

Utjecaj veze stupova i greda na seizmičke sile mostova

Jure Radnić, Domagoj Matešan

Ključne riječi

most,
stup,
greda,
rasponski sklop,
seizmičke sile,
most "Kličevica",
veze stupova i greda

Key words

bridge,
pier,
beam, superstructure,
seismic forces,
Kličevica bridge,
pier and beam
connections

Mots clés

pont,
pile,
poutre,
superstructure,
forces sismiques,
pont de Kličevica,
connexions entre
piles et poutres

Ключевые слова

мост,
колонна,
балка,
сейсмические силы,
мост «Кличевца»,
связи колонн и балок

Schlüsselworte

Brücke,
Pfeiler,
Balken,
Überbrückungsgefüge,
seismische Kräfte,
Brücke "Kličevica",
Verbindung von Pfeilern
und Balken

J. Radnić, D. Matešan

Prethodno priopćenje

Utjecaj veze stupova i greda na seizmičke sile mostova

Razmatra se utjecaj načina veze stupova i rasponskog sklopa na veličinu i raspodjelu seizmičkih sila na mostovima. Analiza je provedena za most Kličevicana dionici JAC-a Zadar 2 – Benkovac. Modelirani su slučajevi s krutom i zglobnom vezom stupova i rasponskog sklopa te slučaj s elastomernim ležajevima. Istražen je utjecaj krutosti elastomernih ležajeva na rezultate seizmičkog proračuna. U zaključcima su iznesene sugestije za primjenu provedene analize za slične mostove.

J. Radnić, D. Matešan

Preliminary note

Influence of pier and beam connections on seismic resistance of bridges

The way in which the size and distribution of seismic forces on bridges is influenced by the connection between the superstructure and piers is considered. The analysis focuses on the Kličevica bridge which is situated on the Adriatic motorway between Zadar 2 and Benkovac. The rigid and hinge connections between piers and the overlying superstructure, including the case with elastomeric bearings, are modeled. The way in which the rigidity of elastomeric bearings influences seismic calculation results is also analyzed. Suggestions for the application of this analysis on similar bridges are presented in the final part of the paper.

J. Radnić, D. Matešan

Note préliminaire

L'influence des connexions entre piles et poutres sur la résistance sismique des ponts

L'effet de la connexion entre la superstructure et les piles sur la grandeur et la distribution des forces sismiques aux ponts est considéré. L'analyse est concentrée sur le pont de Kličevica qui est situé sur l'autoroute de l'Adriatique entre Zadar 2 et Benkovac. Les connexions fixes et articulées entre les piles et la superstructure, y compris le cas avec les appareils d'appui en élastomère, sont modelées. L'influence de la rigidité des appareils d'appui en élastomère sur les résultats des calculs sismiques est également analysée. Les suggestions pour l'application de cette analyse aux ponts similaires sont présentées dans la partie finale de l'ouvrage.

Ї. Раднич, Д. Матешан

Предварительное сообщение

Влияние связи колонн и балок на сейсмические силы мостов

В работе рассматривается влияние способа связи колонн и балок на величину и распределение сейсмических сил на мостах. Анализ проведён для моста «Кличевца» на участке автодороги Задар 2 – Бенковац. Моделированы случаи с жёсткой и шарнирной связью колонн и балок, а также случай с эластомерными опорами. Исследовано влияние жёсткости эластомерных опор на результаты сейсмического расчёта. В выводах вынесены предложения для применения проведённого анализа для похожих мостов.

J. Radnić, D. Matešan

Vorherige Mitteilung

Einfluss der Verbindung von Pfeilern und Balken auf die seismischen Kräfte bei Brücken

Man betrachtet den Einfluss der Art der Verbindung der Pfeiler mit dem Überbrückungsgefüge auf die Größe und Verteilung der seismischen Kräfte. Die Analyse wurde für die Brücke "Kličevica" auf der Teilstrecke Zadar 2 - Benkovac der Adriaautobahn durchgeführt. Man modellierte die Fälle mit starrer - und Gelenkverbindung der Pfeiler mit dem Überbrückungsgefüge, sowie für den Fall der Anwendung von Elastomerlagern. Erforscht wurde der Einfluss der Starrheit der Elastomerlager auf die Ergebnisse der seismischen Berechnung. Im Schluss gibt man Suggestionen für die Anwendung der durchgeführten Analyse auf ähnliche Brücken.

Autori: Prof. dr. sc. **Jure Radnić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu;
mr. sc. **Domagoj Matešan**, dipl. ing. građ., IGH Zagreb, Poslovni centar Split, Matice hrvatske 15, Split

1 Uvod

Poznato je da način veze stupova i rasponskog sklopa uvelike utječe na veličinu i raspodjelu seizmičkih sila mostova. Naime, veza stup - rasponski sklop direktno utječe na krutost sustava, a time i na njegove dinamičke karakteristike. Općenito, ova veza može biti sa slobodnim te djelomično ili potpuno spriječenim relativnim pomacima i zaokretima. U praksi je ta veza najčešće kruta (ukliještena), zglobna (spriječeni pomaci i omogućena zaokretanja) ili se pak ostvaruje preko klasičnih elastomernih ležajeva (djelomično spriječeni pomaci i kutovi zaokreta). U okviru primjene elastomernih ležajeva, značajan je utjecaj njihove krutosti na veličinu seizmičkih sila. U tom je smislu važan utjecaj površine i visine ležajeva te njihove varijacije u uzdužnoj dispoziciji mosta.

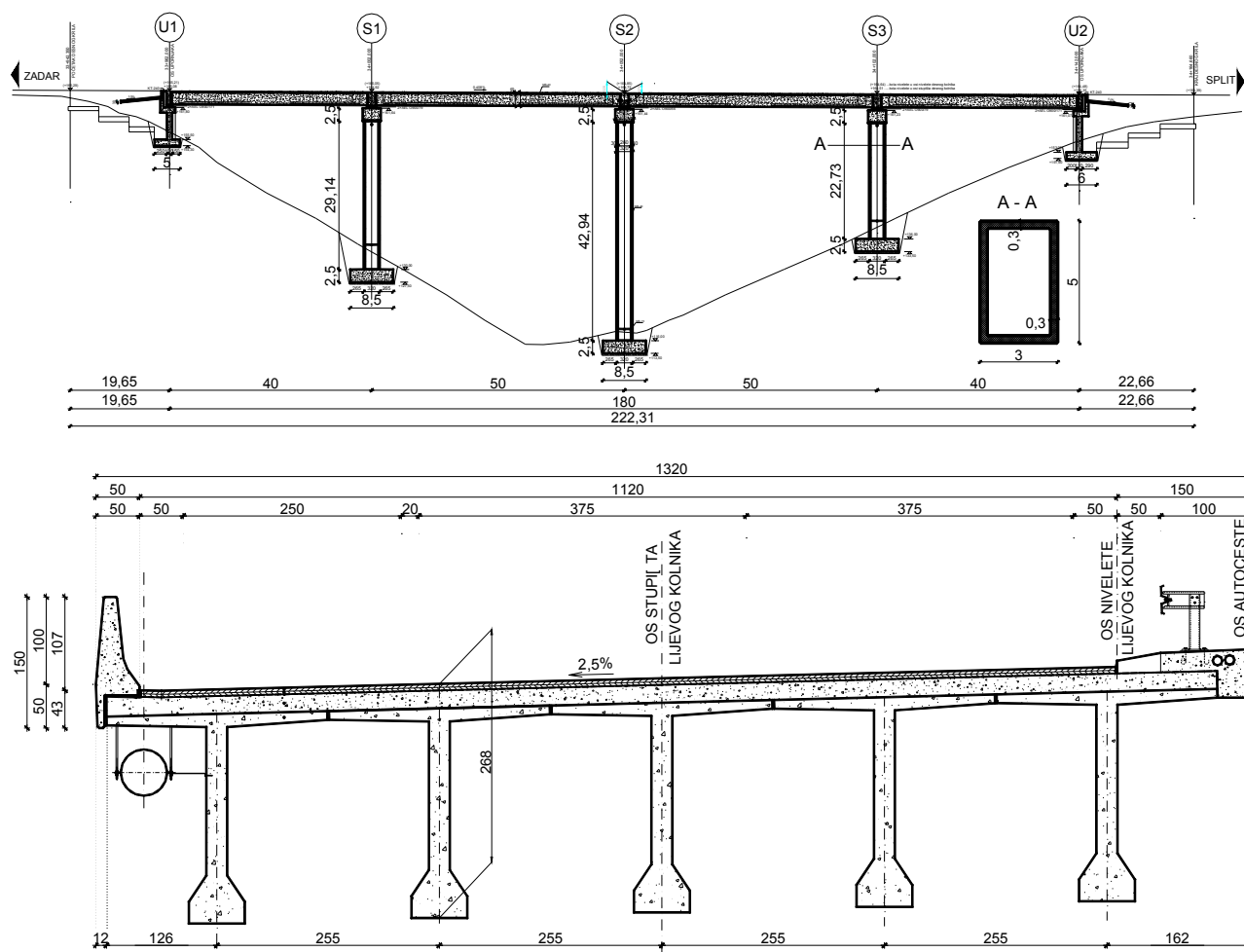
Za bilo koje odabrano rješenje veze stupova i rasponskog sklopa, na veličinu i raspodjelu seizmičkih sila utječu sljedeći faktori:

- broj otvora (raspona) mosta

- tip rasponskog sklopa
- visine stupova i njihovi odnosi u uzdužnoj dispoziciji
- krutosti stupova i rasponskog sklopa, te njihovi relativni odnosi
- veza stup-temelj
- upotrijebljena gradiva
- rješenje detalja
- seizmički uvjeti
- računski model i sl.

Stoga će svaki most imati određene specifičnosti, pa nije uvijek moguće donijeti zaključke koji bi u cijelosti vrijedili za sve mostove. Zato će se ova problematika ovdje razmatrati za jedan konkretni most.

Analiziran je utjecaj veze stupova i rasponskog sklopa, kao i utjecaj krutosti elastomernih ležajeva, kod mosta *Kličevica* na dionici Zadar 2 - Benkovac Jadranske autoceste [2], [3]. Osnovni podaci o mostu prikazani su



Slika 1. Uzdužna i poprečna dispozicija mosta *Kličevica*

na slici 1. Most ima četiri raspona u uzdužnoj dispoziciji, veličina $40 + 2 \times 50 + 40 = 180$ m, s relativno visokim stupovima. Armiranobetonski rasponski sklop je od predgotovljenih prednapetih betonskih nosača širokoga gornjeg pojasa, koji se naknadno povezuju klasičnom armaturom u kolničkoj ploči iznad stupova. Stupovi su sandučastoga poprečnog presjeka. Usvojeno je rješenje oslanjanja rasponskog sklopa na donji ustroj s pomoću klasičnih elastomernih ležajeva. Temeljenje je plitko, na tlu velike nosivosti i male deformabilnosti. Računsko je ubrzanje tla pri potresu 0,10 g.

2 Numerički model

Analiziran je prostorni štapni model mosta, s geometrijskom i materijalnom linearnošću. Pri tome su upornjaci tretirani kao neizmerno kruti i nepopustljivi pa su stoga isključeni iz modela. Računano je da su svi stupovi potpuno ukliješteni u temelje i da su temelji stupova također nepopustljivi. Rasponska je konstrukcija modelirana kao štapna ekvivalentne krutosti.

Za rješenje s elastomernim ležajevima u model su uključeni poprečni nosači i naglavnice stupova. Elastomerni ležajevi su također modelirani kao štapni elementi, s odgovarajućim krutostima za utjecaje uzdužnih sila i posmika (savijanja), a sve sukladno literaturi [4].

Računato je da su mase mosta (od stalnog i 50% prometnog opterećenja) skoncentrirane u čvorovima štapnog modela. Proračun potresnih sila izvršen je prema EC 8 [1], pri čemu je uporabljena višemodalna spektralna analiza. Uključen je utjecaj prvih 20 modova na dobivene rezultate. Konstrukcija je tretirana kao ograničeno duktilna, pri čemu je za obje horizontalne komponente ubrzanja uzet faktor ponašanja $q = 1,5$, a za vertikalnu komponentu ubrzanja $q = 1$. Vjeruje se da odabrani numerički model konstrukcije ne utječe značajno na donešene zaključke.

3 Utjecaj načina veze stupova i rasponskog sklopa na potresne sile

Analizirana su tri načina veze stupova i rasponskog sklopa na veličinu i raspodjelu unutrašnjih sila od potresnog djelovanja:

- kruta (ukliještena) veza
- zglobna veza i
- veza s pomoću elastomernih ležajeva (usvojeno izvedbeno rješenje [2], [3]).

Za prva dva slučaja iznad upornjaka predviđeni su lončasti ležajevi koji dopuštaju pomake u smjeru osi mosta i sprječavaju pomake poprečno na most, dok su u trećem slučaju klasični elastomerni ležajevi i iznad upornjaka.

Predviđena su po dva kružna elastomerna ležaja iznad svake potpore (tablica 1.). Navedene izmjere su proizašle iz proračuna ležajeva na sva mjerodavna vertikalna i horizontalna opterećenja i djelovanja, računajući s njihovom dostatnom nosivosti i stabilnosti. Usvojen je modul posmika elastomernih ležajeva $G = 1,2$ MPa.

Tablica 1. Dimenzije kružnih elastomernih ležajeva

Lokacija	Promjer [cm]	Visina [mm]
Upornjaci U_1, U_2	90	171
Stupovi S_1, S_3	90	79
Stup S_2	90	53

Utjecaj razmatranih načina veze rasponskog sklopa i stupova na dinamičke karakteristike mosta prikazan je na slici 2. (podaci za prvih 8 modova). Neki rezultati proračuna seizmičkih utjecaja dani su u tablici 2.

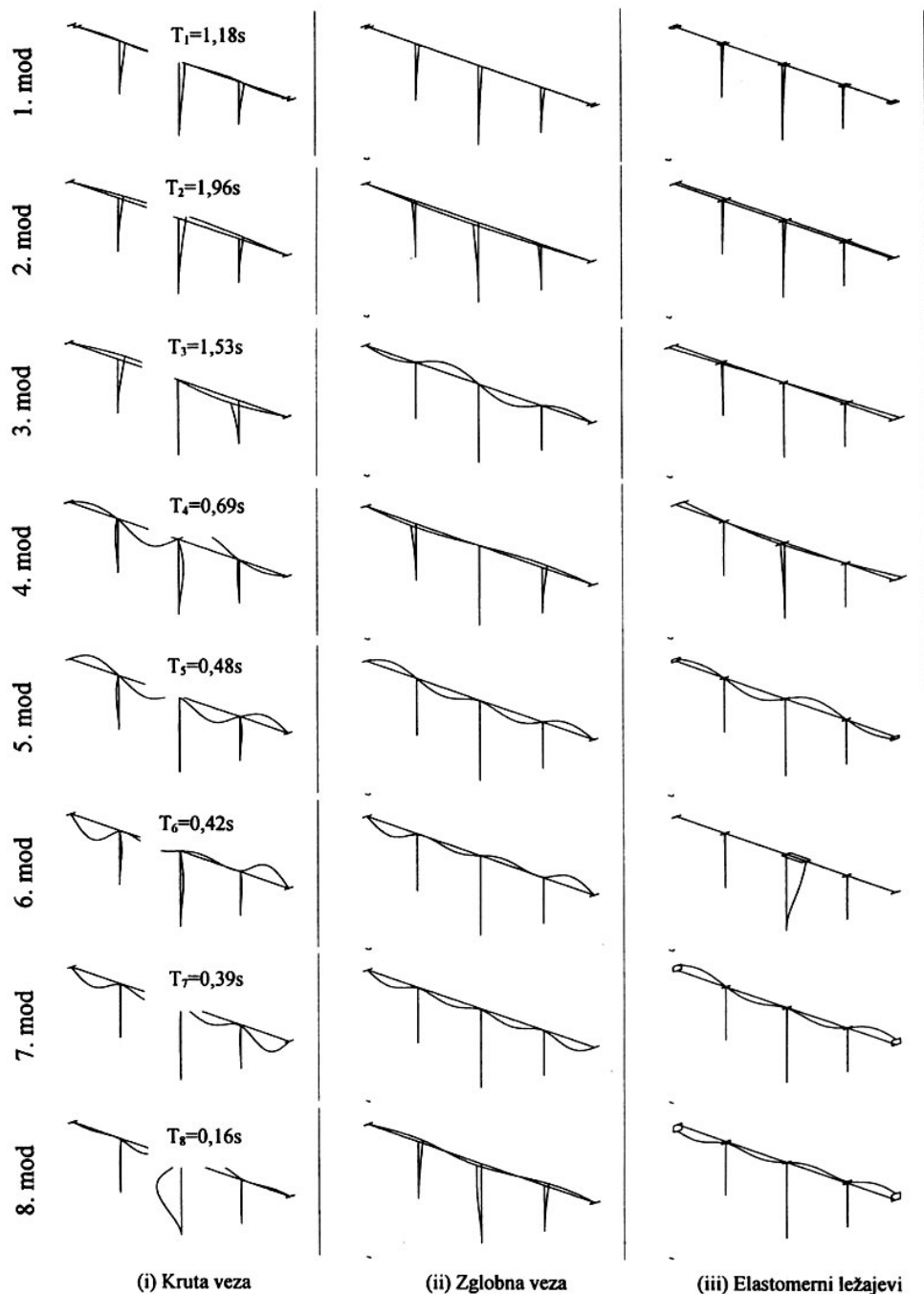
Tablica 2. Utjecaj načina veze stupova i rasponskog sklopa na resultantne seizmičke sile

Veza stup-rasp. sklop	F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	M_x [kNm]	M_y [kNm]	M_z [kNm]
Kruta	4406	3783	6159	87131	81292	6253
Zglobna	3215	3952	6088	88753	98198	0
Elastomerni ležajevi	2923	2926	6822	73413	58156	149

Iz priloženih je rezultata vidljivo da kruta veza stupova i rasponskog sklopa ima za posljedicu najveću krutost sustava, odnosno najkraće periode slobodnih oscilacija. S druge pak strane, primjena elastomernih ležajeva značajno omekšava konstrukciju, odnosno povećava periode slobodnih oscilacija. Vrijednosti za zglobnu vezu između stupova i rasponskog sklopa su između ovih vrijednosti, s tim da su značajno bliže onima za krutu vezu stup-rasponski sklop.

Pomaci stupova, a osobito rasponskog sklopa, najveći su u slučaju primjene elastomernih ležajeva, a najmanji za slučaj krute veze stup-rasponski sklop.

Elastomerni ležajevi osiguravaju najmanje horizontalne, ali i nešto veće vertikalne resultantne seizmičke sile (sumarne reakcije oslonaca). Sumarni momenti savijanja u bazi stupova su također najmanji pri korištenju elastomernih ležajeva. Povećani momenti savijanja u bazi stupova u ravnini mosta za zglobnu vezu stup-rasponski sklop, u odnosu na krutu vezu, posljedica su njihove različite preraspodjele po visini stupa. Momenti savijanja rasponske konstrukcije u horizontalnoj ravnini su također najmanji pri uporabi elastomernih ležajeva, dok su za ostala dva razmatrana slučaja podjednaki. Međutim, primjena elastomernih ležajeva ne smanjuje momente savijanja rasponskog sklopa u vertikalnoj ravnini, što se pripisuje utjecaju vertikalne komponente potresa.



Slika 2. Utjecaj načina veze stupova i rasponskog sklopa na prvih 8 oblika i perioda slobodnih oscilacija mosta

Na temelju analize dobivenih rezultata, može se zaključiti da je primjena elastomernih ležajeva najprihvatljivije rješenje. Ono omogućava najmanji utrošak armature u stupovima (najmanji momenti savijanja), te najmanje dimenzije i utrošak armature u temeljima stupova.

Kao što je prethodno navedeno, rezultati proračuna prikazani su u tablici 2. Za slučaj primjene elastomernih ležajeva dobiveni su uz usvojeni faktor ponašanja $q = 1,5$

za obje horizontalne komponente potresa. Ako bi se za taj slučaj, a što je sukladno EC 8 [1], usvojio faktor ponašanja $q = 1$ za sve komponente potresa, dobili bi se rezultati prikazani u tablici 3. Dakle, dobile bi se veće unutrašnje sile u stupovima i rasponskom sklopu nego u slučajevima krute i zglobne veze stupova i rasponskog sklopa. Stoga se zahtjev EC 8 za obveznim usvajanjem $q = 1$ u slučaju primjene elastomernih ležajeva ne čini

Tablica 3. Rezultantne seizmičke uz $q = 1$ za slučaj elastomernih ležajeva

F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	M_x [kNm]	M_y [kNm]	M_z [kNm]
4092	4096	9551	102778	81419	209

logičnim. Zašto i u slučaju primjene elastomernih ležajeva ne dopustiti nelinearnosti i preraspodjelu sila u stupovima i rasponskom sklopu? Zahtjev za usvajanje $q = 1$ u slučaju primjene elastomernih ležajeva čini se logičnim samo za proračun pomaka te eventualno za proračun sila samo u slučaju vrlo krutih stupova. Očito je da u predmetnom slučaju, s mekom konstrukcijom mosta, proračun sila s $q = 1$ nije logičan.

4 Utjecaj krutosti elastomernih ležajeva na veličinu i raspodjelu seizmičkih sila

4.1 Utjecaj visine ležaja

Zbog racionalnosti, nameće se potreba za što manjom površinom i visinom ležaja. Potrebna minimalna površina ležaja izračunava se iz kriterija nosivosti vertikalnih i horizontalnih sila te kriterija stabilnosti (nosivosti) pri izraženim relativnim pomacima vrha i dna ležaja. Potrebna minimalna visina ležaja izračunava se iz kriterija omogućavanja ukupnih računskih pomaka sustava.

S povećanjem visine ležajeva izravno se smanjuje njihova krutost, a time i krutost čitavog mosta. To ima za posljedicu smanjenje seizmičkih sila. Pritom treba voditi računa o povećanim pomacima sustava i obvezatnoj kontroli nosivosti i stabilnosti neoprenskih ležajeva. Za zadovoljenje ovog kriterija, može biti potrebno povećati površine nekih ležajeva. To pak vodi povećanju krutosti sustava odnosno povećanju seizmičkih sila. Zapravo, nužno je provesti postupak.

Uzimajući u obzir činjenicu da se seizmičke sile smanjuju s povećanjem visine elastomernih ležajeva, u nekim slučajevima može biti korisno povećati visinu ležajeva iznad nekih stupova. To može biti uputno kad se žele smanjiti seizmičke sile u najopterećenijim stupovima, odnosno kad se želi izvršiti određena preraspodjela seizmičkih

sila u potporama. Pritom treba voditi računa o racionalnosti rješenja, uzimajući u obzir dodatne troškove za ležajeve i uštede smanjenja gradiva (beton, čelik) u stupovima i temeljima. U svakom slučaju, elastomerni ležajevi trebaju imati dostatnu nosivost i stabilnost. Ovdje su analizirana dva slučaja u odnosu prema usvojenim ležajevima prema tablici 1.:

- povećanje visine elastomernog ležaja iznad stupa S_2 na 171 mm i
- povećanje visine elastomernih ležajeva iznad svih stupova na 171 mm.

Neki se rezultati proračuna, uz $G = 1,2$ MPa, vide u tablici 4. Za slučaj da je $T_1 = 2,15$ s, i za slučaj da je $T_1 = 2,39$ s.

Tablica 4. Rezultantne seizmičke sile u ovisnosti o visini ležaja

Veza stup - rasp. sklop	F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	M_x [kNm]	M_y [kNm]	M_z [kNm]
Slučaj $T_1 = 2,15$ s	2890	2893	5206	67954	55462	137
Slučaj $T_1 = 2,39$ s	2670	2662	7394	55759	44784	72

4.2 Utjecaj modula posmika elastomernih ležajeva

Prema EC 8 [1], modul posmika tzv. normalnih elastomernih ležajeva treba uzeti prema navedenom:

$$G = 1,2 \text{ MPa za } \varepsilon_s \leq 1,2$$

$$G = 1,6 \text{ MPa za } \varepsilon_s = 2,0 \quad (1)$$

pri čemu je

$$\varepsilon_s = \frac{dE_d}{t_i} \quad (2)$$

gdje dE_d označava ukupni rezultantni seizmički pomak, a t_i ukupnu debljinu elastomera. U propektima proizvođača elastomernih ležajeva, obično se navodi da se vrijednosti modula G kreću između 1,0 i 2,0 MPa. U proračun bi trebalo uključiti i vremenski utjecaj (starenje) elastomera na veličinu modula posmika. Nažalost, podaci o reološkim svojstvima elastomera nisu dostupni.

Tablica 5. Utjecaj vrijednosti modula posmika elastomernih ležajeva na rezultantnu seizmičku silu

Rezultantne sile	G [MPa]					
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
F_x [kN]	2802	2923	3029	3123	3208	3287
F_y [kN]	2799	2926	3029	3119	3194	3259
F_z [kN]	6828	6822	6875	6820	6780	6743
M_x [kNm]	71196	73413	75175	76650	77872	78905
M_y [kNm]	58034	58156	58047	57794	57445	57033
M_z [kNm]	118	149	180	217	253	289

Ovdje je istražen utjecaj vrijednosti modula posmika elastomernih ležajeva u granicama od $G = 1,0$ MPa do $G = 2,0$ MPa. Neki rezultati proračuna prikazani su u tablicama 5. i 6.

Tablica 6. Utjecaj vrijednosti modula posmika elastomernih ležajeva na prvi period (T_1) slobodnih oscilacija mosta

Period	G [MPa]					
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
T_1 [s]	2,26	2,12	2,01	1,92	1,85	1,78

Iz priloženih se rezultata vidi da izbor vrijednosti modula posmika elastomernih ležajeva prilično utječe na veličinu i raspodjelu seizmičkih djelovanja. Pri tome se njegovim povećanjem smanjuju računski pomaci sustava, ali povećavaju seizmičke sile. Stoga se nameće zaključak da bi, radi sigurnosti proračuna, trebalo računati s vjerojatnom donjom i vjerojatnom gornjom očekivanom vrijednosti za G (prva za dobivanje maksimalnih pomaka, a druga za dobivanje maksimalnih reznih sila).

5 Zaključak

Na temelju provedenih istraživanja za most *Kličevica* na Jadranskoj autocesti, mogu se donijeti sljedeći opći zaključci, kojima se može koristiti i pri projektiranju drugih sličnih mostova:

- "Omekšavanje" spoja stupa i rasponskog sklopa vodi smanjenju seizmičkih sila, uz istovremeno povećavanje pomaka.
- Kruta veza stupova i rasponskog sklopa, u odnosu prema klasičnoj zglobnoj, ima za posljedicu nešto veće momente savijanja u stupovima od seizmičkog

djelovanja. Međutim, momenti su ravnomjernije raspoređeni i zbog veće neodređenosti sustava moguće su veće preraspodjele sila i veće rezerve nosivosti, uz manje pomake.

- Primjena elastomernih ležajeva bitno smanjuje krutost sustava, a time i seizmičke sile. Pri tome dolazi do značajnog povećanja pomaka u rasponskom sklopu.
- Pri seizmičkom proračunu mostova s elastomernim ležajevima, nužna je simulacija realne krutosti ležajeva za utjecaje uzdužnih i poprečnih sila (savijanja). Nužna je kontrola nosivosti i stabilnosti ležajeva, uzimajući u obzir njihove ukupne računске pomake i zaokrete.
- Treba posvetiti pažnju odabiru adekvatne vrijednosti modula posmika neoprenskog ležaja, jer o njoj ovisе dobiveni rezultati. Pritom se preporučuje uzimanje donje očekivane vrijednosti za proračun pomaka te gornje očekivane vrijednosti za proračun unutarnjih sila.
- U određenim slučajevima može biti ekonomski opravdano povećanje visine nekih neoprenskih ležajeva radi smanjenja seizmičkih sila, odnosno zbog smanjenja količine gradiva u određenim stupovima i temeljima mosta.
- Valja još istražiti opravdanost zahtjeva prema EC-8 [3] da pri primjeni elastomernih ležajeva uvijek treba računati s faktorom prigušenja $q = 1$ za horizontalne komponente potresa. U slučaju mekih sustava (visokih stupova), to se ne čini logičnim za proračun unutrašnjih sila jer se tada mogu dobiti veće seizmičke sile nego za zglobnu ili čak krutu vezu stup-rasponski sklop (koji dopuštaju $q \gg 1$). Takav se pristup čini opravdanim samo za proračun pomaka sustava.

IZVORI

- [1] EUROCODE 8: *Mjere i pravila za dimenzioniranje pri opterećenju potresom*, Br]ssel, 1990.
- [2] *Glavni projekt mosta Kličevica na Jadranskoj autocesti, dionica Zadar2-Benkovac*, Institut građevinarstva Hrvatske, Poslovni centar Split (T.D.A.6.9., projektant prof. dr. sc. Jure Radnić), Split, 2001.
- [3] *Izvedbeni projekt mosta Kličevica na Jadranskoj autocesti, dionica Zadar2-Benkovac*, Institut građevinarstva Hrvatske, Poslovni centar Split (T.D.A.6.9.-I, projektant prof. dr. sc. Jure Radnić), Split, 2002.
- [4] Ramberger, G.: *Structural Bearings and Expansion Joints for Bridges*, Structural Engineering Documents, IABSE-AIPC-IVBH, Zurich, Switzerland 2002.