

O rješavanju problema vibracija kod postojećih pješačkih mostova

Nebojša Đuranović

Građevinski fakultet, Univerzitet Crne Gore

REZIME

U ovom članku opisana su tri, po današnjim saznanjima najefikasnija načina rješavanja problema vibracija kod pješačkih mostova čije vibracione karakteristike ne zadovoljavaju uslove upotrebljivosti propisane kako domaćim tako ni stranim propisima. Ti načini su dodatno ojačanje (ukrućenje) mosta, povećavanje prigušenja u mostu i postavljanje (ugrađivanje u most) absorbera vibracija. Izvršeno ispitivanje jednog pješačkog mosta u Podgorici je poslužilo kao primjer gdje sanacione mjere i ojačanja mosta koji nisu poštovali predložene načine rješavanja problema vibracija mosta, nijesu doprinijele da vrijednosti sopstvenih frekvencija konstrukcije izadu van nedozvoljenog opsega.

KLJUČNE RIJEČI: pješački mostovi, vibracije, sanacija, absorber vibracija

About solving vibrations in pedestrian bridges

ABSTRACT

This paper describes three, according to current knowledge, the most effective ways for solving the problems of vibration of footbridges, whose vibration characteristics do not satisfy serviceability conditions defined in domestic as well as foreign regulation. Those are additional strengthening of the bridge, increase of vibration dumping and inclusion of vibration absorbers. Recent investigation on an footbridge in Podgorica served as an exempla, where rehabilitation measures including strengthening of the bridge, which were not carried out in accordance to those three conditions, did not help in changing the natural frequency of the structure.

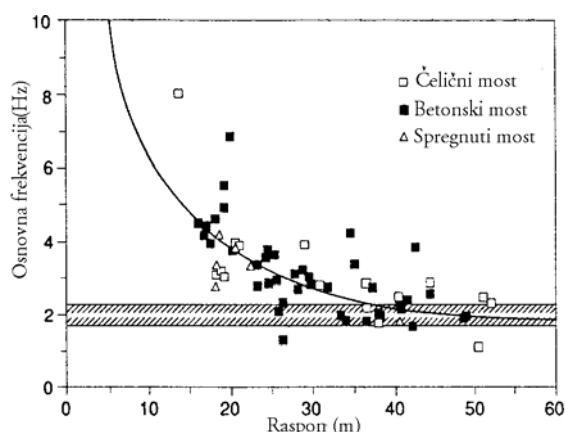
KEYWORDS: footbridge, vibrations, reconstruction, vibration absorber

UVOD

Pješački mostovi su konstrukcije kod kojih problemi vibracija tj. graničnog stanja upotrebljivosti po vibracijama mogu biti veoma izraženi. Našim propisima¹ je zahtijevano da, 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". Ovaj uslov je veoma jasan i proizilazi iz iskustva brojnih izgrađenih pješačkih mostova, kod kojih je primijećeno da su

mostovi koji imaju frekvencije u ovom rasponu veoma neprijatni za upotrebu. Ti problemi upotrebljivosti, izraženi kroz nelagodnosti kod korisnika mosta, su uglavnom psihološke prirode (neprijatnost od "luljanja" mosta), ali mogu postati i problemi nosivosti kada se zna da se ljudski hod - koračanje - obično nalazi na frekvenciji 1,6 do 2,4 Hz. Po stranim propisima i iskustvima 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 160²).

Stvarni problemi nastaju kada se uvidi činjenica da je, bez obzira na primijenjene konstruktivne mjere, određeni pješački most - sa praktično zadatim rasponom (prelaz preko rijeke, raskrsnica, uvala i t. sl.), veoma teško projektovati da mu frekvencija izađe iz propisima zabranjenih granica, upravo jer je raspon glavni faktor od koga zavisi frekvencija. U tom smislu korisno je pogledati sliku 1 (ref. ³), koja prikazuje vezu osnovne frekvencije 67 pješačkih mostova iz cijelog svijeta i njihovih raspona, sa koje se jasno vidi zašto je u principu teško izaći iz propisima zadatih granica za frekvenciju osnovnog tona. Šrafurom je, kao posebno osjetljiva, označena oblast frekvencije ljudskog hoda, dok crna linija predstavlja statistički dobijenu vezu frekvencije osnovnog tona f_1 i raspona mosta L , datu kroz izraz: $f_1 = 33.6 \times L^{-0.73}$. Jasno je da se granica od 5,4 Hz teško izbjegava bez obzira na materijal od koga je izrađen objekat ili primijenjeni konstruktivni sistem.



Slika 1 Zavisnost frekvencije i raspona testiranih mostova
Figure 1. Frequency vs. span of tested bridges

Problem upotrebljivosti takvih mostova se danas rješava uvođenjem u razmatranje dodatnog faktora - ostvarenih ubrzanja mosta. Kombinacijom frekvencije oscilovanja i ostvarenih ubrzanja mosta - prvenstveno u vezi sa dinamičkim prigušenjem u mostu i krutošću mosta, mogu se za most "izabrati" ubrzanja koja se, u kombinaciji sa datom frekvencijom, manje "osjećaju", pa će i kriterijum upotrebljivosti biti posrednim putem zadovoljen. O ovoj situaciji i rješenjima više nekom drugom prilikom.

U ovom članku će se više analizirati druga moguća situacija sretanja sa problemom vibracija kod pješačkih mostova, tj. situacija kada se projektant nađe pred sanacijom ili rekonstrukcijom pješačkog mosta koji je projektovan i izveden u vrijeme kada ova ograničenja frekvencija nisu ni postojala, kako u našim tako ni u stranim propisima⁴, a kada se od njega traži da riješi

"ljuljanje" mosta. Inače, većina starijih pješačkih mostova ima osnovnu frekvenciju unutar "zabranjene" oblasti frekvencija.

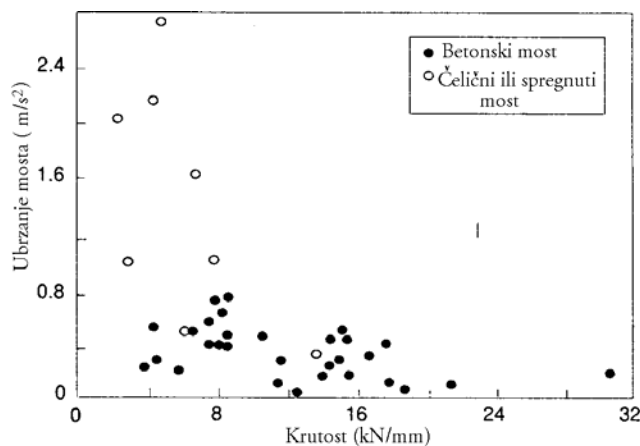
RJEŠAVANJE PROBLEMA VIBRACIJA KOD IZGRAĐENIH PJEŠAČKIH MOSTOVA

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

Ojačavanje konstrukcije izgrađenog pješačkog mosta treba preduzimati ako krutost mosta nije veća od 8 kN/mm. Pod pojmom krutost pješačkog mosta ovdje se podrazumijeva količnik sile nanesene u posmatranoj tački mosta i ostvarenog ugiba za tu istu tačku. Putem ovog ojačanja kroz povećavanje krutosti praktično se dolazi u situaciju da se umjesto direktne kontrole frekvencije kontroliše ostvareno ubrzanje mosta. Pri tome u obzir se uzimaju gornje granice dopuštenih ubrzanja (pri određenim frekvencijama osnovnog tona f_1) koje ne utiču na čovječiji organizam, tj. ne izazivaju neprijatan osjećaj kod pješaka prilikom prelaska mosta. Te najveće vrijednosti ubrzanja koje kod korisnika ne izazivaju nelagodnost, $max a$, su date u britanskim⁵ i kanadskim propisima⁶ za mostove i imaju vrijednosti:

$$max a = 0,5 \times f_1^{0,5} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad \text{tj.} \quad max a = 0,25 \times f_1^{0,78} \text{ [m/s}^2\text{]}$$

respektivno. Na za mostove najosjetljivijoj frekvenciji (frekvenciji ljudskog hoda od 2 Hz) ove formule daju ograničenja ubrzanja od 0,7 tj 0,43 [m/s²]. Do granice krutosti od 8 kN/mm se došlo uz pomoć vrijednosti očitanih sa dijagrama veze krutosti i izmjerenih ubrzanja mosta, slika 2, pri čemu je kao gornja granica ubrzanja usvojena vrijednost od 0,7 [m/s²].



Slika 2. Veza krutosti i ubrzanja za ispitivane mostove
Figure 2. Stiffness vs. acceleration diagram for tested bridges

Sa ove slike, koja predstavlja sintezu eksperimentalnih rezultata sa brojnih pješačkih mostova, očito je da svako daljnje povećanje krutosti dovodi do smanjenja ubrzanja mosta, tj. do manjih nelagodnosti za korisnike, pri istoj frekvenciji mosta. Osnovni nedostatak ovog pristupa je da će praktična rješenja obično biti veoma skupa za sprovođenje.

Povećanje prigušenja i absorpcije energije, ponovo u cilju smanjenja ostvarenih ubrzanja mosta, je obično najekonomičnije rješenje kojim se kod korisnika mosta izbjegava stvaranje utiska nelagodnosti zbog ljuljanja mosta. Ono se postiže se cijelim nizom mjera, počev od presvlačenja pješačke staze slojem "mekog" asfalta, do uticanja na oslonce i ležišta kako bi se postiglo veće prigušenje. Ovo rješenje obično nije veoma praktično i najčešće se upotrebljava u kombinaciji sa nekim drugim rješenjem.

Postavljenje **absorbera vibracija** se zasniva na dodavanju konstrukciji mosta novog oscilatornog sistema (obično sistema sa jednim stepenom slobode) čiji period osnovne vibracije (prvi ton) treba da bude isti kao kod samog mosta. Princip njegovog rada je korišćenje kombinovanja oscilacija dva oscilatorna sistema u cilju "umirenja" tj. smanjenja ubrzanja i amplituda samog mosta. Računom se može doći do mase takvog amortizacionog sistema m_a i one se obično kreće od 0,05% do 1 % mase samog pješačkog mosta m_m . Pri tome optimalna frekvencija absorbera vibracija f_a zavisi i od frekvencije mosta f_m i dobija se kao:

$$f_a = \frac{f_m}{1 + \frac{m_a}{m_m}}$$

Za ovako sračunatu potrebnu frekvenciju absorbera f_a i usvojenu masu absorbera m_a iz izraza:

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_a}{m_a}}$$

može se odrediti potrebna krutost k_a opruge absorbera.

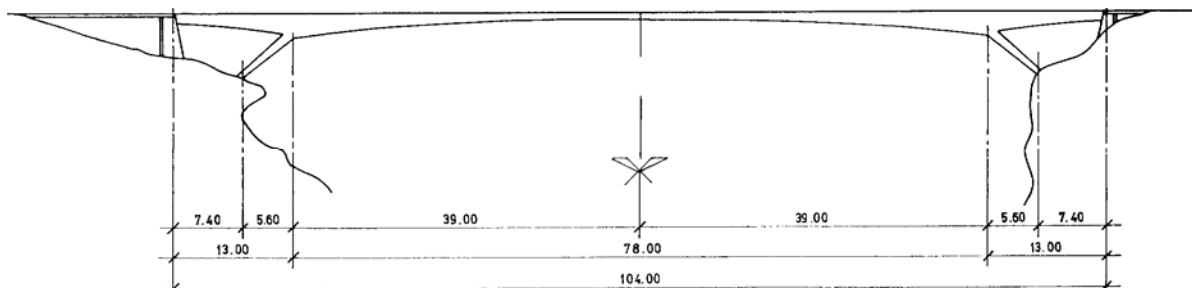
Na ovaj način amplitude odgovora mosta se značajno umanjuju, pri čemu se mora obratiti pažnja na činjenicu da absorber vibracija poboljšava ponašanje mosta jedino na svojoj optimalnoj frekvenciji, dok na ostale frekvencije mosta utiče u zanemarljivom iznosu. Ovaj pristup ima prednost jeftinog rješenja, ali mu je uobičajeni problem ne samo projektovanje absorbera sa velikim hodom mase, već i obezbjeđenje potrebnog prostora koji treba ostaviti za vibracije tog dodatog oscilatornog sistema.

ISPITIVANJE MOSTA

Kao primjer na kome su se mogla provjeriti predhodna rješenja koristiće se nedavna sanacija i ispitivanje jednog mosta u Podgorici⁷, sprovedeno u skladu sa našim propisima⁸. Most koji je ispitivan prvenstveno služi za pješački saobraćaj preko rijeke Morače, slika 3. Čelični glavni nosač mosta je sistema kosog podupirala, sandučastog poprečnog presjeka. Otvori mosta su 13.0+78.0+13.0 m.

Osnovni razlog za sprovođenje sanacije je potreba da se smanje naponi u kosim nogama mosta koji su bili na granici dozvoljenih vrijednosti i, što je sa stanovišta ovog članka posebno interesantno, da se u određenoj mjeri ublaži problem vibracija koje, prilikom prelaska pješaka preko mosta, izazivaju osjećaj nelagodnosti.

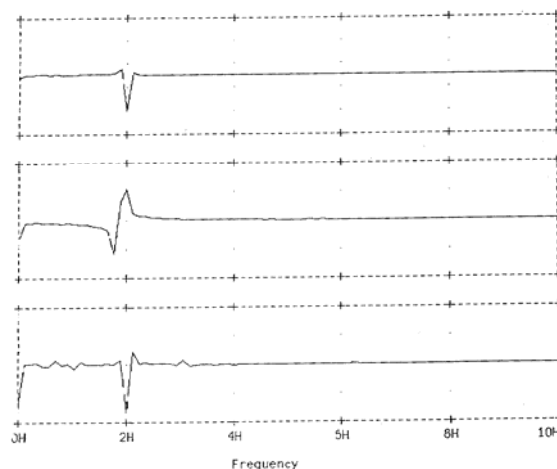
Sanaciono rješenje je obuhvatilo ojačanje kosih nogu mosta čeličnim lamelama, sa betoniranjem betonske ploče u donjoj lameli glavnog nosača u dužini od 5.20 m lijevo i desno od mjesta uključenja kosih nogu u glavni nosač.



Slika 3. Dispozicija mosta
Figure 3. Disposition of the bridge

Najrelevantniji kriterijumom sa stanovišta dinamičke provjere ovog mosta, po našim propisima, traži da vibracije mosta ne stvaraju kod korisnika osjećaj neugodnosti, izraženo kroz pojavu podrhtavanja mosta, rezonance i određenog odnosa amplitude, ubrzanja i frekvencije.

Za svaki ispitivani slučajev dinamičkog opterećivanja posmatranog pješačkog mosta izvršena je Furijeova analiza zapisanog signala, koja je dala frekvencije oscilovanja konstrukcije, slika 4.



Slika 4 - Tipični rezultat Furijeove analiza signala sa tri mjerna mjesta
Figure 4. Typical results of the Fourier analysis of the signal

Osnovni zahtjev zbog koga je i vršena sanacija, tj. smanjenje napona u kosim nogama mosta je ostvaren. Pri tome krutost mosta nakon sanacije je ostala znatno ispod 8 KN/mm. Međutim, vrijednost sopstvene frekvencije oscilovanja konstrukcije u vertikalnoj ravni nakon sanacije iznosi $f_1 = 2.0 \text{ Hz}$. Ovdje se posebno naglašava da se ova vrijednost odnosi na oscilovanje konstrukcije u osnovnom, u ovom slučaju simetričnom tonu. Kao što se vidi, i nakon preduzetih ojačanja, frekvencije oscilovanja su i dalje u najnepovoljnijem području to jest oko 2 Hz, pa drugi zahtjev zbog koga je sprovedena sanacija nije postignut tj. pješaci i dalje osjećaju znatno ljuljanje mosta prilikom njegove upotrebe. Interesantno je prokomentarisati

eventualni daljnji pokušaj "umirivanja" mosta postavljanjem *absorbera vibracija*. Da bi se to postiglo, potrebno je postaviti dodatnu masu od, recimo, $m_a = 200 \text{ kg}$, koja bi za konstrukciju mosta bila pričvršćena oprugom potrebne krutosti $k_a = 31,2 \text{ KN/mm}$.

ZAKLJUČCI

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 . 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 potrebni prostor koji treba ostaviti za vibracije dodatog oscilatornog sistema, kao i zahtijevana krutost opruga.

Na primjeru ispitivanog mosta vidi se da preduzete sanacione mjere, koje nisu ispunile niti jedan od preporučenih načina ublažavanja problema vibracija, nijesu doprinijele da vrijednosti sopstvenih učestanosti vibracija konstrukcije izađu van nedozvoljenog opsega koji je propisan trenutno važećim propisima za pješačke mostove. Pri tome krutost mosta je ostala znatno ispod 8 KN/mm . Daljnje ublažavanje problema vibracija mosta moguće je postići postavljanjem pravilno konstruisanog absorbera vibracija.

REFERENCE

- ¹ "Pravilnik o tehničkim normativima za određivanje veličine opterećenja mostova", Službeni list SFRJ broj 1/91, Beograd 1991
- ² SIA 160 "Actions on structures", (Opterećenja na konstrukcijama) Schweizer Ingenieur - und Architekten - Verein, Zurich, 1989.
- ³ "Vibration problems in structures - Practical Guidelines", grupa autora, izdavač: Birkhauser Verlag, Basel, 1995
- ⁴ "Izveštaj o ispitivanju veličinog mosta Gazela preko rijeke Morače u Podgorici pod uticajem statičkog i dinamičnog probnog opterećenja", Građevinski fakultet, Podgorica, 1998.
- ⁵ "Steel, Concrete and Composite Bridges: Specification for Loads", British Standard BS 5400, Part 2, Appendix C, London 1978.
- ⁶ ONT 83, Ontario Highway Bridge Design Code, Ontario Ministry of Transportation, Toronto, Kanada, 1983.
- ⁷ Lj. Vlajić, N. Vuranović, D. Lučić: "Post - Repair Dynamic Investigation of a pedestrian bridge", Zbornik radova sa "World Engineering Congress - Industrialised Building Systems and Structural Engineering," Kuala Lumpur, Malaysia, 19 - 22 jul 1999.
- ⁸ "Ispitivanje mostova probnim opterećenjima", JUS U.M1.046/84, Službeni list SFRJ 60/84, Beograd.