

# PETI OPĆI SABOR HDGK

Brijunski otoci, 26.-28.04.2001.

Ž. Šimunić, Ž. Smolčić, M. Medak, J. Bleiziffer, A. Kučer, G. Janjuš

## SEIZMIČKA POUZDANOST KRČKOG MOSTA

### SAŽETAK

Krčki most projektiran je prije više od 25 godina u skladu s tadašnjim seizmičkim propisima. Ubrzo nakon izgradnje zamijećena su oštećenja oslonaačkih sklopova te je započela njihova sanacija koja do danas nije završena. Detaljno je analizirana pouzdanost konstrukcije Krčkog mosta s obzirom na suvremene seizmičke zahtjeve. Utvrđeno je da su stupovi najnepouzdaniji nosivi sklopovi mosta. Usvojena sanacija povećava globalnu pouzdanost konstrukcije mosta, ali je radi bolje raspodjele seizmičkih sila u stupovima, nužno sanaciju oslonaca idejno riješiti i izvesti na osnovi provedenih proračuna i analiza dinamičkih svojstava konstrukcije.

## RELIABILITY OF KRK BRIDGE FOR SEISMIC LOADING

### SUMMARY

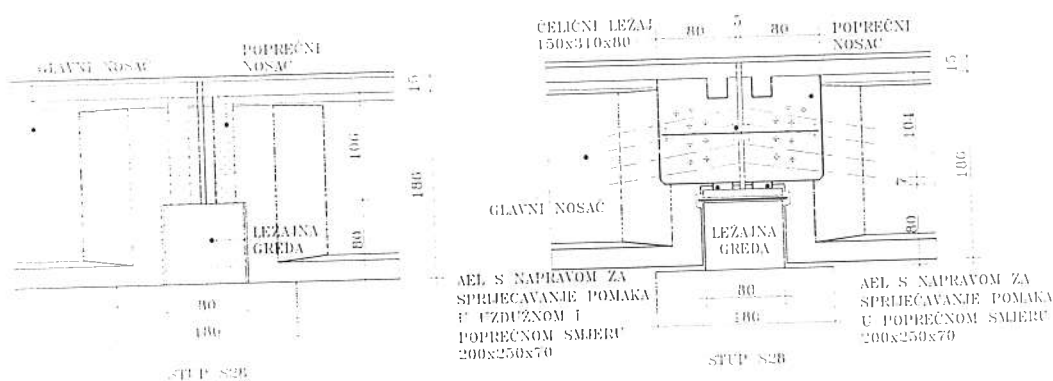
Krk Bridge was designed more than 25 years ago in accordance with seismic regulations of the time. Damages to the supports were identified and their rehabilitation began shortly after the bridge was constructed. The rehabilitation is not yet completed. The detailed reliability analysis of Krk Bridge was performed regarding the most up-to-date seismic structural design criteria. It was established that the columns are the most endangered load-bearing structures of the bridge. The rehabilitation improved the reliability of the overall structure, but a far better distribution of seismic forces in columns could be achieved by design of the bearing system based on the performed calculation and analyses of the bridge dynamic properties.

Prof. dr. Želimir Šimunić, dipl. ing. građ., Matko Medak, dipl. ing. građ., Jelena Bleiziffer, dipl. ing. građ., Anto Kučer, dipl. ing. građ., Goran Janjuš, dipl. ing. građ., Hrvatski institut za mostove i konstrukcije, Zagreb, Mr. Željko Smolčić, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka

## 1. UVOD

Krčki je most najveći u nizu velikih lučnih mostova na jadranskoj obali. Raspon luka između otoka Krka i Sv. Marka iznosi 244 m, a između Sv. Marka i kopna 390 m što je drugi po veličini raspon armiranobetonskoga lučnog mosta u svijetu. Radovi na izgradnji mosta započeli su u kolovozu 1976. godine, a most je pušten u promet u srpnju 1980. godine.

U skladu s izvornim projektom, na Krčkom je mostu izvedeno izravno oslanjanje priležajnih poprečnih nosača na ležajne grede stupova te povezivanje armaturom (Slika 1. lijevo). Ubrzo nakon puštanja u promet most je pretrpio znatna oštećenja na priležajnim mjestima, kakva do tada nisu uočena na sličnim mostovima. Na mjestima drobljenja betona na ležajnim gredama i poprečnim nosačima, počela je ubrzana korozija armature koja ubrzava razaranje betona te postupno ugrožava uporabljivost mosta. Projektom sanacije [1] predviđena je izrada novih ležajnih poprečnih nosača položenih na elastomerne ležajeve te ugradba prednapregnutih vijaka (Slika 1. desno) koji povezuju uzdužne nosače susjednih polja kako bi nadgradnja djelovala kao cjelina koja preuzima horizontalne poprečne sile (vjetar i potres). Sanacija nije izvedena do kraja pa se veliki i mali luk Krčkog mosta nalaze u različitim uvjetima oslanjanja. Na malom luku sanirano je samo jedno priležajno mjesto, dok je nesanirano devet priležajnih mjesta. Na velikom luku sanirano je četrnaest priležajnih mjesta, dok su nesanirana tri priležajna mjesta.



Slika 1. Prikaz nesaniranog (lijevo) i saniranog (desno) oslonačkog sklopa na primjeru oslanjanja na stupu S28

Na osnovi eksperimentalne i teorijske dinamičke analize koje je do sada proveo Hrvatski institut za mostove i konstrukcije [2] i [3], identificirani su dinamički najugroženiji sklopovi. Zaključeno je da su konstrukcijski sklopovi uz mali luk veoma osjetljivi te je upitna njihova pouzdanost. Osim određivanja dinamičke pouzdanosti nužna je bila procjena seizmičke pouzdanosti konstrukcije i pojedinih sklopova [3], koja se prikazuje u ovom radu.

## 2. SEIZMIČKA ANALIZA

Budući da je Krčki most projektiran prije više od 25 godina prema tada važećim seizmičkim propisima, u svrhu određivanja seizmičke pouzdanosti konstrukcije s obzirom na seizmička djelovanja definirana suvremenim propisima, proveden je seizmički proračun u skladu s EC 8. Proračun je proveden za računsko ubrzanje tla od 0.2g (seizmičko područje intenziteta VIII) i klasu tla B<sub>1</sub> (sloj izvjetrene čvrste stijene ili tlo koje se može usvojiti kao pouzdano prema mehaničkim karakteristikama). Faktor ponašanja usvojen je za elastično ponašanje  $q=1.0$ , a faktor važnosti  $\gamma_1=1.30$ . Pretpostavljeno je viskozno prigušenje od 5%. Horizontalno seizmičko gibanje modelirano je dvjema međusobno okomitim, nezavisnim komponentama predstavljenim istim spektrom odziva, dok je vertikalna komponenta seizmičkog gibanja tla modelirana spektrom odziva za horizontalno gibanje reduciranim faktorom 0.7. Vjerojatni maksimum vrijednosti efekta djelovanja S od mogućeg istovremenog seizmičkog djelovanja u smjeru osi x, y i z, određen je iz maksimalnih vrijednosti efekata djelovanja S<sub>x</sub>, S<sub>y</sub> i S<sub>z</sub> uslijed nezavisnog seizmičkog djelovanja u smjeru pojedine osi prema [4]:

$$S_x + 0.3 \cdot S_y + 0.3 \cdot S_z$$

$$0.3 \cdot S_x + S_y + 0.3 \cdot S_z$$

$$0.3 \cdot S_x + 0.3 \cdot S_y + S_z$$

Kako se za gornje kombinacije pretpostavlja i plus i minus predznak, ukupno postoje 24 kombinacije. Svako od 24 kombinacije dodan je utjecaj od vlastite težine i prednaprezanja. Za seizmički proračun velikog luka spektralnom analizom, razmatrano je prvih 150 vlastitih frekvencija konstrukcije mosta, a za mali luk prvih 100. Linearnim seizmičkim proračunom spektralnom analizom prema EC 8 određene su rezne sile u konstrukciji. Iz reznih sila određena su naprezanja, korištenjem linearnih (određena naprezanja u betonu) i nelinearnih (određena naprezanja u betonu i armaturi) radnih dijagrama za čelik i beton. Kontrola naprezanja u nosivim sklopovima mosta provedena je prema EC 2 za granično stanje uporabljivosti (granično stanje naprezanja). Rezne sile proračunane su uz koeficijent sigurnosti za opterećenje 1.0, a naprezanja uz koeficijent sigurnosti za materijal 1.0. Proračun naprezanja za linearne radne dijagrame materijala daje grubu procjenu stvarnih vrijednosti naprezanja jer vrijedi za elastičan, homogen i izotropan materijal. Za beton je primijenjen nelinearni radni dijagram u skladu s EC 2. Za čelik je usvojen trilinearan radni dijagram. Za armaturu u luku i rasponskoj konstrukciji (GA 220/340) te u stupovima (RA 400/500) usvojeno je  $\epsilon_u=5\%$  i  $\epsilon_t=10\%$ , dok je za čelik za prednaprezanje kvalitete 1500/1700 usvojeno  $\epsilon_u=3.5\%$  i  $\epsilon_t=6\%$ . U iterativnim postupcima nelinearne analize za neke nosive sklopove i pri nekim kombinacijama opterećenja, nije bilo moguće odrediti naprezanje zbog nemogućnosti uspostave ravnoteže unutarnjih i vanjskih sila za zadane nelinearne radne dijagrame materijala. U tim slučajevima, za procjenu stvarnog naprezanja korištena su naprezanja određena za linearne radne dijagrame. Proračun naprezanja proveden je na tri modela: za početno, sadašnje i buduće stanje. Model početnog stanja izrađen je prema izvedebnom projektu mosta tj. bez ugrađenih elastomernih ležajeva na osloncima. Model sadašnjeg stanja

uključuje sanaciju oslonačkih sklopova izvršenu do rujna 1998. godine, dok model budućeg stanja pretpostavlja provedenu sanaciju svih prilježajnih mjesta te postavljene elastomerne ležajeve na svim oslancima.

## 2.1. Analiza naprezanja u nosivim sklopovima

Projektom je za mali luk Krčkog mosta predviđena marka betona MB 45, a za veliki luk MB 50. Usporedbom rezultata seizmičke analize za početno, sadašnje i buduće stanje utvrđeno je da su razlike naprezanja za pojedina stanja zanemarivo male u oba luka. Najveća naprezanja u oba luka javljaju se pri petama za kombinaciju seizmičkih djelovanja s dominantnim horizontalnim poprečnim djelovanjem. Naprezanja u betonu u petama malog i velikog luka manja su od marke betona, ali se primjenom nelinearnih dijagrama naprezanja u armaturi peta malog i velikog luka javljaju naprezanja veća od granice popuštanja čelika za GA 220/340.



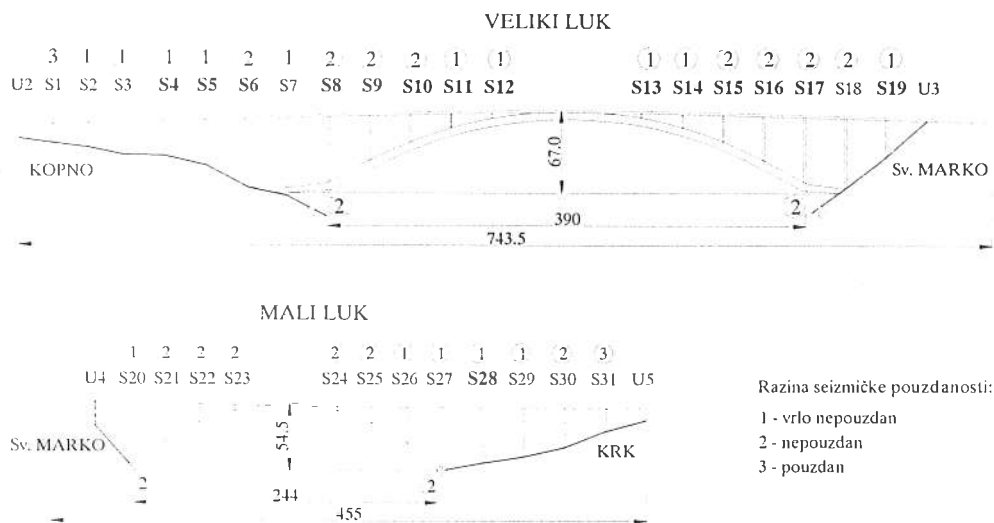
Analiza naprezanja u stupovima malog i velikog luka Krčkog mosta od seizmičkog djelovanja provedena je u podnožju stupova. Projektom je za stupove predviđena MB 35, ali je izvedbom postignuta MB 45. Za pojedine stupove i kombinacije opterećenja nije bilo moguće odrediti naprezanja za nelinearne radne dijagrame betona i čelika zbog nemogućnosti uspostavljanja ravnoteže unutarnjih i vanjskih sila, iz čega slijedi da su upravo ti stupovi najugroženiji. Za model sadašnjeg stanja to su stupovi S 20, S 26, S 27, S 28 i S 29 na malom luku te S 2, S 3, S 4, S 5, S 7, S 11, S 12, S 13, S 14 i S 19 na velikom luku. Na malom luku seizmički su najnepouzdaniji visoki vitki stupovi čiji je uzdužni i poprečni presjek prikazan na primjeru stupa S 28 (slika 2.) Također su i za većinu ostalih stupova i na malom i na velikom luku za nelinearne radne dijagrame određena naprezanja u armaturi koja premašuju granicu popuštanja čelika za RA 400/500. Za većinu stupova najveća naprezanja javljaju se za kombinaciju seizmičkog djelovanja s dominantnim horizontalnim uzdužnim djelovanjem. Za mali luk karakteristično je da ne postoji velika razlika u naprezanjima uslijed seizmičkih djelovanja za početno i sadašnje stanje. Naime, na malom luku je do sada saniran samo jedan oslonački sklop (S 28). U budućem stanju, u nekim stupovima naprezanja se smanjuju, a u nekima povećavaju. Na velikom luku Krčkog mosta, sanacija je izvršena na gotovo svim oslancima (izuzev S 1, S 2 i S 3) te je razlika između naprezanja za početno i sadašnje stanje veća. Maksimalna povećanja naprezanja u betonu (oko 30%) javljaju se na kratkim stupovima uz tjeme zbog izrade novih, krućih poprečnih prilježajnih nosača te ugradnje prednapregnutih vijaka kojima su povezani uzdužni nosači susjednih polja te ostvaren kontinuitet u progibnoj liniji rasponske konstrukcije u horizontalnoj ravnini.

Slika 2. Poprečni i uzdužni presjek stupa S 28

Seizmičke sile u **rasponskoj konstrukciji** malog luka analizirane su u rasponu P 28, a u rasponskoj konstrukciji velikog luka u rasponu P 15. Projektom je za rasponsku konstrukciju malog i velikog luka predviđena MB 40 što je i postignuto u izvedbi. Usporedbom rezultata seizmičke analize za sadašnje i buduće stanje, utvrđeno je da ne dolazi do bitnijih promjena naprezanja u rasponskoj konstrukciji Krčkog mosta. Naprezanja u betonu su daleko ispod marke betona, a u armaturi ispod granice popuštanja čelika. Najveća naprezanja u rasponskoj konstrukciji javljaju se pri kombinaciji seizmičkih djelovanja s dominantnim djelovanjem u vertikalnom smjeru.

## 2.2. Razina seizmičke pouzdanosti

Nosivi sklopovi konstrukcija velikog i malog luka Krčkog mosta razvrstani su u tri kategorije s obzirom na razinu seizmičke pouzdanosti: vrlo nepouzdan, nepouzdan i pouzdan. Nosivi sklopovi mosta kod kojih naprezanja od vlastite težine, prednaprezanja i seizmičkog djelovanja prekoračuju tlačnu čvrstoću betona ( $f_{ck}$ ), su seizmički vrlo nepouzdan sklopovi. Nosivi sklopovi u kojima naprezanja od vlastite težine, prednaprezanja i seizmičkog djelovanja prekoračuju  $0.6f_{ck}$  (granično stanje uporabljivosti) su seizmički nepouzdan sklopovi, dok su seizmički pouzdani nosivi sklopovi oni kod kojih granična naprezanja od  $0.6f_{ck}$  nisu prekoračena od opterećenja vlastitom težinom, utjecaja prednaprezanja i seizmičkog djelovanja. Shematski prikaz kategorizacije seizmičke pouzdanosti nosivih sklopova velikog i malog luka Krčkog mosta dan je na slici 3. Masnim slovima označeni su oslonci sanirani do rujna 1998. godine.



Slika 3. Razina seizmičke pouzdanost nosivih sklopova malog i velikog luka Krčkog mosta

### 3. ZAKLJUČAK

Seizmička analiza prema EC 8 pokazala je da su stupovi najugroženiji nosivi sklopovi Krčkog mosta. Od seizmičkog djelovanja na nekoliko stupova Krčkog mosta javljaju se tlačna naprezanja u betonu koja daleko premašuju tlačnu čvrstoću betona. Usporedbom rezultata seizmičke analize za početno, sadašnje i buduće stanje zaključeno je da provedbom predviđene sanacije ne nastupa smanjenje naprezanja u betonu u svim stupovima Krčkog mosta. Stoga je također provedena i seizmička analiza konstrukcije mosta oslonjene na ležajeve različite od predviđenih projektom sanacije te uz razne modifikacije uvjeta oslanjanja. Nekim od analiziranih modificiranih modela, ostvaruje se značajnije smanjenje vlastitih frekvencija modalnih oblika karakterističnih za oslonačke sklopove, odnosno produženje vlastitih perioda. Na taj način, elastomerni ležajevi djeluju kao seizmički izolatori te se smanjuju seizmičke sile na konstrukciju i povećava seizmička pouzdanost mosta. Iako usvojeni projekt sanacije oslonaca, u globalnom smislu predstavlja poboljšanje uvjeta oslanjanja, u dinamičkom ponašanju te posebno s obzirom na seizmičke zahtjeve, nije najbolje rješenje. Izborom ležajeva i rubnih uvjeta drugačijih karakteristika od projekta sanacije može se znatno poboljšati pouzdanost mosta. S obzirom da su stupovi seizmički najnepouzdaniji nosivi sklopovi Krčkog mosta i radi bolje raspodjele seizmičkih utjecaja u stupovima, nužno je sanaciju oslonaca idejno riješiti i izvesti na temelju provedenih proračuna i analiza dinamičkih svojstava konstrukcije uz daljnje praćenje stanja pouzdanosti kritičnih nosivih sklopova.

S obzirom na kritično stanje pojedinih nosivih sklopova ustanovljeno izvršenim eksperimentalnim i teorijskim istraživanjima dinamičkih osobina konstrukcije mosta i seizmičkom analizom, nužno je hitno provesti gore navedene radove kako bi se izbjegla neoptimalna sanacija, moguće havarije i znatna oštećenja mosta koji mogu prouzročiti i nenadoknadive ljudske žrtve. Hitnost vrlo složenih sanacijskih radova iziskuje uključivanje relevantnih građevinskih konstruktora u Hrvatskoj i inozemstvu pri izradi projekta sanacije, određivanju prioriteta i dinamike sanacijskih radova te davanju mišljenja o pouzdanosti građevine i smjernica za daljnje održavanje.

### 4. LITERATURA

- [1] Z. Marić, B. Možina: Popravak prilježajnih mjesta nadgradnje mosta kopno – otok Krk, Ceste i mostovi 36 (1990) 5-6, 189.-191.
- [2] Ž. Šimunić, B. Pavlović, M. Medak, A. Kučer, J. Bleiziffer: Dinamička analiza Krčkog mosta – Veliki i mali luk, Hrvatski institut za mostove i konstrukcije, Zagreb, 2000.
- [3] Ž. Šimunić, B. Pavlović, M. Medak, D. Šimunić: Dinamičko ispitivanje i analiza Krčkog mosta sa svrhom utvrđivanja sanacije za 1998. godinu – Veliki i mali luk, Hrvatski institut za mostove i konstrukcije, Zagreb, 1999.
- [4] Eurocode 8 – Design provisions for earthquake resistance of structures – Part 2: Bridges, CEN, 1994