

ISPITIVANJE DRUMSKOG MOSTA PREKO RIJEKE LIM PROBNIM OPTEREĆENJEM

docent dr. Nebojša Đuranović, dipl. građ.ing.
Građevinski fakultet, Pogorica, Crna Gora

Rezime

Novi drumski most preko rijeke Lim nalazi se u centru Murina, na putnom pravcu Murino - Čakor - Peć. Rasponska konstrukcija sastoji se od četiri montažna, potpuno predhodno napregnuta "I" glavna nosača, visine 2.0 m, monolitizovana AB pločom debljine $d_p=20$ cm. Izvršeno statičko i dinamičko probno opterećenje, prema svojoj efikasnosti, spadalo je u normalne saobraćajne terete. Analizirani su sljedeći parametri ponašanja konstrukcije: dilatacije u betonu u donjoj i gornjoj flanši, sa lijeve i desne strane rebra, u polovini raspona uzvodnog ivičnog kao i srednjeg glavnog nosača; vertikalni ugibi srednjeg i ivičnog glavnog nosača, kao i u osovini mosta; i dinamičke karakteristike konstrukcije (slobodne i prinudne vibracije i dinamički koeficijent).

Ključne riječi

drumski most, statičko i dinamičko ispitivanje

Abstract

A new road bridge across river Lim in the center of town Murina is located on the main road Murino - Čakor - Peć. Its structure consists of four prefabricated, fully prestressed I girders, of 2.0 m height. They have been stiffened by the concrete slab $d_p=20$ cm. Applied static and dynamic proof load testing belonged to so called "normal traffic loads" category. The following parameters have been analyzed: concrete strain in the top and bottom flange, both on the left and on the right side of the web, in the center of the span of the girder that is positioned counter streamline and in the central one of the main girders; vertical deflection of the middle girder and counter streamline main side girder, and at the center line of the bridge. Dynamic characteristics, like natural and forced vibrations and dynamic (damping) factor have also been recorded..

Key words

road bridge, static and dynamic testing

1. OSNOVNE NAPOMENE

Stari drumski most koji se nalazio na ovom mjestu srušen je u bombardovanju NATO avijacije. Direkcija javnih radova finansirala je izgradnju novog mosta, kojeg je izvelo GP "Mostogradnja-inženjering". Izvođač radova GP "Mostogradnja-inženjering", u skladu sa važećim propisima iz ove oblasti, angažovalo je Građevinski fakultet u Podgorici, da ispitivanjem objekta probnim opterećenjem izvrši procjenu podobnosti mosta da prihvata projektovana opterećenja [1].

Novosagrađeni most, prema idejnom projektu Žarka Živkovića, dipl. inž. građ. i Igora Đuranovića, dipl. inž. građ., projektovao je projektni biro GP "Mostogradnja". Most je sistema proste grede, raspona 35m. Niveleta mosta je horizontalna, a poprečni nagib iznosi 2.5%. Osovinsko rastojanje glavnih nosača je 2.25 m. Glavni nosači su nad osloncima međusobno povezani poprečnim nosačima, širine 0.30m i visine 1.80m, slika 1. Na oba obalna stuba rasponska konstrukcija oslanja se preko nepokretnih neoprenskih ležišta. Slobodni profil mosta

čine kolovozna površina, širine $B=6.6$ m i dvije pješačke staze širine 0.80 m (denivelisane i sa ivičnjakom visine 20 cm).



Slika 1. Novi most u Murinu raspona 35 m

Poštujući zahtjeve JUS-a U.M1.046, [2], ispitivanjem je obuhvaćeno mjerenje sljedećih veličina:

- **dilatacije u betonu** u donjoj i gornjoj flanši, sa lijeve i desne strane rebra, u polovini raspona uzvodnog **ivičnog** glavnog nosača;
- **dilatacije u betonu** u donjoj i gornjoj flanši, sa lijeve i desne strane rebra, u polovini raspona uzvodnog **srednjeg** glavnog nosača;
- **vertikalni ugibi** sredini, četvrtini i trećini raspona, u srednjem i ivičnom glavnom nosaču i u osovini mosta;
- **dinamičke karakteristike konstrukcije** (slobodne i prinudne vibracije i dinamički koeficijent).

Mjerenje dilatacija u betonu izvedeno je mehaničkim komparaterima (ugibomjerima), tačnosti 1/1000 mm na postavljenim bazama $l = 200$ mm, i mehaničkim deformetrom marke "Pfender," tačnosti 1/100 mm, na postavljenim deformetarskim bazama $l = 100$ mm. Izabrani kritični presjeci (polovina raspona grede) u srednjem i ivičnom glavnom nosaču opasani su mjernim mjestima, postavljenim u zategnutim i pritisnutim zonama presjeka.

Vertikalni ugibi od saobraćajnog tereta na mostu mjereni su geodetski, pomoću nivelira marke "Zeiss"-Koni 007, N° 513358 i privremeno postavljenih repera. Promjene ugla nagiba tangente na elastičnu liniju mjerena je mehaničkim klinometrom. Prinudne i slobodne vibracije konstrukcije snimaju se pomoću mjerača vibracija marke "Hottinger", koji je kompjuterski vođen elektronskim sistemom za akvizaciju mjernih veličina.

Vrijednosti momenata savijanja i transverzalnih sila u kritičnim presjecima, usljed pokretnog opterećenja, na koje je izvršeno dimenzionisanje u Glavnom projektu, dati su sljedećoj tabeli:

Tabela 1. Vrijednosti uticaja u kritičnim presjecima prema Glavnom projektu

N O S A Č	M_p (kNm)	T_p (kN)
1. Ivični	3163.9	165
2. Srednji	2979.0	150

Dinamički koeficijent za proračun glavnog nosača, prema Glavnom projektu, je bio $k_d=1.12$.

Proračun statičkih uticaja i deformacija od takvog opterećenja sproveden je pomoću programskog paketa *SAP 90* i *Tower, Radimpax - Beograd*. Proračun i ispitivanje sprovedeno je za dvije šeme opterećenja: šema 1 sa jednim vozilom, pri čemu su zadnji točkovi u sredini

raspona mosta, i šema 2 (slika 2) - sa dva vozila, pri čemu su krajevi vozila u sredini raspona mosta.

Koeficijent efikasnosti probnog opterećenja U predstavlja odnos računskih vrijednosti statičkih uticaja od probnog opterećenja i projektnih uticaja sa dinamičkim faktorom. Vrijednosti efikasnosti probnog opterećenja za kritične presjeke (šema opterećenja 2) date su u sljedećoj tabeli.

Tabela 2. Vrijednosti maksimalnih uticaja u kritičnim presjecima od probnog opterećenja i koeficijenti efikasnosti

Mjerno mjesto	Ivični nosač	Srednji nosač
Maksimalni momenti od probnog opterećenja (kNm)	1829,0	2.474,4
Max transversalna sile od probnog opterećenja (kN)	126,5	170,5
Koeficijent efikasnosti U_M	57,8 %	83,1 %
Koeficijent efikasnosti U_T	76,7 %	113,7 %



Slika 2. Raspored vozila za šemu opterećenja 2

Za potrebe upoređenja rezultata proračuna i rezultata mjerenja - koje se traži po propisima za ispitivanje mostova - izvršeno je računsko određivanje ugiba za korišćeno probno opterećenje. Računski rezultati su dobijeni sračunavanjem ugiba i nagiba za projektovano stanje konstrukcije tj. homogeni betonski poprečni presjek po cijeloj dužini glavnog nosača - bez unosa u proračun sile prednaprezanja, koja smanjuje ugibe. Rezultati su prikazani u donjoj tabeli.

Tabela 3. Sračunate vrijednosti maksimalnih ugiba od probnog opterećenja

Šema opterećenja 2	Ivični nosač			Srednji nosač		
	L/2	L/3	L/4	L/2	L/3	L/4
Ugibi (mm)	9,9	8,4	6,9	13,0	11,0	9,0

Kao što se u tabeli vidi, najveća računaska vrijednost ugiba dobija se za šemu opterećenja 2, i najveći ugib iznosi 13 mm.

Kako se radi o predhodno napregnutim glavnim nosačima i postupku potpunog predhodnog naprezanja - gdje nije dozvoljena pojava prslina u nosaču - naponi i deformacije od probnog

opterećenja sračunate su direktnom primjenom Hukovog zakona. Naponi i deformacije su sračunati za uticaje ostvarene probnim opterećenjem i prikazani su u donjoj tabeli.

Tabela 4. Sračunate vrijednosti maksimalnih napona od probnog opterećenja

Šema	Ivični nosač		Srednji nosač	
opterećenja 2	gornja flanša	donja flanša	gornja flanša	donja flanša
napon (Kn/m^2)	1318,8	4249,4	1600,1	5674,0
dilatacije $\times 10^{-5}$	3,77	12,14	4,57	16,2

U Glavnom projektu mosta nisu bile prezentirane vrijednosti dinamičkih karakteristika mosta. Za potrebe ispitivanja mosta određene su računske vrijednosti dinamičkih karakteristika – sopstvena frekvencija i period oscilovanja za prva tri tona oscilovanja konstrukcije mosta, kao i oblici samih tonova oscilovanja - sve za most projektovanih dimenzija i karakteristika - bez unošenja u analizu sile prednaprezanja, koja povećava frekvenciju. Dinamičke karakteristike mosta su određene pomoću programskog paketa SAP i provjerene pomoću programskog paketa *Tower*. One su date su u sljedećoj tabeli.

Tabela 5. Sračunate vrijednosti dinamičkih karakteristika konstrukcije

Broj tona	Frekvencija (Hz)	Period (sec)
1	3,68	0,271
2	14,07	0,071
3	29,48	0,034

2. IZVRŠENA MJERENJA I DOBIJENI REZULTATI

Kontrolisane dimenzije (visina glavnih nosač, širina flanši i rasponi glavnih nosača) izvedene su prema projektu.

Makroskopskim pregledom mosta, izvršenim jedan dan prije početka ispitivanja probnim opterećenjem, ustanovljeno je da se na konstruktivnim elementima mosta ne uočavaju vidne prsline.

Probno opterećenje mosta izvršeno je upotrebom pokretnog saobraćajnog tereta, statičkog i dinamičkog karaktera, koje prema efikasnosti i tački 3.3 JUS-a U.M1.046 spada u **normalne saobraćajne terete**. Vrijeme u toku ispitivanja bilo je kišovito i hladno.

Probno opterećenje je aplicirano pomoću dva vozila marke "*Mercedes*" pod punim teretom. Dinamičko opterećenje (prinudne vibracije) izvršeno je jednim vozilom pod punim teretom. Prije probnog ispitivanja izmjereni su osovinski pritisci vozila na kolskoj vagi. Izmjerene vrijednosti date su u sljedećoj tabeli:

Tabela 6. Naneseno probno opterećenje

Oznaka vozila	Prednja osovina (kg)	Zadnja osovina (kg)	Ukupna težina (kg)
BR 1	7115	22805	29845
BR 2	5605	23835	29705
BR 3	5945	19865	25905

U toku ispitivanja, pri svim fazama statičkog i dinamičkog opterećenja, na osmatranim mjestima kolovozne ploče, u sredini glavnih nosač, prsline koje bi se mogle vidjeti golim okom (0,1mm i veće) se nisu pojavile.

Ugibi su mjereni geodetski, pomoću nivelira. Postavljeni repri označeni su na šemi mjernih mjesta datoj u prilogu 1.

Mjerenja su izvršena za opterećenje mosta sa jednim - oznaka 1 i dva vozila - oznaka 2, postavljena kao što je prikazano na šemi probnog opterećenja u prilogu 2.

Mjerenja su izvršena na neopterećenom mostu (oznaka 0), neposredno poslije nanošenja opterećenja (oznake 1 i 2), pod opterećenjem (oko 45 min nakon nanošenja opterećenja, oznake 1'' i 2''), neposredno poslije rasterećivanja mosta (0'', 0'') i 1^h nakon rasterećenja mosta (0''-2), i data su u sljedećoj tabeli.

Tabela 7. Izmjereni ugibi

Geod. stanic		mjer. mjest	IZMJERENI UGIBI (mm)						
			O	Opter. 1	Opter. 1'	O'	Opter. 2	Opter. 2' max ugibi	O''
vrijeme		8 ⁵⁵ -9 ¹⁵	10 ⁴⁰ -10 ⁵⁵	11 ³⁰ -11 ⁴⁵	11 ⁵⁸ -12 ¹²	12 ¹⁵ -12 ³²	13 ²⁷ -13 ⁴¹	13 ⁴⁵ -13 ⁵⁶	14 ⁴⁵ -14 ⁵⁸
I	1	0.0	2.4	2.7	0.5	4.8	5.1	0.5	0.6
	2	0.0	2.9	3.2	0.4	5.9	6.1	0.5	0.5
	3	0.0	3.5	3.9	0.4	6.9	7.2	0.6	0.6
II	4	0.0	1.8	1.8	0.0	3.5	3.3	0.0	0.0
	5	0.0	2.1	2.1	-0.1	-	-	-0.2	-0.2
	6	0.0	-	-	0.1	-	-	0.4	0.3
	7	0.0	1.4	1.4	-0.1	2.9	3.0	-0.1	0.0
	8	0.0	1.7	1.8	0.0	3.4	3.5	0.0	-0.1
	9	0.0	2.3	2.2	0.2	4.5	4.4	0.3	0.3

Izmjereni ugibi su manji od računskih vrijednosti za probno opterećenje. Najveća izmjerena vrijednost ugiba je 7,2 mm, što je manje od sračunate. Mjerenjem zaostalih ugiba nakon rasterećenja mosta takođe se pokazalo da su te vrijednosti manje od dozvoljenih.

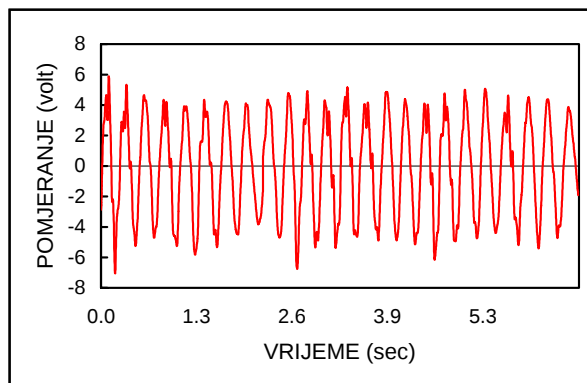
Mjerenje dilatacija u betonu za presjek u sredini srednjeg i ivičnog nosača, i na mjestima po obimu presjeka izvršeno je za statičko opterećenje sa jednim i dva vozila, šeme opterećenja 1 i 2. Podatak mjernog instrumenta je bio 0,001mm. Rezultati mjerenja komparaterima i deformetrom su prikazani u sledećoj tabeli.

Tabela 5. Izmjerene dilatacije u betonu

Mjerno mjesto	Šema opter. 1 $\epsilon_b \times 10^{-5}$	Šema opter. 2 $\epsilon_b \times 10^{-5}$	zaostale dilatacije $\epsilon_b \times 10^{-5}$
1 - donja flanša	4,5	9,5	1,0
2 - donja flanša	4,0	10,0	0,0
3 - gornja flanša	- 1,5	-1,0	-0,5
4 - gornja flanša	-	-	-
5 - donja flanša	2,5	7,5	1,0
6 - donja flanša	2,5	7,0	0,5
7 - gornja flanša	- 1,0	-1,5	-0,5
8 - gornja flanša	-	-1,5	-

Mjereni rezultati su reda veličine računskih, a svi su manji od proračunatih, pa je i ovaj kriterijum ispravnosti konstrukcije zadovoljen.

Dinamičko opterećenje izazvano je pomoću jednog vozila pod punim opterećenjem koje se kretalo brzinama 15 i 35 km/h i koje je dolazilo iz pravca Andrijevice. Elektronskim putem mjerena su relativna pomjeranja (razlika usled statičkog i dinamičkog odgovora konstrukcije), slika 3, kao i brzine i ubrzanja. Izmjerena frekvencija prvog tona je oko $f_1 = 3,9$ Hz, što je neznatno više od računske vrijednosti od 3,7 Hz - koja je sračunata ne uzimajući u obzir uticaje predhodnog naprezanja.



Slika 3. Zapis sa dinamičkog ispitivanja mosta

Dinamički faktor je određen korišćenjem rezultata geodetskih mjerenja ugiba u sredini ivičnog nosača za šemu opterećenja I ($u = 3,9$ mm) i relativnih pomjeranja dobijenih pri kretanju vozila po mostu. Dinamičko pomjeranje tako sračunato iznosi: $u = 3,9 + 2,0 = 5,9$ mm.

Dinamički faktor izmjeren na taj način iznosi: $k_d = 5,9 \text{ mm} / 3,9 \text{ mm} = 1,51$ što je znatno više od projektovanog $k_d = 1,12$. Treba naglasiti da su dinamička pomjeranja dobijena uz pomoć vibrometra čija je prava namjena utvđivanje frekvencija tj. perioda oscilovanja. Takođe, dinamička mjerna sonda je kalibrirana za mjerenje pomjeranja pomoću improvizovanog instrumenta čija je preciznost dosta mala. Zato se sa sigurnošću može reći da je izmjereni dinamički koeficijent vjerovatno veći nego stvarni.

Međutim, kako su i izmjerene frekvencije malo više nego one koje su računski određene, to se može reći da je izvedena konstrukcija mosta malo kruća nego projektovana, što upućuje i da bi dinamički koeficijent trebao da bude veći nego onaj korišćen u proračunu, ali ne u značajnoj mjeri.

Makroskopskim pregledom mosta, izvršenim tokom i neposredno nakon ispitivanja ustanovljeno je da se na konstruktivnim elementima mosta ne uočavaju vidne prsline.

3. ZAKLJUČAK

Rezultati ispitivanja mosta probnim opterećenjem ukazuju na sljedeće:

- Odgovor mosta pri statičkom i dinamičkom probnom opterećenju bio je u skladu sa projektovanim ponašanjem;
- Projektom predviđena opterećenja pruzimaju se sa propisanim koeficijentima sigurnosti;

LITERATURA

- [1] Konačni izvještaj o ispitivanju drumskog mosta u Murinu probnim opterećenjem, Građevinski fakultet u Podgorici, 2000.
- [2] JUS U.M1.046 – Ispitivanje mosta probnim opterećenjem