

Dinamičko ispitivanje pješačkog mosta nakon sprovedene sanacije

Post - repair dynamic investigation of a pedestrian bridge

Autori: prof dr Lj. Vlajić, doc. doc dr N. Djuranović i mr. Duško Lučić

Rezime

Ovim člankom opisuje se dinamičko ispitivanje pješačkog mosta raspona 13.0+78.0+13.0 m sprovedeno nakon sanacije i ojačanja objekta. Most premašava 60 m (niske vode) duboki kanjon rijeke Morače i nalazi u samom centru Podgorice. Dinamička ispitivanja obuhvatila su utvrđivanja amplituda dinamičkih pomjeranja i sopstvenih učestanosti konstrukcije za oscilovanje u tri pravca; utvrđivanje koeficijentat prigušenja i stvarne vrijednosti dinamičkog koeficijenta uvećanja.

Ispitivanjem je utvrđeno da sanacione mjere i ojačanja mosta nijesu doprinijele da vrijednosti sopstvenih učestanosti vibracija konstrukcije izađu van nedozvoljenog opsega koji je propisan trenutno važećim propisima za pješačke mostove, što je i bio glavni razlog preduzimanja mjera sanacije.

Ključne riječi:

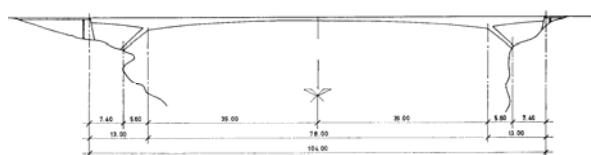
Dinamičko ispitivanje, pješački most, ojačanje, čelik

Dynamic testing, Pedestrian bridge, Strengthening, Steel

UVOD

Most koji je ispitivan služi za pješački saobraćaj, a preko njega su prevodene kolektorske cijevi za otpadne vode sa jedne na drugu obalu Morače.

Čelični glavni nosač mosta je sistema kosog podupirala, sandučastog poprečnog presjeka. Otvori mosta su 13.0+78.0+13.0 m. Kose "noge" konstrukcije vezane su za betonske fundamente sa pretpostavkom punog uklještenja na mjestu oslanjanja. Krajnja ležišta horizontalne noseće grede izvedena su kao pokretna, ali tako da omogućavaju prijem izraženih negativnih reakcija.



SLIKA 1: dispozicija mosta

Poprečni presjek konstrukcije je sandučast, trapezastog oblika sa konstantnom širinom gornje ploče, koja iznosi 3,0 m. Pošto su bočne strane sanduka pod istim uglom, a intrados mosta je kvadratna parabola, donja ploča je promjenljive širine.

Visina sandučastog poprečnog presjeka u sredini mosta i na njegovim krajevima iznosi 140cm, a na mjestu spajanja sa kosim "nogama" 280 cm.

Gornja ploča sanduka ima debljinu 12 mm i ojačana je podužnim rebrima. Na taj način

kolovozna tabla formirana je kao ortogonalno anizotropna ploča.

Kosi bočni limovi takode su ukrućeni podužnim ukrućenjima koja su raspoređena na trećinama visine presjeka. Širina donje ploče glavnog nosača na mjestu krute veze sa kosim "nogama" iznosi 160 cm. Da bi se obezbijedila bočna stabilnost objekta, kose "noge" su na mjestima oslanjanja na armiranobetonske fundamente razmaknute, tako da njihovo međusobno rastojanje iznosi 3.00 m.

Osnovni razlog za sprovođenje sanacije (ojačanja) mosta je bio da se smanje naponi u kosim nogama mosta koji su bili na granici dozvoljenih vrijednosti za jednu od mogućih kombinacija opterećenja i da se u određenoj mjeri ublaži problem vibracija koje, prilikom prelaska pješaka preko mosta, izazivaju osjećaj nelagodnosti.

SANACIONO RJEŠENJE

Problem vibracija pješačkih mostova izbjegava se tako što se most projektuje da mu frekvencija nikako ne smije biti u rasponu 1,6 do 2,4 HZ a treba izbjegavati i cijeli raspon od 3,5 do 4,5 HZ (švajcarski propisi SIA 160). Po našim propisima (ref ***) da bi bili zadovoljena "funkcionalnost mosta" "sopstvene frekvencije konstrukcije pješačkog mosta bez opterećenja ne smiju se naći u opsegu od 0,8 Hz do 5,5 Hz". U vrijeme projektovanja mosta ovaj uslov u Propisima nije postojao.

Danas su dostupna najmanje tri načina eliminisanja ili ublažavanja problema vibracija pješačkih mostova. To su dodatno ojačanje (ukrućenje) mosta, povećavanje prigušenja u mostu i postavljanje (ugrađivanje u most) *absorbera vibracija*.

Ojačavanje konstrukcije treba preduzimati ako krutost mosta nije veća od 8 KN/mm (ref. ***). Povećanje prigušenja i absorpcije energije je obično najekonomičnije. Postiže se cijelim nizom mjera počev od presvlačenja pješačke staze mekim slojem asvalta, do uticanja na oslonce i ležišta kako bi se postiglo veće prigušenje. Postavljanje *absorbera vibracija* se zasniva na dodavanju konstrukciji mosta novog oscilatornog sistema (obično sistem sa jednim stepenom slobode) čiji period osnovne vibracije (prvi ton) treba da bude isti kao kod samog mosta.. Računicom se može doći do mase takvog sistema i one se obično kreće od 0,05% do 1 % mase samog pješačkog mosta. Problem kod ovog rješenja je obično potrební prostor koji treba ostaviti za vibracije dodatog oscilatornog sistema

Sanacionim rješenjem na ovom mostu je izvršeno ojačanje kosih nogu mosta čeličnim lamelama sa betoniranjem betonske ploče u donjoj lameli glavnog nosača u dužini od 5.20 m lijevo i desno od mjesta uključenja kosih nogu u glavni nosač.

ISPITIVANJE MOSTA

Osnovni cilj i svrha ovog ispitivanja sastojao se u sljedećem:

- Utvrđivanje ponašanja objekta u realnim uslovima;
- Utvrđivanje napona i deformacija, kao i veličina koje karakterišu dinamičko ponašanje sistema;
- Utvrđivanje i verifikacija računskog modela konstrukcije;
- Donošenje pouzdanih i eksplicitnih zaključaka o eksploatacionoj upotrebljivosti mosta i
- Predlog za način održavanja mosta ili način eventualnih intervencija.

U okviru statičkog ispitivanja konstrukcije mosta izvršeno je registrovanje opštih i lokalnih deformacija (ref. *****). Statička ispitivanja mosta na ovom mjestu neće biti detaljnije razmatrana.

Po Jugoslovenskim propisima za ispitivanje mostova svih namjena, prilikom dinamičkog ispitivanja obavezno je mjerenje vertikalnih ugiba u sredini izabраних raspona u toku prelaska tereta

kao i mjerenje brzine kojom teret prolazi preko mosta.

Eventualno se moraju se izvršiti i sljedeća dopunska mjerenja:

- mjerenje deformacija na mjestima očekivanih ekstremnih uticaja,
- mjerenje poprečnih i podužnih pomjeranja u sredini izabраних raspona.
- mjerenja ostalih dinamičkih karakteristika konstrukcije.

Most se smatra da zadovoljava kriterijume dinamičkog ispitivanja ako mu se izmjerene periode slobodnih oscilacija $t_{o,izm}$ nalaze u granicama teorijskih vrijednosti $t_{o,rač}$, to jest ako su približno iste

$$t_{o,izm} \approx t_{o,rač}$$

Sledeći uslov je da se dinamički koeficijent $K_{d,izm}$ (određen iz rezultata ispitivanja) kreće u granicama onog predviđenog projektom same konstrukcije mosta, $K_{d,pred}$

$$K_{d,izm} \approx K_{d,rač}$$

Najznačajniji kriterijumom sa stanovišta dinamičkih ispitivanja ovog mosta traži se da vibracije mosta ne stvaraju kod korisnika osjećaj neugodnosti (pojave podrhtavanja, rezonance, određenog odnosa amplitude i frekvencije koji izaziva osjećaj neugodnosti), drugim riječima da izmjerene brzine i akceleracije nisu takve da stvaraju kod pješaka ma mostu osjećaj neugodnosti

U principu, dovoljno je da samo jedan od navedenih kriterijuma nije zadovoljen pa da se za konstrukciju kaže da ne ispunjava kriterijume kvaliteta za tehnički ispravnu konstrukciju.

Dinamičkim ispitivanjem na ovom mostu obuhvaćeno je registrovanje sledećih parametara:

- Amplituda pomjeranja u vertikalnom, horizontalnom-poprečnom i horizontalnom-podužnom pravcu;
- Sopstvenih učestanosti konstrukcije za oscilovanje u tri naprijed pomenuta ortogonalna pravca;
- Koeficijent prigušenja i
- Stvarnih vrijednosti dinamičkog koeficijenta.

Amplitude pomjeranja, vrijednosti sopstvenih učestanosti i koeficijenti prigušenja registrovani u sredini i oko četvrtine raspona mosta. Ove veličine registrovane su simultano u tri ortogonalna pravca, tako da se u svakom trenutku može da odredi vektor pomjeranja.

Stvarna vrijednost dinamičkog koeficijenta registrovana je u presjeku u sredini raspona konstrukcije.

Statičko probno opterećenje izvršeno je pomoću 4 (četiri) teretna vozila marke FAP, pojedinačne mase od oko 9.0 t (prilog 2).

Teretna vozila tokom statičkog ispitivanja bila su raspoređivana po fazama tako, da se u karakterističnim presjecima konstrukcije i mjernim mjestima izazovu približno ekstremni uticaji.



SLIKA 1: Položaj probnog opterećenja u toku ispitivanja konstrukcije



Maksimalna vrijednost pozitivnog momenta savijanja izazvana je u sredini raspona konstrukcije i iznosi: $M_{isp} = 1732,10 \text{ kNm}$. Kako odgovarajuća vrijednost usljed računskog projektovanog opterećenja od $p=5.0 \text{ kN/m}^2$ iznosi: $p M_{rač} = 2880 \text{ kNm}$, to "koeficijent efikasnosti" ("k") iznosi 61,18%.

Saglasno važećem JUS-UM1-046 taj koeficijent treba da bude $0.5 < k < 1.0$.

Dinamičko ispitivanje izvršeno je za sledeće uticaje:

- Kretanja jednog teretnog vozila po mostu;
- Vještački izazvanog efekta udara pri kretanju jednog teretnog vozila po mostu;
- Kočenja jednog teretnog vozila (horizontalna podužna pobuda);
- Vertikalne pobude (kretanje jednog i više pješaka);
- Horizontalne poprečne pobude;
- Ambijentalnih vibracija (blagi uticaj vjetra) i
- Normalne eksploatacije, u uslovima intenzivnog pješačkog saobraćaja.

Efekat udara je izazvan tako što se kamionom prešlo preko izbočenja (prepreke) na putu. Prepreka je bila drvena daska, visoka oko 5 cm.

Horizontalna poprečna pobuda izazvane su otpuštanjem zategnute čelične sajle pričvršćene za most, pomoću koje je most bio izveden iz ravnotežnog položaja u ova dva pravca.

Za zapisivanje dinamičkih efekata vibriranja konstrukcije mosta korišćeni su portabl mjerači vibracija *Vibration measuring unit - SMU 31*, proizvod firme HBM, Germany. Ovi uređaji mjere amplitude vibracija, brzine i ubrzanja. Uređaj se sastoji od sonde i indikatorske jedinice. Sonda u sebi ima ugrađen oscilatorni sistem masa - opruga koji daje signal proporcionalan brzini vibriranja testirane konstrukcije. U cilju dobijanja amplitude pomjeranja takav signal se automatski (u samoj indikatorskoj jedinici) integriše, a za dobijanje ubrzanja konstrukcije signal se na isti način diferencira. Indikatorska jedinica takođe omogućava povezivanje uređaja sa AD konverterom odakle se digitalizovani signal šalje u personalni kompjuter na daljnju obradu. Proces dobijanja (određivanja) frekvencija oscilovanja je dalje automatizovan upotrebom "in house" softvera, koji primjenjuje Furijevu analizu signala za određivanje dominantnih frekvencija.

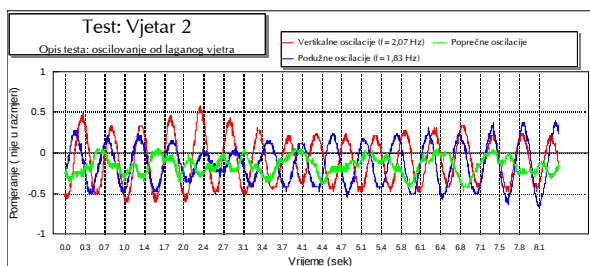
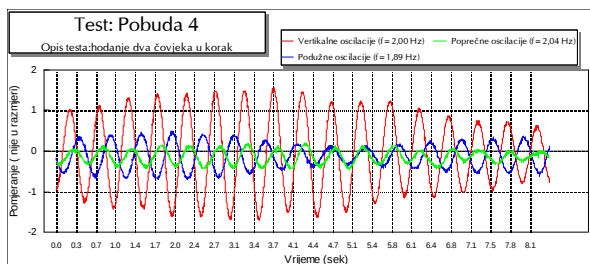
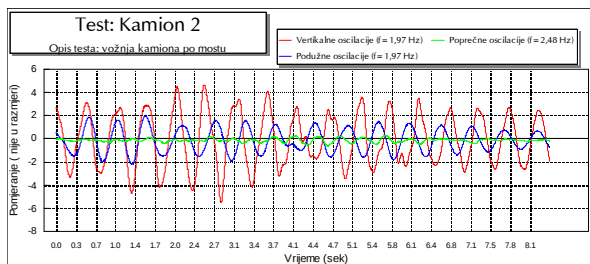
U toku testiranja sonda je pomoću izolir - trake bila fizički spojena sa konstrukcijom.

Cio postupak ispitivanja je, vjerovatno i zbog "konstruktivne jasnoće" konstrukcije, dao veoma kvalitetne rezultate.

REZULTATI I ANALIZA ISPITIVANJA

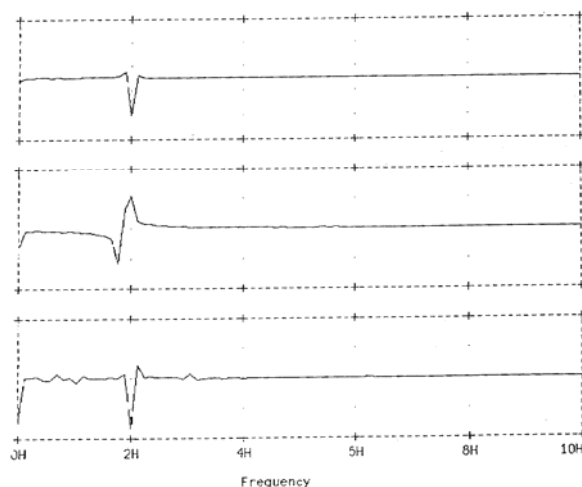
Dijagrami dinamičkih uticaja za karakteristične faze ispitivanja prikazani su na narednim dijagramima.

Za sve prikazane rezultate mjerni uređaji su bili raspoređeni na sredini mosta, i to tako da registruju vertikalne, horizontalne poprečne i horizontalne podužne vibracije.



Slika 2 - Dijagrami vrijeme - pomjeranja korišćeni za određivanje frekvencija oscilovanja konstrukcije

Za svaki ispitivane slučajeve dinamičkog opterećivanja posmatranog pješačkog mosta izvršena je Furijeova analiza zapisanog signala, uz pomoć koje su određene frekvencije oscilovanja konstrukcije.



Slika **** - Tipični rezultat Furijeove analize signala sa tri mjerna mjesta

Vrijednosti sopstvenih učestanosti oscilovanja konstrukcije u vertikalnoj ravni iznose

$$f_{0,mer} = 2.0 \text{ Hz}$$

Odgovarajuća računaska vrijednost iznosi

$$f_{0,rac} = 1.92 \text{ Hz}$$

Ovdje se posebno naglašava da se ove vrijednosti odnose na oscilovanje konstrukcije u prvom osnovnom, u ovom slučaju simetričnom tonu, što je potvrđeno dijagramima datim u prilogu 5-05.

Na osnovu analize frekventne jednačine dovoljno tačno utvrđen je odnos:

$$\sqrt{\frac{\max \delta_{rac}}{\max \delta_{mjer}}} = \frac{f_{0,mjer}}{f_{0,rac}}$$

$$\text{kako je } \sqrt{\frac{\max \delta_{rac}}{\max \delta_{mjer}}} = \sqrt{\frac{47.5}{42.7}} = 1.0547,$$

sljedi da $f_{0,mer}$ treba da iznosi 2,02 Hz, što potvrđuje izuzetnu tačnost mjerenja.

Maksimalna vrijednost dinamičkog koeficijenta $K_{d,max}$ registrovana pri efektu vještački izazvanog udara prelaskom jednog vozila preko prepreke ($h=5 \text{ cm}$) iznosi:

$$K_{d,max} = 1.23$$

Vrijednosti koeficijenta prigušenja nijesu mogle pouzdano da se odrede pošto se konstrukcija veoma sporo prigušuje što ukazuje na okolnost da je logaritamski dekrement jako nizak.

ZAKLJUČCI

- 7.1. Konstrukcija mosta ispitana je u svemu prema važećim propisima JUS-UM1-046/1984.
- 7.3. Računski model konstrukcije koji je korišćen prilikom izrade projekta je u potpunosti verifikovan. On potpuno vjerno opisuje stvarno ponašanje konstrukcije pri dejstvu dinamičkog opterećenja.
- 7.4. Preduzetim sanacionim mjerama postignut je, u nekim presjecima, efekat smanjenja napona, ali samo od pokretnog opterećenja. Naponi od sopstvene težine, stalnog tereta, montaže, pa i od dodatnog tereta (betona i čeličnih sanacionih limova) ostaju kao rezidualni u konstrukciji prije sanacije. Ukupni naponi od

svih uticaja su u pojedinim presjecima neznatno smanjeni, tako da su efekti sanacije u ovom smislu zanemarljivi.

- 7.5. Preduzete sanacione mjere i dogradnja objekta nijesu doprinijele da vrijednosti sopstvenih učestanosti vibracija konstrukcije izađu van nedozvoljenog opsega koji je propisan trenutno važećim propisima za pješačke mostove. Vrijednosti sopstvenih učestanosti vibracija konstrukcije za oscilovanje u prvom osnovnom tonu (u vertikalnoj ravni) i prije i poslije sanacionih mjera iznosile su, a i sada iznose

$${}_{\text{stv}}f_0 = 2.0 \text{ Hz}$$

Ovdje se posebno napominje da za pješačke mostove trenutno važeći propisi ne dozvoljavaju da se ta vrijednost nalazi u opsegu između 0.8 i 5.5 Hz.

- 7.6. Konstrukcija mosta može da primi i prenese računsko propisano opterećenje. Njena lokalna i globalna stabilnost pod dejstvom računskog opterećenja nije ugrožena.
- 7.6. Konstrukcija mosta može da se pusti u normalnu eksploataciju, uz napomenu da će se pješaci prilikom prelaska preko mosta, zbog velikih amplituda oscilovanja

od 1.7 mm, niskih vrijednosti sopstvenih učestanosti od 2.0 Hz i malog koeficijenta prigušenja, osjećati veoma neprijatno. Najveće vrijednosti amplituda oscilovanja javljaju se pri prelasku malog broja pješaka (1, 2, 3) zbog toga što tada ne postoje efekti prigušenja koji se pojavljuju kada preko objekta prelazi veći broj ljudi.

REFERENCE

1. Ispitivanje mostova probnim opterećenjima, JUS U.M1.046/84, Službeni list SFRJ 60/84, Beograd
2. Izvještaj o ispitivanju čeličnog mosta Gazela preko rijeke Morače u Podgorici pod uticajem statičkog i dinamičkog probnog opterećenja, Građevinski fakultet, Podgorica, 1998
3. Projekat pješačkog mosta Gazela, MIN Niš, 1969
4. Izvještaj o ispitivanju mosta Gazela, Institut za ispitivanje materijala SRS, 1970.
5. Pravilnik o tehničkim normativima za određivanje veličine opterećenja mostova, Službeni list SFRJ broj 1/91, Beograd 1991
6. Vibration problems in structures - Practical Guidelines, grupa autora, izdavač: Birkhauser Verlag, Basel, 1995.
7. Vibration Measuring Unit (to DIN 45666 and DIN 45669 - FANAK) - Operating manual, HBM, Germany.