

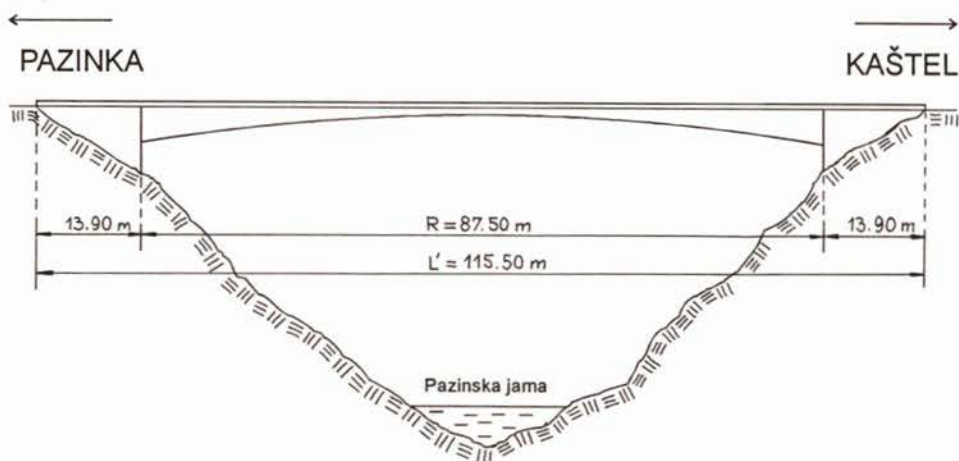
ANALIZA REZULTATA MJERENJA POMAKA MOSTA PREKO PAZINSKE JAME

Zdravko KAPOVIĆ, Mladenko RAK, Ljudevit HERCEG, Marijan RATKAJEC
– Zagreb*

SAŽETAK. Opisana je teorijska analiza mosta preko »Pazinske jame«, kao podloga razradi metoda određivanja pomaka i deformacija spomenutog objekta pri pokusnom (probnom) ispitivanju.

1. UVOD

Most preko »Pazinske jame« projektiran je kao pješački most te istodobno i kao nosač kanalizacijskog kolektora kako bi se spriječilo zagađivanje kraškog podzemlja u hidrološkom sustavu priobalnog područja Istre. Most omogućuje pješačko povezivanje središta grada Pazina s perifernim područjem u kojem je smještena tvornica »Pazinka«. Most također može poslužiti i za prolaz interventnih vozila u slučaju potrebe.



Slika 1. Shema mosta preko »Pazinske jame«

* Dr. Zdravko Kapović, Marijan Ratkajec, dipl. ing., Geodetski fakultet, Zagreb, mr. Mladenko Rak, dr. Ljudevit Herceg, Građevinski fakultet, Zagreb, Kačićeva 26.

Most je sagrađen od armiranog betona MB-40 s prednapregnutom rasponskom konstrukcijom sandučastog poprečnog presjeka s opadajućom visinom (od 5,0 m uz upornjake do 1,3 m u sredini raspona). Raspon mosta između upornjaka je 87,50 m, a ukupna duljina 115,30 m (slika 1).

Projektant mosta je prof. dr. sc. Đuro Dekanović, dipl. ing. građ., a izvođač radova građevinska organizacija »Vijadukt«.

Statička shema konstrukcije je tijekom građenja bila konzola, da bi spajanjem u srednjem zglobu nastao plitki trozglobni okvir (slika 2).



Slika 2. Plitki trozglobni okvir mosta s poprečnim presjekom.

2. RAČUNSKI MODEL I OCJENA TOČNOSTI MJERENJA

2.1. Opis računskog modela za statičko djelovanje opterećenja

Računski model za određivanje pomaka bazira se na metodi konačnih elemenata (Zienkiewicz 1977., Bathe 1990., Dvornik 1980., Šimić 1977.).

Konstrukcija mosta je modelirana po segmentima štapnim elementima konstantne krutosti čija je veza između pomaka i čvornih sila u ravnini (slika 3) definirana odnosom:

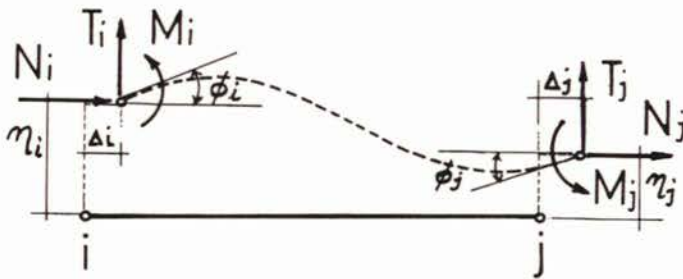
$$[K]^e \{d\}^e = \{F\}^e \quad (1)$$

ili u razvijenom obliku

$$EI \begin{bmatrix} \frac{A}{1I} & 0 & 0 & -\frac{A}{1I} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12}{l^3} - \frac{6}{l^2} & 0 & -\frac{12}{l^3} - \frac{6}{l^2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6}{l^2} & \frac{4}{1} & 0 & \frac{6}{l^2} & \frac{2}{1} \\ -\frac{A}{1I} & 0 & 0 & \frac{A}{1I} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12}{l^3} - \frac{6}{l^2} & 0 & \frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} & 0 \\ 0 & -\frac{6}{l^2} & \frac{2}{1} & 0 & \frac{6}{l^2} & \frac{4}{1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_i \\ \eta_j \\ \Phi_i \\ \Delta_j \\ \eta_j \\ \Phi_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_i \\ T_j \\ M_i \\ N_j \\ T_j \\ M_j \end{Bmatrix} \quad (2)$$

gdje su:

- $[K]^e$ – matrica krutosti elemenata
- $\{d\}^e$ – vektor pomaka elemenata
- $\{F\}^e$ – vektor čvornih sila



Slika 3. Štapni konačni element u ravni.

Povezujući elemente u cjelinu dobiva se sustav algebarskih jednadžbi oblika:

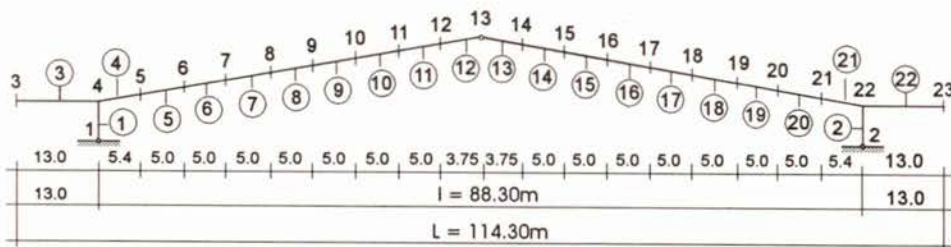
$$[K] \{D\} = \{F\}, \quad (3)$$

gdje su:

- [K] – matrica krutosti konstrukcije
- {D} – vektor pomaka konstrukcije
- {F} – vektor vanjskih sila konstrukcije.

Rješenjem sustava (3) dobivaju se računski pomaci cjelokupnog sustava u diskretiziranim čvorovima.

Prema izvedenoj konstrukciji načinjen je računski model (slika 4) od 22 elementa i 23 čvora (Rak 1994.), pri čemu je korišten program »SPAN« na bazi metode konačnih elemenata (Ožbolt 1989.). Ulazni podaci za program (opterećenje, geometrija konstrukcije, značajke materijala itd.) te rezultati proračuna dati su u izvješću (Rak, Herceg 1994.).



Slika 4. Računski model mosta za statičko opterećenje

2.2. Proračun točnosti geodetskih mjerenja

Na temelju teoretskih veličina pomaka potrebno je definirati neophodnu točnost, metodu i postupak određivanja pomaka. Kojom točnošću određivati pomake?

Prema Kapoviću (1993.), kao kriterij točnosti pri određivanju pomaka i deformacija, pogodno je upotrebljavati srednju relativnu pogrešku, odnosno relativnu standardnu devijaciju. Kako se pojedini kriteriji u građevinarstvu navode u postocima (kao što su dozvoljena odstupanja od teorijskih vrijednosti, dozvo-

ljene zaostale deformacije, itd.), što je također u relativnom obliku, to potvrđuje opravdanost korištenja relativne standardne devijacije kao kriterija točnosti određivanja pomaka.

Prema istom izvoru (Kapović 1993.) granicama:

$$\frac{1}{20} < \frac{\sigma_r}{f} < \frac{1}{10} \quad (4)$$

bila bi definirana optimalna odnosno rentabilna točnost određivanja pomaka.

S aspekta sigurnosti, pomaci izmjereni s neophodnom (najnižom) točnošću, a koji bi se prema zakonima teorije vjerojatnosti mogli interpretirati kao pogreške mjerenja, nisu problematični. Tu se radi o pomacima manjim od njihove standardne vrijednosti. Sumnju izazivaju pomaci koji su znatno veći od prosjeka, dakle samo s jednog kraja distribucije. Već ova okolnost dozvoljava primjenu nešto užeg intervala pouzdanosti ili veće relativne pogreška mjerenja uz isti stupanj upotrebljivosti rezultata. Kako je poznato, mjerenja se na mostovima obavljaju po fazama pa se, u slučaju pojave enormnog pomaka, mjerenja mogu ponoviti, odnosno ponovljenim se mjerenjem može provjeriti valjanost izmjenjenog pomaka. Nadalje, (pre)veliki se pomaci redovito ne pojavljuju izolirano, jer se i na susjednim točkama mogu izmjeriti povećani pomaci.

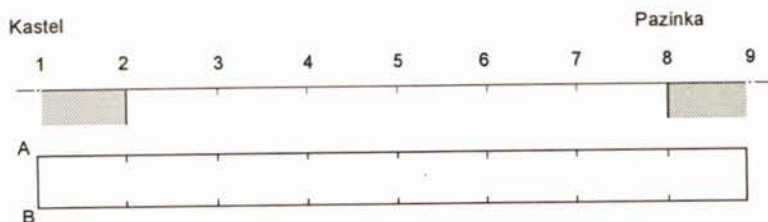
Sva ova razmatranja upućuju na zaključak da je upotrebljivost izmjerenih podataka, osobito za praktične potrebe, znatno veća. Može se reći da su granice optimalne točnosti realno niže od (4). Opravdana je konstatacija da se već s relativnom pogreškom između:

$$\frac{1}{10} < \frac{\sigma_r}{f} < \frac{1}{5}, \quad (5)$$

uz spomenute predostrožnosti, dobivaju vrlo kvalitetni podaci i da ova točnost zadovoljava razmatranu primjenu.

Na osnovi prethodnih izlaganja proizlazi:

- po veličini manje pomake treba mjeriti apsolutno točnije,
- veći pomaci se mogu mjeriti manjom apsolutnom točnošću.



Slika 5. Dispozicija mjernih mjesta

Iz prakse je poznato da nisu rijetki slučajevi kad se na nekoj građevini pojavljuju po veličini znatno različiti pomaci (npr. pomaci na krajevima mosta su mnogo manji od onih na tjemenu). Dosljedno se pridržavajući gore izloženih zaključaka, značilo bi primijeniti različite točnosti mjerenja. Jasno je da to treba izbjegavati, pa bi realno trebalo zaključiti: ukoliko je veća točnost može postići bez većih poteškoća i bez dodatnog gubljenja vremena, treba je primijeniti.

Na temelju izložene teorije očekivanih (teoretskih) veličina pomaka te prema prilikama na mostu, određena je metoda i postupak mjerenja pomaka – modificirana metoda preciznog nivelmana visoke točnosti.

Geodetski radovi sastojali su se u određivanju vertikalnih pomaka na značajnim mjestima konstrukcije pri različitim shemama opterećenja (Kapović 1984.). Mjerna mjesta na mostu stabilizirana su duž dviju linija (uz rubnjake) označenih slovima A i B. Na svakoj liniji postavljeno je po 9 točaka (slika 5).

3. PROGRAM ISPITIVANJA MOSTA

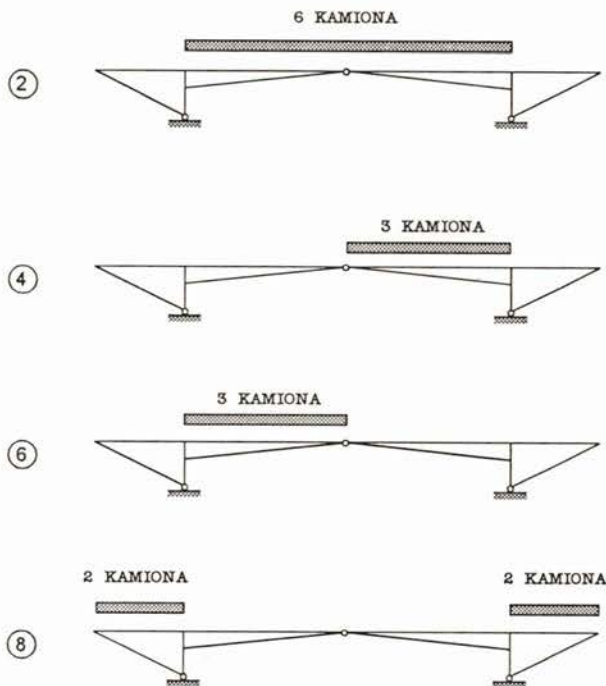
Na osnovi postojećih propisa o pokusnom ispitivanju armiranobetonskih konstrukcija (PBAB članak 278., 179. i 280.) te u dogovoru s projektantom, načinjen je program statističkih i dinamičkih ispitivanja.

Program ispitivanja pri statičkom djelovanju opterećenja sadržavao je sve relevantne kombinacije opterećenja koje izazivaju najnepovoljnije utjecaje na pojedinim dijelovima konstrukcije (slika 6).

Opterećenje je provedeno sa šest kamiona, svaki prosječne mase oko 25 tona.

Ispitivanja dinamičkih parametara konstrukcije provedena su pri djelovanju stohastičke pobude srednje širine frekventnog spektra (utjecaj motornog vozila mase 1500 kg, pri prolazu brzinom od 20 km/sat).

Funkcija odgovora konstrukcije registrirat će se u sredini i četvrtini raspona pomacima u horizontalnim i vertikalnom smjeru simultanim zapisima u vremenskoj



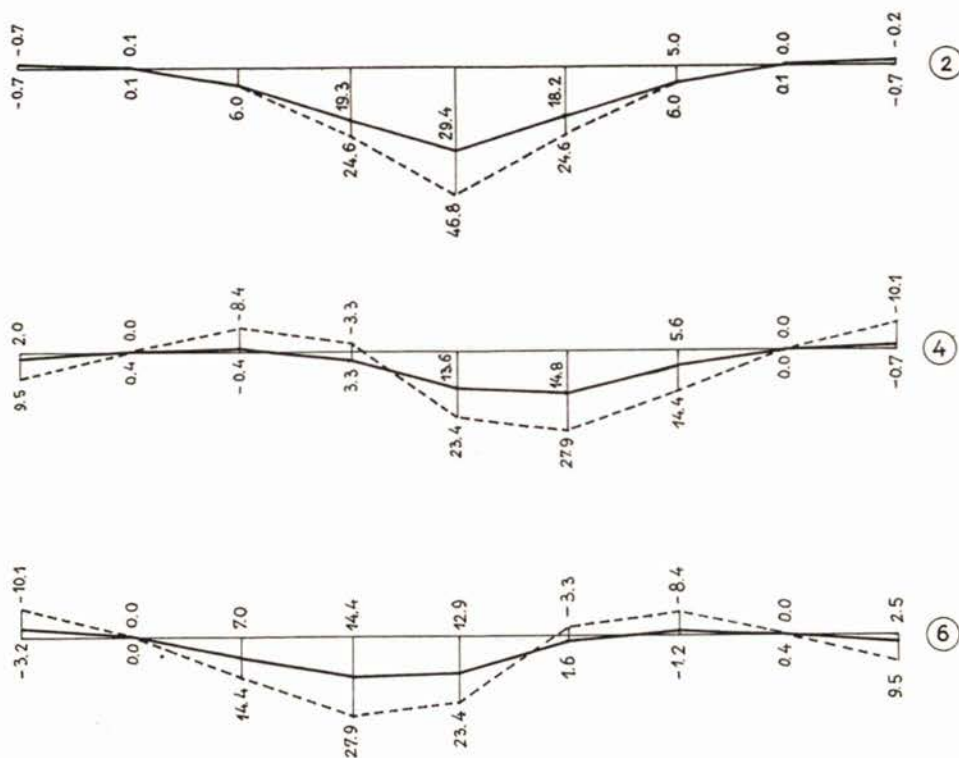
Slika 6. Shema opterećivanja mosta

i frekventnoj domeni. Analizom registriranih odgovora konstrukcije procjenjuju se vrijednosti frekvencija i perioda te logaritamskog dekrementa prigušenja za svaki modalni oblik.

Vrijednost tih dinamičkih parametara čine referentne vrijednosti u centralnoj bazi podataka dinamičkih parametara kao osnove za ocjenu realnog stanja konstrukcije.

4. REZULTATI ISPITIVANJA I ZAKLJUČAK

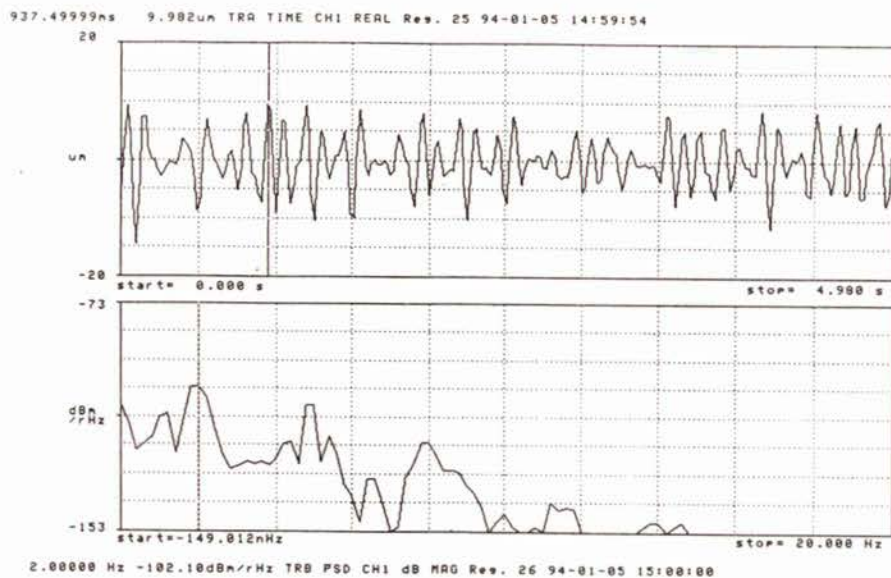
Vertikalni pomaci dobiveni geodetskim mjerenjima, zadovoljavajući kriterij izraza (5), i teoretske vrijednosti pomaka, prikazani su na slici 7. Uočava se da su izmjereni pomaci nešto manji od očekivanih, što ukazuje na činjenicu da je



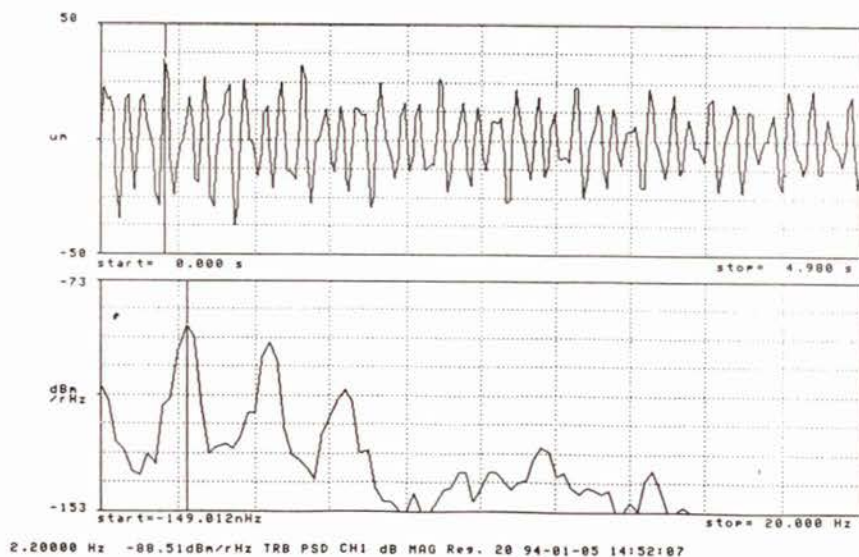
Slika 7. Shematski prikaz izmjerenih i teoretskih veličina pomaka

Tablica 1. Izmjerene frekvencije osnovnih modalnih oblika

smjer	oblik	I	II	III
vertikalni smjer		2,20 Hz	4,33	6,25
horizontalni smjer		2,0 Hz	4,8	7,65



HORIZONTALNE VIBRACIJE U ČETVRTINI RASPONA



VERTIKALNE VIBRACIJE U ČETVRTINI RASPONA

Slika 8. Prikaz horizontalnih i vertikalnih vibracija mosta u četvrtinama raspona u vremenskoj i frekventnoj domeni

izvedena konstrukcija malo kruća od računске. Uostalom i iskustva s drugih objekata su pokazivala kako su izmjerene vrijednosti pomaka u pravilu uvijek manje od računskih. Rezultati ispitivanja ovog mosta pokazuju i to da je aktiviranje konzolnog dijela mosta djelomično spriječeno, što također smanjuje veličine pomaka.

Iz zapisa funkcija spektralne gustoće snage izdvojene su frekvencije osnovnih modalnih oblika titranja za horizontalni i vertikalni smjer (tablica 1).

Funkcija odgovora konstrukcije u vremenskoj i frekventnoj domeni prikazana je na slici 8. Prema ovim rezultatima konstrukcije se u dinamičkom smislu ponaša prema očekivanju.

Kako se vizualnim pregledom mosta nisu uočila nikakva oštećenja koja bi mogla nepovoljno utjecati na sigurnost i stabilnost konstrukcije, ocjenjuje se da je most sposoban preuzeti projektom predviđena opterećenja.

LITERATURA

- Bathe, K. J. (1990.): *Finite-Elemente – Methoden*, Berlin.
- Bićanić, N. (1980.): *Proračun kompleksnih konstrukcija*, Zagreb.
- Dvornik, J. (1980.): *Prikaz nekih metoda teorije konstrukcija*, skripta, Zagreb.
- Kapović, Z. (1984.): *Geodetske metode određivanja pomaka pri ispitivanju mostova*, magistarski rad, Geodetski fakultet, Zagreb.
- Kapović, Z. (1993.): *Prilog određivanju i analizi pomaka i deformacija mostova s posebnim osvrtom na temperaturne utjecaje*, doktorska disertacija, Geodetski fakultet, Zagreb.
- Ožbolt, J. Škoro B, Dvornik J, Novak B (1989.): *Program »SPAN«*, priručnik.
- Pičuga, A. (1985.): *Uvod u metod konačnih elemenata*, Svjetlost, Sarajevo.
- Rak, M, Herceg Lj. (1994.): *Izvješće o ispitivanju pješačkog mosta preko »Pazinske jame« u Pazinu*.
- Šimić, V. (1977.): *Uvod u metodu konačnih elemenata*, (predavanje III. stupanj Građevinskog fakulteta), Zagreb.
- Zienkiewicz, O.C. (1977.): *The Finite Element Method*, McGraw-Hill, London.

THE ANALYSIS OF THE RESULTS OBTAINED BY MEASURING THE SHIFTS OF THE BRIDGE OVER »PAZINSKA JAMA«

The paper describes the theoretical analysis of the bridge over »Pazinska jama« which is to be the basis of the methods worked on for the purpose of determining the shifts and deformations of the mentioned object during the trial examination.

Primljeno: 1994-06-14