ovo je uključivalo uklanjanje 2 cm postojećeg betona, postavljanje nove armature i betoniranje novog sloja.
 - Ukupno je izliveno 4 cm novog betona, 2 cm ispod nove armature i 2 cm iznad nje.
- Nakon što je sanirana ploča mosta, postavljena je hidroizolacija i asfalt te su instalirane prijelazne naprave.



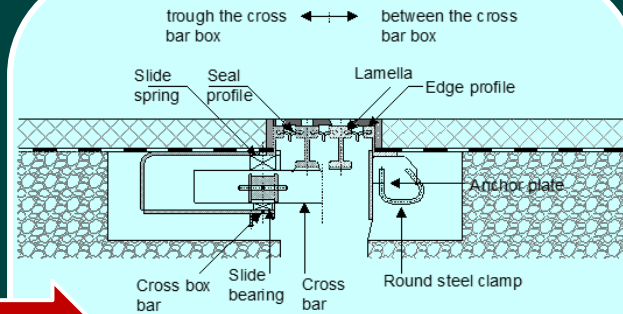
Primjer 3: Niz od 6 kontinuiranih roštiljnih rasponskih konstr.



- Izvorni projekt sanacije iz 2007.
- Ojačana elastomerna prijelazna naprava, 50 mm
- U praksi ovi se uređaji nisu pokazali visokokvalitetnima jer su dozvoljavali prodor vode u konstrukciju.



- Tijekom same sanacije 2012. donesena je odluka o zamjeni prijelaznih naprava
- Asfaltne fleksibilne naprave, 40 mm
- Oprema je instalirana u prosincu pri niskim temperaturama 0°C, pri visokoj vlažnosti i na vlažan beton ploče
- Posljedično, prijelazne naprave su procurile na gotovo svih 7 mjesta na kojima su instalirane (otkazuje spoj s kolnikom, pojavljuju se pukotine i slijedi procurivanje vode)
- za potrebe povezanosti agregata i veziva pri ugradnji su nužne visoke temperature



- Proračun u skladu s EC u sklopu diplomskog rada 2022.
- Rebraste naprave s elastomernim brtvenim ulošcima između čeličnih profila, ± 60 mm
- $T = 475$ years, $ag = 0.23g$, $q = 1.0$, $\gamma = 1.0$, tlo C
- 40% E + 50% T kombinacija djelovanja koja dozvoljava oštećenja pod ozbiljnim najjačim potresima dok se oštećenja pod učestalim vrijednostima još uvijek mogu izbjeći

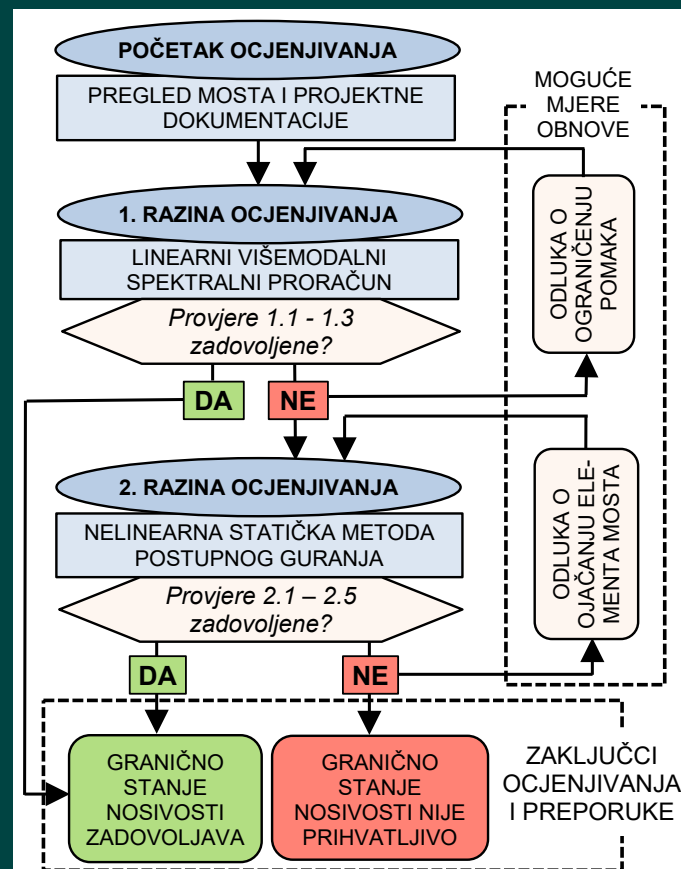
SEIZMIČKO OCJENJIVANJE RAZVIJENO ZA LUČNE MOSTOVE



3. SEIZMIČKO OCJENJIVANJE LUČNIH MOSTOVA

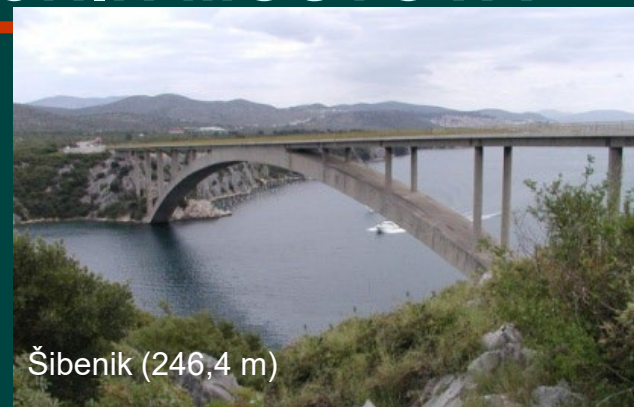
- ... sastoji se od dviju razina i nekoliko provjera na svakoj razini ocjenjivanja.
- 1. razina ocjene rezultira konzervativnijom ocjenom stanja mosta u pogledu seizmičkog odgovora.
- 2. razina zahtijeva veća numerička i proračunska ulaganja, ali rezultira manje konzervativnom procjenom stanja mosta, a time i ekonomski povoljnijim rješenjem obnove.
- Ako će se provesti mjere obnavljanja mosta, važno je istu proceduru proračuna primijeniti na modelu ojačanog mosta i ponoviti ocjenu kroz iste korake provjere.

Provjere uz linearni višemodalni spektralni proračun	
1.1 Pomaci u odnosu na dozvoljene	$d_{allow} \geq d_e$
1.2 Odgovor na interakciju normalnih sila i momenata savijanja	$f(N_{Rd}, M_{Rd}) \geq f(N_E, M_E)$; $f_{i,m}$ za $f(N_{Rd}, M_{Rd})$ i $f(N_E, M_E)$
1.3 Potresni zahtjev na posmik	$V_{Bd,1} = V_{Rd}/\gamma_{Bd,1} \geq V_E$; $CF \times f_{i,m}$ za V_E ; $f_{i,m}/CF \times \gamma$ za V_{Rd}
Provjere uz nelinearnu statičku metodu postupnog guranja	
2.1 Sposobnost rotacije na mjestima potencijalnih plastičnih zglobova	$\theta_{is} \geq \theta_{p,E}$
2.2 a) Naprezanja neobavijenog i b) obavijenog betona	$f_{cm}/(CF \times \gamma_{c,acc}) \geq \sigma_{c,E}$ (u elastičnom području) $f_{cm,c}/(CF \times \gamma_{c,acc}) \geq \sigma_{c,E}$ (u plastičnom podr.)
2.3 Naprezanja armature	$f_{ym}/(CF \times \gamma_{s,acc}) \geq \sigma_{y,E}$
2.4 Provjera na poprečne sile kao neduktilni oblik otkazivanja	$V_{Bd,1} = V_{Rd}/\gamma_{Bd,1} \geq V_E$; $CF \times f_{i,m}$ za V_E ; $f_{i,m}/CF \times \gamma$ za V_{Rd}
2.5 Izbočavanje uzdužne tlačne armature između poprečnih spona	$A_{t,built}/s_{T,built} \geq \min(A_t/s_T)$



3. SEIZMIČKO OCJENJIVANJE LUČNIH MOSTOVA

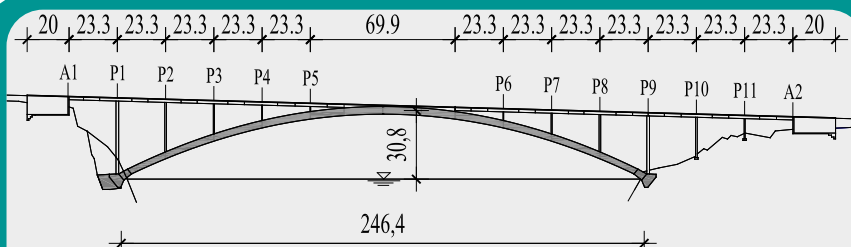
- AB lučni mostovi su posebne konstrukcije zahvaljujući svojoj robusnosti pa se:
 - zadovoljavajuće ponašanje lukova može dokazati već na 1. razini ocjenjivanja
 - Za nadlučne stupove (posebice kratke stupove u blizini tjemena) biti će nužno proći i kroz 2. razinu ocjenjivanja



Provjere uz linearni višemodalni spektralni proračun		
1.1 Pomaci u odnosu na dozvoljene	$d_{allow} \geq d_e$	DA
1.2 Odgovor na interakciju normalnih sila i momenata savijanja	$f(N_{Rd}, M_{Rd}) \geq f(N_E, M_E)$; $f_{i,m}$ za $f(N_{Rd}, M_{Rd})$ i $f(N_E, M_E)$	NE: P1, P5, P6, P9
1.3 Potresni zahtjev na posmik	$V_{Bd,1} = V_{Rd} / \gamma_{Bd,1} \geq V_E$; $CF \times f_{i,m}$ za V_E ; $f_{i,m} / CF \times \gamma$ za V_{Rd}	NE: P5, P6
Provjere uz nelinearnu statičku metodu postupnog guranja		
2.1 Sposobnost rotacije na mjestima potencijalnih plastičnih zglobova	$\theta_{ls} \geq \theta_{p,E}$	DA
2.2 a) Naprezanja neobavijenog i b) obavijenog betona	$f_{cm} / (CF \times \gamma_{c,acc}) \geq \sigma_{c,E}$ (u elastičnom području) $f_{cm,c} / (CF \times \gamma_{c,acc}) \geq \sigma_{c,E}$ (u plastičnom podr.)	NE: P5, P6
2.3 Naprezanja armature	$f_{ym} / (CF \times \gamma_{s,acc}) \geq \sigma_{y,E}$	NE: P5, P6
2.4 Provjera na poprečne sile kao neduktilni oblik otkazivanja	$V_{Bd,1} = V_{Rd} / \gamma_{Bd,1} \geq V_E$; $CF \times f_{i,m}$ za V_E ; $f_{i,m} / CF \times \gamma$ za V_{Rd}	NE: P5, P6
2.5 Izbočavanje uzdužne tlačne armature između poprečnih spona	$A_{t,built} / s_{T,built} \geq \min(A_t / s_T)$	NE: P1-P3, P7-P10

3. SEIZMIČKO OCJENJIVANJE LUČNIH MOSTOVA

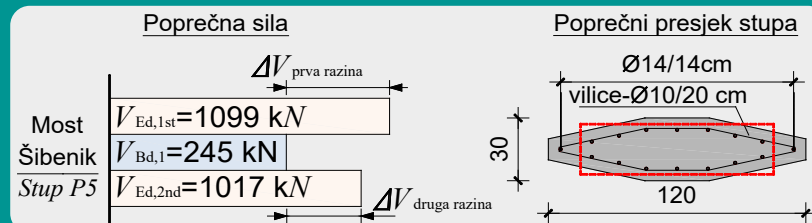
- Dinamička posebitost lučnih mostova je fleksibilnost luka kao oslonca nadlučnim stupovima te velika masa smještena najčešće u sredini cjelokupnog mosta zbog položaja i mase luka.
- Tijekom neelastičnog odgovora lučnog mosta uslijed početnog potresnog udara, najveći pomaci zahtijevaju se od najkraćih stupova što rezultira njihovim prekomjernim raspucavanjem i konačno nakon razornog potresa i potrebom za njihovim popravcima ili obnovom.
- Nakon raspucavanja najkraćih stupova i pripadne redukcije krutosti, zahtjevi na pomake se premještaju od tjemenih prema obalnim stupovima što rezultira također i njihovom degradacijom.
- Ovo prekomjerno raspucavanje valja na pravi način uzeti u obzir djelotvornom preostalom krutošću poprečnih presjeka stupova koja se određuje iterativnim postupkom.



P1	P2	P3	P4	P5	$E_c I_{eff} / E_c I_{gross}$ (%)	P6	P7	P8	P9	P10	P11
100	70	45	25	10	uzdužno	15	30	55	80	55	30
100	60	30	15	10	poprečno	10	15	35	70	55	35

Odnos krutosti raspucalih i neraspucalih poprečnih presjeka u područjima potencijalnih plastičnih zglobova

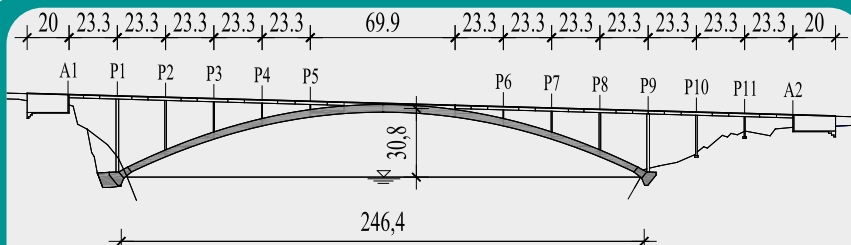
Zahtijevane nosivosti na posmik na najkritičnijim stupovima



3. SEIZMIČKO OCJENJIVANJE LUČNIH MOSTOVA

- Obzirom na preveliki zahtjev na posmičnu otpornost,
 - umjesto velike promjene dimenzija kritičnog poprečnog presjeka,
 - prikladnije rješenje bilo bi prijenos seizmičke sile sa stupova na upornjake postavljanjem seizmičkih prigušivača ili uređaja za prijenos udara na upornjake.
- Točna ocjena granične sposobnosti rotacije armiranobetonskih elemenata,
 - uslijed velikog broja geometrijskih i materijalnih parametara i uključenih nesigurnosti:

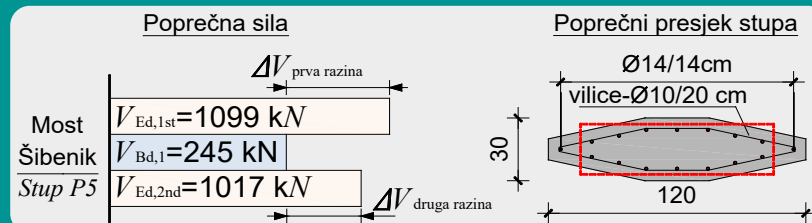
oblik opterećenja: cikličko ili monotono, potresno oblikovanje, ovijanje betona, odlamanje zaštitnog sloja betona, rebrasta ili glatka armatura, duljina preklapanja, duljina plastičnog zgloba, utjecaj savijanja, visina poprečnog presjeka, itd.
 - može se odrediti samo na temelju eksperimentalnih podataka .



P1	P2	P3	P4	P5	$E_c I_{eff} / E_c I_{gross} (\%)$	P6	P7	P8	P9	P10	P11
100	70	45	25	10	uzdužno	15	30	55	80	55	30
100	60	30	15	10	poprečno	10	15	35	70	55	35

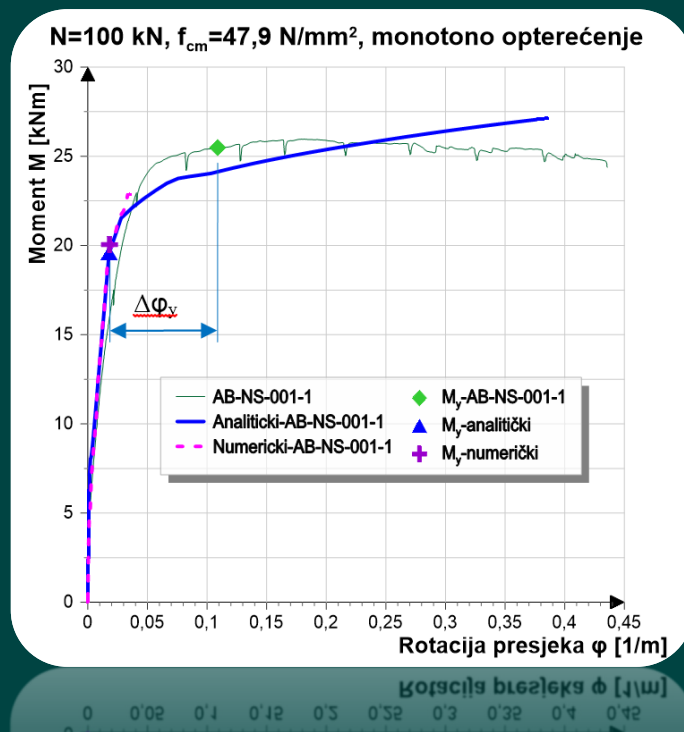
Odnos krutosti raspucalih i neraspucalih poprečnih presjeka u područjima potencijalnih plastičnih zglobova

Zahtijevane nosivosti na posmik na najkritičnijim stupovima



Primjer 4: Otkrivanje razina duktilnosti na Šibenskom mostu

- ❑ Ne tipični poprečni presjeci, glatka armatura, bez smjernica za duktilno ponašanje
- ❑ Pokazatelji seizmičke učinkovitosti:
 - M/ϕ krivulje – koje pokazuju rotacijsku sposobnost plastičnih zglobova
 - Kut zaokreta krajnjeg presjeka i rotacijski kapacitet kod dosezanja granice popuštanja i kod GSN
 - Duljina plastičnog zgloba
- ❑ M/ϕ krivulje – analitičkim, eksperimentalnim i numeričkim pristupom:
 - Učinak proklizavanja glatke armature izaziva veće rotacije presjeka do točke popuštanja, ali se smanjuje kako se približavamo GSN

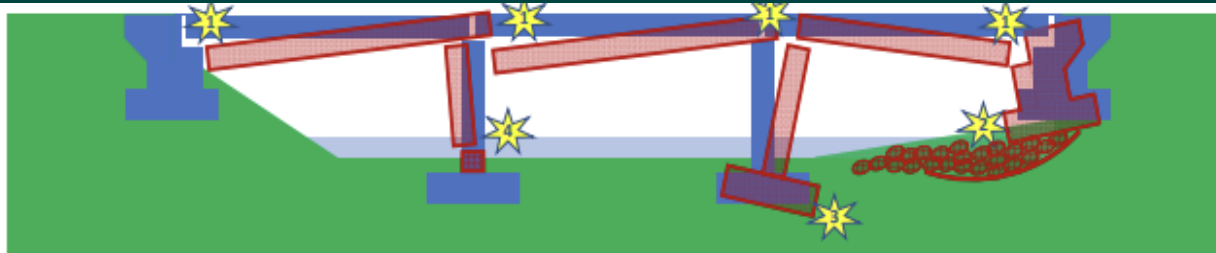


BRZO OCJENJIVANJE OŠTEĆENJA NAKON POTRESA (POST EARTHQUAKE RAPID DAMAGE ASSESSMENT)



4. BRZO OCJENJIVANJE OŠTEĆENJA NAKON POTRESA

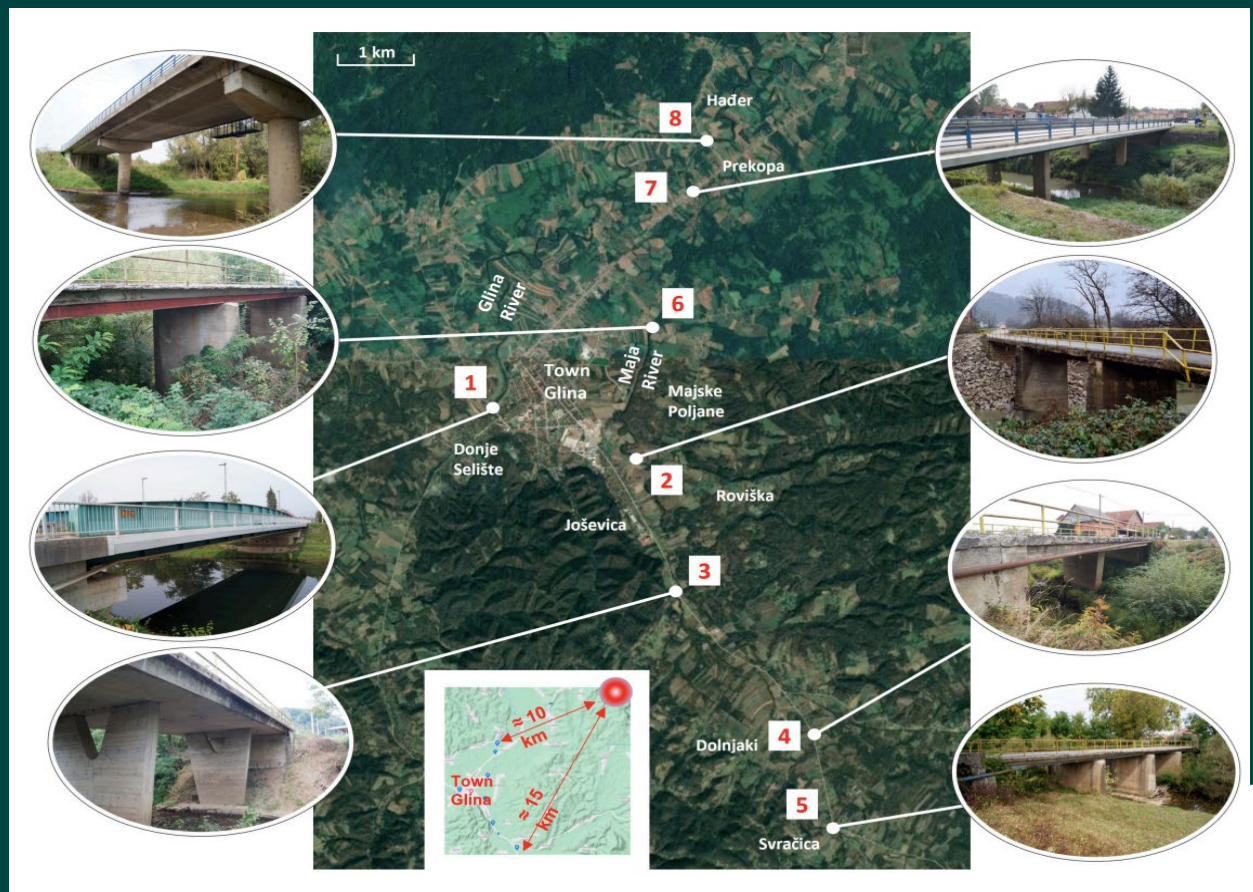
- 29. prosinca 2020. razorni potres $M_L = 6.2$ pogodio je Sisačko-moslavačku županiju u Hrvatskoj.
- Odmah nakon potresa poslani su timovi građevinskih inženjera koji su izvršili brzu procjenu štete i procijenili uporabljivost konstrukcija.



Najčešći oblici otkazivanja konstrukcije uslijed potresa (mogu se dogoditi pojedinačno ili u kombinaciji): 1 – proklizavanje ležaja; 2 – klizanje tla temelja upornjaka; 3 – prevrtanje stupa; 4 – posmični slom stupa

Primjer 5: Oštećenja 8 mostova na području Gline

- ❑ Ovo područje se nalazi 10-15 km od epicentra potresa i stoga je bilo jako pogođeno
- ❑ Svi pregledi obavljeni su u 1 dan, a kontrola za najkritičniji most br. 2 u naredna 2 dana.
- ❑ Većina mostova stara je 50 ili više godina. Broj 1, 7 i 8 izgrađeni su u zadnjih 30 godina.
- ❑ Svi mostovi imaju jednostavno oslonjene ili kontinuirane nosače raspona 7 - 20 m.
- ❑ Rasponske konstrukcije su betonske ploče ili spregnuti rebrasti profil čelik-beton.
- ❑ Most u Glini je čelični gredni most raspona 40 m.



Primjer 5: Oštećenja 8 mostova na području Gline

- ❑ Glavni problem svih mostova bio je neodržavanje, što je u kombinaciji s lošom hidroizolacijom dovelo do progresivnog propadanja materijala i posljedičnog oštećenja mostova.
- ❑ Većina mostova dobro se pokazala u potresu i otvoreni su za korištenje bez ograničenja.
- ❑ **Samo je jedan most s većim oštećenjima –most Matije Gupca– zatvoren za promet i naknadno renoviran.**
- ❑ **Za most s manjim oštećenjima - Haderov most - preporuča se dodati dilatacijske spojeve koji omogućuju seizmička pomicanja i provjeriti pomake nelinearnom analizom kako bi se spriječilo klizanje nosača.**

Most	Seizmičko oštećenje	Oštećenja uslijed nepravilnog održavanja i starenja	Greške u projektu
Most Glina	Nema oštećenja	Začepljene prijelazne naprave, korozija čelika	Nisu uočljive
Cestovni most Matija Gubec	Klizanje upornjaka i oštećenje zidanog zida upornjaka	Jaka korozija čelika, odlamanje betona i korozija armature, podlokavanje, hodnici i vijenci djelomično nedostaju	Nedovoljno temeljenje jednog stupa, jedan upornjak je od kamenih blokova, drugi od armiranog betona, nema hidroizolacije i odvodnje
Most Roviška	Nema oštećenja	Korozija armature zida upornjaka, nedostaju dijelovi bočnog zida, jako oštećeni hodnik i vijenac, moguće je podlokavanje temelja stupa	Nedovoljna armatura na bočnom zidu upornjaka i loš beton, nema hidroizolacije ni odvodnje
Most Maja	Nema oštećenja	Začepljena odvodnja, jako oštećen hodnik, upornjaci izloženi oštećenju uslijed curenja vode i vlaženja	Loša hidroizolacija, dilatacija između zida upornjaka i krila
Most Svračica	Nema oštećenja	Korozija čeličnih nosača, korozija armature stupova	Nema hidroizolacije ni odvodnje
Cestovni most Nikola Tesla	Nema oštećenja	Korozija čeličnih nosača, korozija armature stupova, teško oštećenje hodnika i vijenca, teško oštećenje asfalta	Nema hidroizolacije ni odvodnje
Most Prekopa	Nema oštećenja	Začepljena prijelazna naprava s propalom hidroizolacijom, procjeđivanje vode na zidu upornjaka	Nisu uočljive
Most Hađer	Prekomjerni pomaci, oštećenje zida upornjaka, oštećenja asfalta, oštećenje vijenca	Jako procjeđivanje vode na zidovima upornjaka i vrhu stupa, odlamanje betona i korozija armature, raspucala naglavnica stupa	Nema prijelaznih naprava, nema ležajeva, nema odvodnje, nosači nisu simetrično poduprti

5. NEDOSTACI VS. SKRIVENE REZERVE

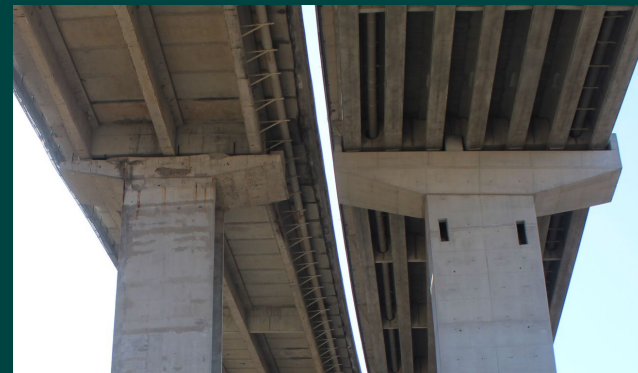
- ❑ Ovisno o konstruktivnom sustavu, korištenim materijalima, pristupu projektiranju, konstrukcijskim detaljima, postojeći mostovi mogu imati:

Nedostatke / mane

- Plutajuće oslanjanje nosača bez antiseizmičkih blokova
- Veliki pomaci - nedovoljna mogućnost pomicanja
- Nedovoljne duljine preklapanja kod grednih mostova
- Nema detalja za duktilno ponašanje
- Nedostaje redovito održavanje ili čak periodički pregledi

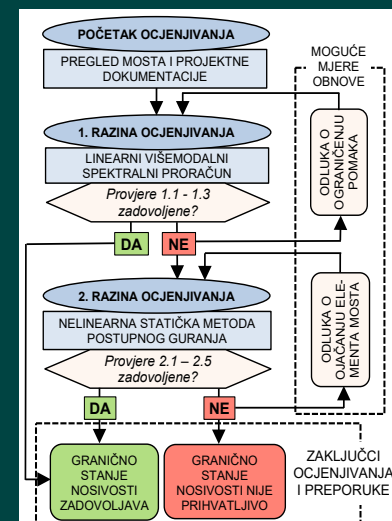
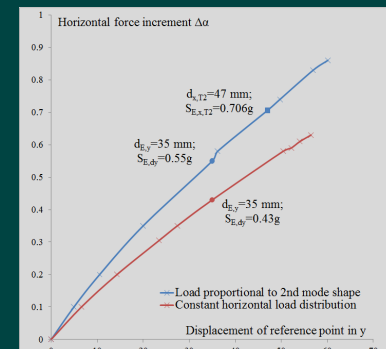
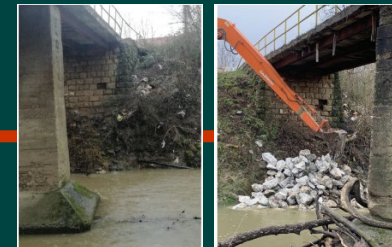
Prednosti / skrivene rezerve

- Robusnost integralnih/okvirnih i lučnih mostova
- Glatka armatura, koja zbog svojstava materijala i manjeg prijanjanja uz beton dopušta veće deformacije
- Manje dimenzije – manje seizmičke sile
- Većina mostova pokazala je dobro ponašanje tijekom potresa i nastavili su se koristiti za potrebe spašavanja i evakuacije.



5. ZAKLJUČNO

- Unatoč dugom vijeku trajanja i nedovoljnom održavanju,
 - većina ispitanih mostova pokazala je dobro ponašanje tijekom ovog potresa
 - i nastavili su se koristiti nakon potresa za potrebe spašavanja i evakuacije.
- Ali postoje iznimke –
 - mostovi s većim ili manjim oštećenjima, u kritičnom ili lošem stanju –
 - što bi, ako se zanemari, moglo dovesti do prekomjernih pomaka i mogućih katastrofalnih otkazivanja.
- Nadalje, rezultati analiziranih primjera mostova u uporabi otkrivaju
 - ne posjeduju dovoljnu nosivost za seizmička djelovanja, prema trenutno važećim seizmičkim propisima.
- Stoga su glavni koraci u strategiji protuseizmičkog upravljanja infrastrukturom mostova
 - uspostaviti proaktivno redovito održavanje temeljeno na vizualnom pregledu potkrijepljenom odgovarajućim tehnikama ispitivanja kako bi se utvrdilo trenutno stanje
 - primjena višerazinskih metoda procjene postojećih mostova od strane inženjera konstruktora mostova za procjenu kapaciteta postojećih mostova u pogledu njihove seizmičke otpornosti
- U međuvremenu nastojimo obrazovati novi tip inženjera sa znanjima iz različitih disciplina
 - Konstrukcije, materijali, trajnost, održavanje i upravljanje, ...



SEIZMIČKA UČINKOVITOST POSTOJEĆIH MOSTOVA U HRVATSKOJ: nedostaci, skrivene rezerve i seizmičko ocjenjivanje



Ana Mandić Ivanković