

Primljen / Received: 20.10.2023.

Ispravljen / Corrected: 22.5.2024.

Prihvaćen / Accepted: 19.6.2024.

Dostupno online / Available online: 10.7.2024.

Metoda modalnog progiba za ispitivanje mosta: praktična alternativa ispitivanju statičkim opterećenjem

Autori:



Shukun Li, dipl.ing.građ.
lsk1013705904@163.com



Sheng Qi, dipl.ing.građ.
835662566@qq.com



Ruofan Zhao, dipl.ing.građ.
1847412121@qq.com



Prof. **Xingjun Qi**
2184099356@qq.com
Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Sanpeng Cao**
1123601978@qq.com

Sveučilište Shandong Jianzhu
Fakultet prometnog inženjerstva
Jinan, Shandong, Kina

Izvorni znanstveni rad

Shukun Li, Sheng Qi, Ruofan Zhao, Xingjun Qi, Sanpeng Cao

Metoda modalnog progiba za ispitivanje mosta: praktična alternativa ispitivanju statičkim opterećenjem

U radu je prikazano istraživanje učinkovitosti određivanja modalnog progiba kao zamjene za ispitivanje statičkim opterećenjem, s fokusom na željeznički nadvožnjak Ji-Jiao. Projektirane sheme simetričnog i nesimetričnog opterećenja upotrijebljene su za mjerenje statičkih progiba mosta u stvarnom vremenu kako bi se procijenila njegova nosivost. Provedena su dinamička ispitivanja s ambijentalnom pobudom kako bi se zabilježilo ubrzanje i odredile modalni parametri mosta. Kriging metoda interpolacije upotrijebljena je za proširenje modalnog oblika u uzdužnom i poprečnom smjeru mosta. Određena je matrica fleksibilnosti glavne grede, predviđeni su modalni progibi mosta pod statičkim opterećenjem vozila i provedena je usporedba s izmjerenim statičkim progibima. Rezultati su pokazali da su modalni progibi na srednjem dijelu raspona dobro usklađeni sa statičkim progibima, s učestalosću pogrešaka nižom od 10 %. To pokazuje da dinamičko ispitivanje može učinkovito zamijeniti ispitivanja statičkim opterećenjem, pružajući održivu metodu za procjenu stanja nosivosti mosta, omogućavajući praćenje u stvarnom vremenu. Ovo postignuće ima praktičnu vrijednost i otvara prilike za buduća istraživanja.

Ključne riječi:

dinamičko ispitivanje, matrica fleksibilnosti pomaka, modalni progib, Krigingova metoda interpolacije

Original research paper

Shukun Li, Sheng Qi, Ruofan Zhao, Xingjun Qi, Sanpeng Cao

Modal deflection method for bridge load testing: a practical alternative to static load tests

This study investigated the effectiveness of modal deflection testing as a substitute for static load tests, focusing on the separation of the Ji-Jiao railway separated overpass. The designed load test schemes for both the central and eccentric loading conditions were used to measure the real-time static deflections of the bridge to assess its bearing capacity. Modal testing based on ambient excitation was employed to capture the acceleration vibration responses and identify the key modal parameters of the bridge. The Kriging interpolation method was utilised to extend the mode shapes along both the longitudinal and transverse directions of the bridge deck. The flexibility matrix of the main beam was computed, the modal deflections of the bridge under static test vehicle loads were predicted, and a comparative analysis was conducted using the measured static deflections from the static load test. The results showed that the modal deflections at the midspan section closely matched the static deflections, with errors consistently below 10%. This suggests that modal testing can effectively replace static load tests, providing a viable method for assessing the bridge load-bearing status and enabling real-time health monitoring. This achievement has practical engineering value and opens up prospects for future research.

Key words:

modal test, flexibility matrix, modal deflection, Kriging interpolation method

1. Uvod

Mostovi služe kao ključni i središnji objekti koji olakšavaju međusobno povezivanje i komunikaciju između prometnih sustava. Sigurnost, upotrebljivost i trajnost ovih konstrukcija oduvijek su bili u središtu istraživanja u građevinarstvu. Tijekom životnog vijeka konstrukcije mosta, kumulativni utjecaji čimbenika kao što su starenje materijala, erozija okoliša, dugotrajni učinci opterećenja, zamor i preopterećenje vozila neminovno rezultiraju oštećenjem konstrukcije. Ta oštećenja značajno utječu na nosivost mosta i predstavljaju prijetnju njegovom sigurnom funkcioniranju [1-4]. Točna i znanstvena procjena stanja nosivosti mostova u uporabi ključna je za utvrđivanje njihovih stvarnih granica sigurnosti, čime se učinkovito ublažavaju potencijalne katastrofalne posljedice tijekom operativnih faza.

Tradicionalne metode za procjenu nosivosti mostova uključuju metodu ispitivanja opterećenjem, sintetički pristup vrednovanju i metodu utjecajnih linija [5-9]. Među njima, metoda ispitivanja statičkim probnim opterećenjem je najtočniji i najobjektivniji pristup i ima ključnu ulogu u sigurnom održavanju mostova. Međutim, zbog opsežne i dugotrajne kontrole prometa potrebne za ispitivanje statičkim opterećenjem, njihova je gospodarska izvedivost relativno slaba. Sustavna, opsežna procjena nosivosti brojnih malih do srednje velikih mostova stoga nije prikladna. Stalnim tehnološkim napretkom računalnih sustava i sustava za prikupljanje podataka, primjena naprednih senzora i dinamičkog ispitivanja za procjenu stanja doživjela je značajan napredak posljednjih godina [10].

U praktičnim dinamičkim ispitivanjima mostova, posebice ako se promatra ambijentalna pobuda, mogu se dobiti samo osnovni dinamički parametri mosta [11]. Točna procjena nosivosti konstrukcije mosta je izazovna ako se temelji samo na ovim osnovnim dinamičkim parametrima. Upotreba dinamičkih parametara, posebice modalne fleksibilnosti mostova, postala je fokus globalnih istraživanja. Zhou i sur. [12, 13] uveli su metodu spajanja modalnog oblika potkonstrukcije za izračunavanje matrice fleksibilnosti pomaka konstrukcije, čime su poboljšali učinkovitost dinamičkog ispitivanja upotrebom metode s više referentnih točaka i čekića. Tian i sur. [14, 15] proveli su ispitivanja s više referentnih točaka pri djelovanju udara i statičko opterećenje na mostovima dugog raspona i dokazali da postoji poklapanje između predviđenih i izračunanih progiba. Qi i sur. [16] primijenili su metodu dodatne mase za dobivanje modalnog progiba mosta i upotrijebili je za procjenu stvarne nosivosti slobodno oslonjenog mosta sa šupljom pločom i kontinuiranog grednog mosta na temelju ambijentalne pobude i rezultata ispitivanja mosta probnim opterećenjem.

U građevinskoj praksi, zbog ograničenja koja proizlaze iz metode ispitivanja, opreme za ispitivanje i uvjeta u kojima se ispitivanje provodi, metoda ocjenjivanja stanja nosivosti stvarnih mostova još uvijek zahtijeva kontinuirano proširenje i usavršavanje.

U ovom istraživanju prikazana je metoda za ocjenu nosivosti mostova u neprekidnom prometu primjenom metode ispitivanja modalnog progiba. Učinkovitost i izvedivost predložene

metode potvrđene su statičkim i dinamičkim ispitivanjima na montiranom slobodno oslonjenom mostu s T-gredom na raskrižju s razdvojenim nivoima na željeznici Ji-jiao. Ova metoda ne zahtijeva dugotrajne prekide prometa ili prekid u prometu za vrijeme ispitivanja mosta, prikladna je i učinkovita te nudi značajne praktične inženjerske prednosti za razne male i srednje mostove na autocestama te gradske mostove.

2. Teorijska pozadina

Oblik titranja odražava inherentnu karakteristiku konstrukcije i predstavlja omjer modalnog progiba konstrukcije u različitim modalnim redoslijedima. Prema ortogonalnosti modalnih oblika [17, 18]:

$$\text{diag}(M_i) = \varphi^T M \varphi$$

$$\text{diag}(C_i) = \varphi^T C \varphi \quad (1)$$

$$\text{diag}(K_i) = \varphi^T K \varphi$$

gdje M označava matricu mase, C matricu prigušenja, i K matricu krutosti. φ je matrica pomaka, $\varphi = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \dots \varphi_r$, a φ_i je odgovarajući vektor i -tog modalnog oblika.

Izraz (1) prikazuje da identificirani proizvoljni pomak φ_i zadovoljava uvjet ortogonalnosti. Matrice mase i krutosti mogu se dijagonalizirati, kako je prikazano u izrazima (2) ili (3):

$$\varphi^T M \varphi = \text{diag}(m_i) \quad (2)$$

$$\varphi^T K \varphi = \text{diag}(k_i)$$

$$\varphi^T M \varphi = m_i \quad (3)$$

$$\varphi^T K \varphi = k_i$$

pri čemu je: $i = 1, 2, 3, 4 \dots n$

Isti oblik, za koji postoji pomak $\bar{\varphi}_i$ koji zadovoljava uvjet $\bar{\varphi}_i^T M \bar{\varphi}_i = m_i$, $= 1$, $\bar{\varphi}_i$ naziva se modalnim pomakom normaliziran na masu dok odgovarajuća matrica modalnih oblika $\bar{\varphi}$ je matrica modalnih oblika normalizirana na masu.

Određena je matrica mase konstrukcije te joj je određen odgovarajući modalni oblik normaliziran masom za određeni mod. Modalni pomak φ_i dobiven iz analize svojstvenih vrijednosti ili modalne analize ne mora nužno biti točan oblik titranja normaliziran masom. Koeficijent proporcionalnosti, a_i postoji između ovog i odgovarajućeg oblika titranja normaliziranog masom $\bar{\varphi}_i$, kao što je prikazano u izrazu (4):

$$\bar{\varphi}_i = \frac{\varphi_i}{a_i} \quad (4)$$

Zamjenom izraza (4) u $\bar{\varphi}_i^T M \bar{\varphi}_i = 1$ dobiva se koeficijent proporcionalnosti a_i .

$$a_i = \sqrt{\varphi_i^T M \varphi_i} \quad (5)$$

Zamjenom matrice modalnog pomaka normaliziranog masom u izraz (2) vrijedi:

$$\bar{\varphi}^T M \bar{\varphi} = \text{diag}(\bar{m}_i) = I \quad (6)$$

$$\bar{\varphi}^T K \bar{\varphi} = \text{diag}(\bar{k}_i) = I$$

U slučaju da je $\bar{\varphi}$ kvadratna matrica punog ranga, za obje strane drugog dijela izraza (6), pomnožene istovremeno s $(\bar{\varphi}^T)^{-1}$ s lijeve strane i $(\bar{\varphi})^{-1}$ s desne strane, dobije se matrica krutosti kako slijedi:

$$K = (\bar{\varphi}^T)^{-1} \text{diag}(\bar{k}_i) (\bar{\varphi})^{-1} \quad (7)$$

Matrica fleksibilnosti F^d je inverzna funkcija matrice krutosti K , kako je prikazano u izrazu (8):

$$F^d = K^{-1} = \bar{\varphi} \text{diag} \left(\frac{1}{\bar{k}_i} \right) \bar{\varphi}^T = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\varphi}_i \bar{\varphi}_i^T}{\bar{k}_i} \quad (8)$$

gdje d označava da ovaj parametar pripada pomaku.

Odnosi između vlastite frekvencije w_i , modalne mase \bar{m}_i , i modalne krutosti \bar{k}_i su kako slijedi:

$$w_i = \sqrt{\frac{\bar{k}_i}{\bar{m}_i}} \quad (9)$$

Modalna masa $\bar{m}_i = 1$ koja odgovara modalnom pomaku normaliziranom na masu $\bar{\varphi}_i$ je jednaka. Stoga vrijedi,

$$\bar{k}_i = w_i^2 \quad (10)$$

Uvrštavanjem ovih vrijednosti u izraz (8) dobiva se sljedeća formula za izračun matrice fleksibilnosti:

$$F^d = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\varphi}_i \bar{\varphi}_i^T}{w_i^2} \quad (11)$$

pri čemu je $\bar{\varphi}_i$ i-ti oblik titranja normaliziran, w_i^2 je i-ta vlastita frekvencija, a n je ukupan broj identificiranih modalnih oblika. Konačno, matrica fleksibilnosti izračunava se pomoću izraza (11) i može se zamijeniti u izraz (12) za određivanje modalnog progiba.

$$\Delta = F^d f \quad (12)$$

Gdje Δ označava modalni progib, a f vektor statičkog opterećenja.

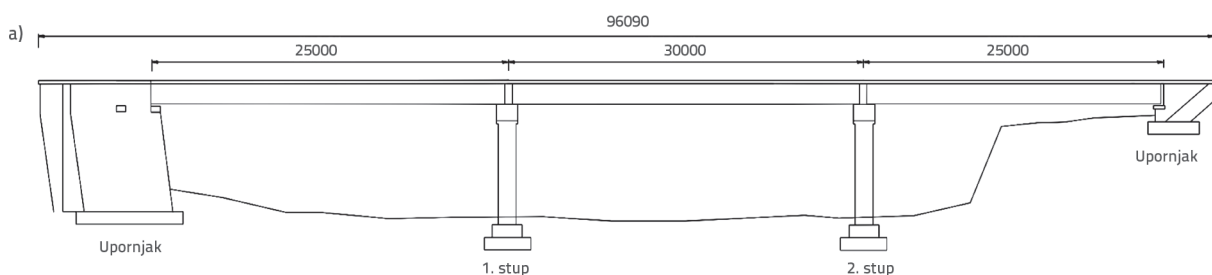
3. Terensko ispitivanje

3.1. Pregled projekta

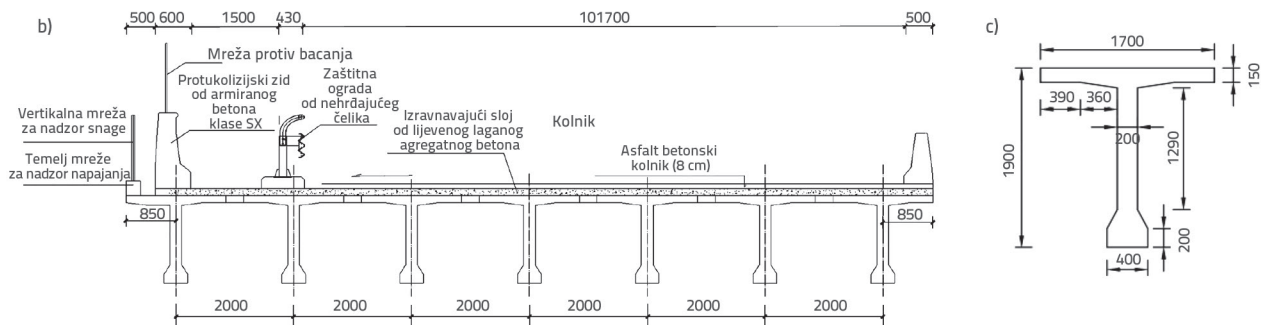
Željeznički nadvožnjak Ji-jiao je most s dva prometna traka, koji omogućuje kretanje u dva smjera, s kombiniranim rasponom mosta od 25 m + 30 m + 25 m. Svaki se kolnik sastoji od sedam montažnih prednapetih betonskih slobodno oslonjenih T-greda. Potkonstrukcija se sastoji od stupova, gravitacijskih upornjaka u obliku slova U i temelja od bušenih pilota. Kao predmet terenskog ispitivanja odabran je raspon duljine 25 m. Most je prikazan na slici 1., a njegove dimenzije prikazane su na slici 2.



Slika 1. Most Ji-Jiao na kojem su provedena ispitivanja



Slika 2. Dimenzije mosta (mm): a) Uzdužni presjek mosta

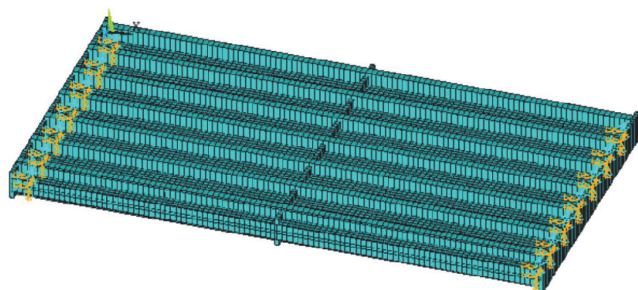


Slika 2. b) Poprečni presjek mosta; c) Poprečni presjek grede

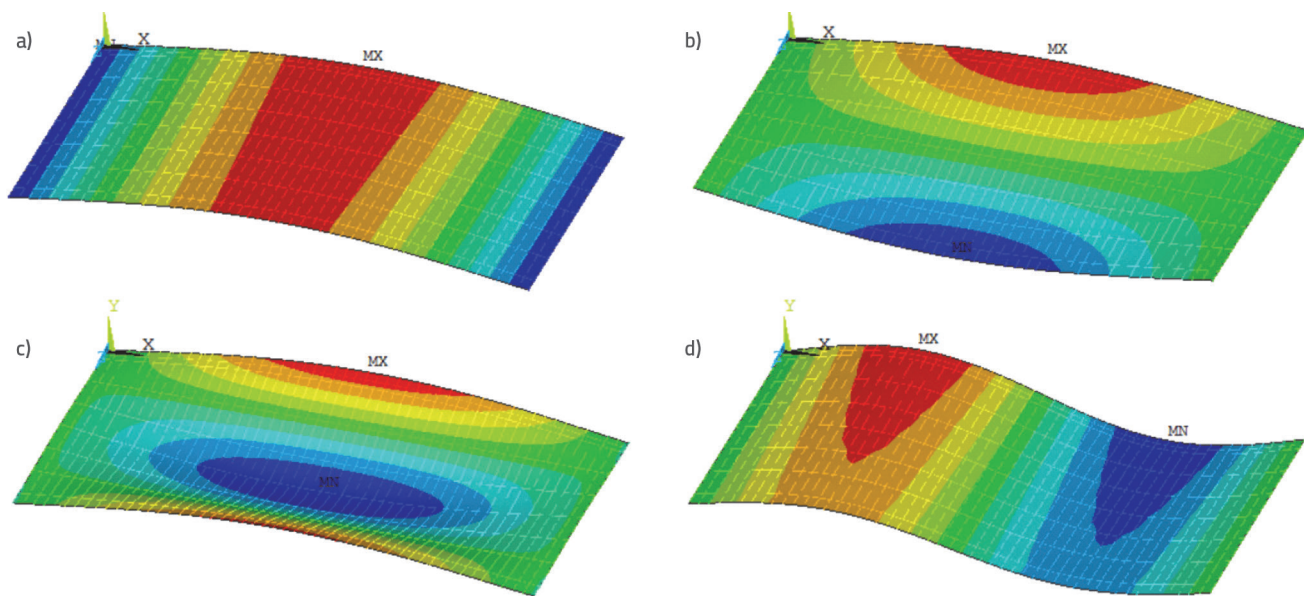
3.2. Numerički model mosta

Kako bi se teorijski modalni oblici mosta točno podudarali s utvrđenim modalnim oblicima, treba odrediti minimalne zahtjeve koji su potrebni za predviđanje izmjerenih modalnih progiba i matricu mase koju treba izdvojiti iz modela konačnih elemenata, za koji je potrebno izraditi numerički model mosta. Za izradu modela mosta upotrijebljen je računalni program ANSYS. Zbog velike širine kolnika mosta, model slobodno oslonjene grede nije mogao točno simulirati bočni odziv konstrukcije mosta. Stoga je primijenjen model rešetke. Glavna greda, virtualna poprečna greda, čvrsta poprečna greda i zaštitna ograda modelirani su pomoću elemenata BEAM4. Nivelirajući sloj betona modeliran je upotrebom SHELL63 elemenata. Asphaltni sloj je pojednostavljen kao koncentrirana masa i integriran u most, COMBIN14 elementi korišteni su za simulaciju vertikalnog oslonca svih ležajeva na kraju grede. Glavna greda, poprečna greda i zaštitna ograda imaju modul elastičnosti $1,55 \times 10^4$ MPa, gustoću 2500 kg/m^3 , Poissonov koeficijent od 0,2, a duljina elementa modela konačnih

elemenata iznosi 0,4 m. Virtualna poprečna greda ima gustoću 0 kg/m^3 . Modul elastičnosti betonskog nivelirajućeg sloja je $3,25 \times 10^4$ MPa, s gustoćom od 2500 kg/m^3 i Poissonovim koeficijentom od 0,2, a debljina nivelirajućeg sloja betona je 0,08 m. Zbog malog omjera površine čelične armature i površine glavne grede u presjeku glavne grede te zbog toga što je most u elastičnom stanju, čelična armatura nije uzeta u obzir prilikom modeliranja. Numerički model mosta prikazan je na slici 3, a prva četiri teorijska modalna oblika ilustrirana su na slici 4.



Slika 3. Numerički model mosta



Slika 4. Prva četiri teorijska modalna oblika: a) Prvi oblik titranja; b) Drugi oblik titranja; c) Treći oblik titranja; d) Četvrti oblik titranja

4. Ispitivanje mosta statičkim opterećenjem

Prije provedbe statičkog ispitivanja mosta, efikasnost opterećenja potrebno je odrediti u skladu s *Metodama ispitivanja cestovnih mostova probnim opterećenjem (Load Test Methods for Highway Bridges)* (JTG/T J21-01-2015) [19]. Ovaj izračun bitan je za potpuno razjašnjenje parametara konstrukcije pod primijenjenim opterećenjem. Efikasnost opterećenja (η_q) određena je primjenom izraza (13),

$$\eta_q = \frac{S_s}{S(1+\mu)} \quad (13)$$

pri čemu S_s označava maksimalnu izračunanu vrijednost unutarnjih sila ili pomaka pod statičkim probnim opterećenjem, S predstavlja najnepovoljnije izračunane vrijednosti unutarnjih sila ili pomaka unutar presjeka koje stvara opterećenje, a μ predstavlja vrijednost koeficijenta udara. Koeficijent udara varira između 0,05 i 0,45, ovisno o vlastitoj frekvenciji konstrukcije. Prema [19], koeficijent udara izračunava se na sljedeći način:

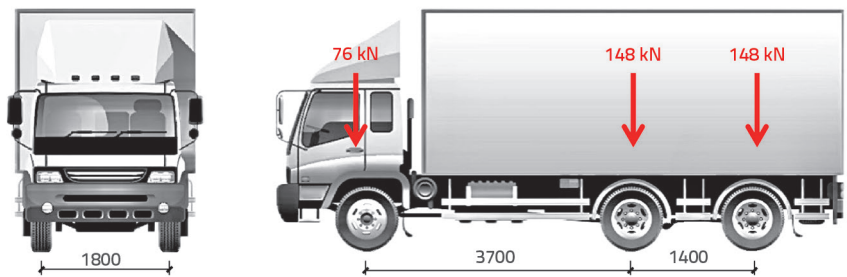
- kada je $f < 1,5 \text{ Hz}$, $\mu = 0,17671 \cdot \ln f - 0,0157$ (a)
 kada je $1,5 \text{ Hz} \leq f \leq 14 \text{ Hz}$, $\mu = 0,17671 \cdot \ln f - 0,0157$ (b)
 kada je $f > 14 \text{ Hz}$, $\mu = 0,45$ (c)

Teorijskim izračunom dobivena je vlastita frekvencija mosta od 4,433 Hz; stoga je za izračun odabran uvjet (b).

Kako bi se osigurala točnost rezultata ispitivanja, nužno je pridržavati se specifikacija navedenih u *Specifikacijama za pregled i procjenu nosivosti cestovnih mostova (Specification for*



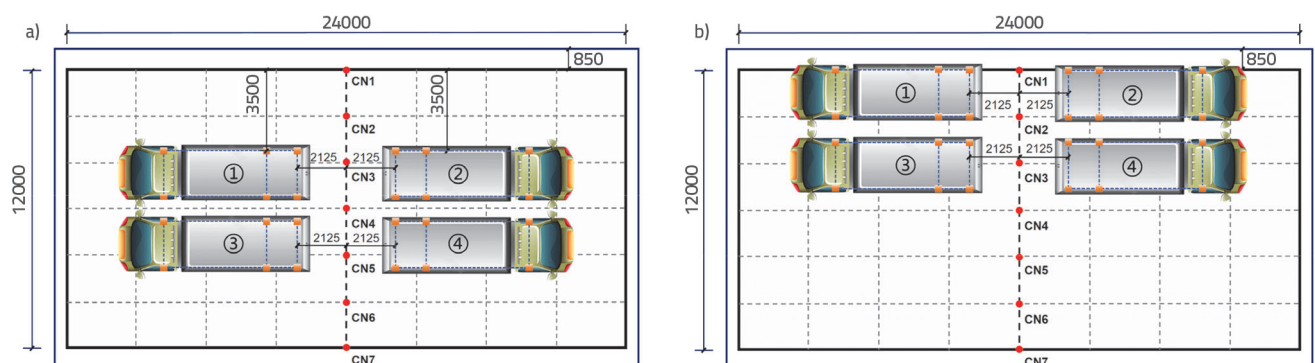
Slika 5. Faza statičkog ispitivanja mosta s 4 kamiona



Slika 6. Shema dimenzija kamiona korištenog za statičko ispitivanje mosta (mm) s naznačenim osovinskim opterećenjem [kN]

Inspection and Evaluation of Load-bearing Capacity of Highway Bridges) (JTG/T J21-2011) [20]. U skladu s tom oznakom, idealni raspon efikasnosti opterećenja mosta trebao bi biti između 0,95 i 1,05. U tu svrhu upotrijebljena su četiri troosovinska teretna vozila: s prednjom osovinom od 76 kN, srednjom osovinom od 148 kN i stražnjom osovinom od 148 kN. Shema opterećenja prikazana je na slici 5., a dimenzije opterećenih vozila prikazane su na slici 6.

Statičko ispitivanje željezničkog nadvožnjaka Ji-jiao podijeljeno je u dva slučaja opterećenja: centrično i ekscentrično opterećenje. Kako bi se provjerilo ispravno funkcioniranje ispitnog sustava i organizacija ispitivanja, predviđeno je da vrijeme zadržavanja predopterećenja ne bude kraće od 20



Slika 7. Uvjeti opterećenja tijekom ispitivanja: a) Stanje simetričnog opterećenja [mm]; b) Stanje nesimetričnog opterećenja [mm] (Opterećenje u prvom koraku: ①+②, Opterećenje u drugom koraku: ①+②+③+④)

minuta, tijekom kojeg se opterećenje postupno smanjuje na nulu, a konstrukcija ima dovoljno vremena da se rastereti. Nakon što je konstrukcija potpuno rasterećena, započinje stvarno opterećenje.

Tijekom statičkog ispitivanja primijenjen je pristup postupnog opterećenja, a svaka faza provedena je u dva koraka. Opterećenje u prvom koraku uključuje vozila ① i ②, dok u drugom koraku uključuje dodatno još vozila ③ i ④. Uz vozila ① i ②. Shema opterećenja prikazana je na slici 7.

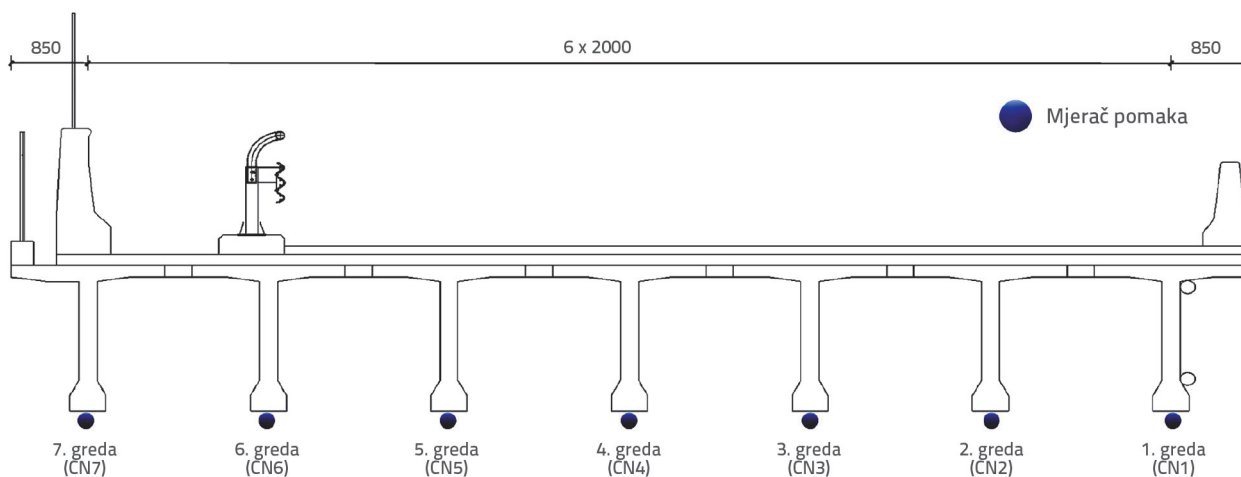
Svaki korak opterećenja i očitavanje izmjeren je odmah nakon njegova nanošenja ili rasterećenja konstrukcije, a stabilna očitavanja uzeta su nakon što se opterećenje ili rasterećenje konstrukcije stabilizira. Znak relativne stabilnosti konstrukcije je ako je unutar zadnjih 5 minuta svake faze opterećenja inkrementalni pomak manji od 15 % inkrementalnog pomaka unutar prethodnih 5 minuta ili manji od najmanje razlučivosti upotrijebljenog mjernog uređaja.

Vrijednosti izmjerene nakon stabilizacije stanja opterećenja u prvom koraku nazivaju se stabilni progibi prvog stupnja, a

vrijednosti izmjerene nakon stabilizacije stanja opterećenja drugog koraka nazivaju se stabilni progibi drugog stupnja.

Budući da je središte mosta najkritičnija točka na mostu, svako središte glavnog nosača odabrano je kao mjerna točka. Mjerne točke označene su oznakama CN1 do CN7. Raspored mjernih točaka prikazan je na slici 8. Ispod mosta postavljeni su nosači za učvršćivanje senzora za mjerenje pomaka TST-100A (osjetljivost: $48,60 \mu\epsilon/\text{mm}$). Podaci o progibu mosta prikupljeni su pomoću sustava za prikupljanje podataka. Postavke terenskog ispitivanja prikazane su na slici 9. Zabilježene vrijednosti progiba na središnjem dijelu raspona glavne grede mosta uslijed simetričnog i nesimetričnog opterećenja prikazane su u tablicama 1 i 2.

Podaci u tablici pokazuju da je i za simetrično i za nesimetrično opterećenje trajna deformacija mjernih mjesta nakon rasterećenja bila znatno manja od 20 %, što je u skladu sa zahtjevima *Tehničkih propisa za ispitivanje i ocjenjivanje gradskih mostova (Technical Code for Test and Evaluation of City Bridges) (CJ/T 233 -2015)* [21]. Elastična stanja saniranih i ojačanih mostova bila su zadovoljavajuća.



Slika 8. Raspored točaka za mjerenje progiba



Slika 9. Postavke za mjerenje progiba ispod mosta: a) način postavljanja senzora za mjerenje pomaka; b) prikaz sustava za prikupljanje podataka

Tablica 1. Izmjerene vrijednost progiba za kontrolne dijelove pri djelovanju simetričnog opterećenja

Mjerno mjesto	Stabilni progib prvog stupnja [mm]	Stabilni progib drugog stupnja [mm]	Progib pri rasterećenju [mm]	Elastična deformacija [mm]	Povezana trajna deformacija [%]
CN1	-0,25	-1,08	0,04	-1,12	3,70
CN2	-0,73	-2,07	-0,04	-2,03	1,93
CN3	-1,09	-2,73	-0,04	-2,69	1,47
CN4	-1,41	-3,06	-0,04	-3,02	1,31
CN5	-1,70	-2,98	-0,16	-2,82	5,37
CN6	-1,43	-2,17	-0,02	-2,15	0,92
CN7	-1,13	-1,49	0,00	-1,49	0,00

Napomena: CN1–CN7 su kontrolne točke koje odgovaraju srednjem rasponu sedam glavnih greda

Tablica 2. Izmjerene vrijednost progiba za kontrolne dijelove pri djelovanju nesimetričnog opterećenja

Mjerno mjesto	Stabilni progib prvog stupnja [mm]	Stabilni progib drugog stupnja [mm]	Progib pri rasterećenju [mm]	Elastična deformacija [mm]	Povezana trajna deformacija [%]
CN1	-1,52	-2,38	0,00	-2,38	0,00
CN2	-1,34	-2,74	0,00	-2,74	0,00
CN3	-1,15	-2,81	0,00	-2,81	0,00
CN4	-0,71	-2,27	0,00	-2,27	0,00
CN5	-0,49	-1,68	-0,02	-1,66	2,67
CN6	-0,02	-0,75	-0,02	-0,73	1,19
CN7	0,00	-0,36	0,00	-0,36	0,00

Napomena: CN1–CN7 su kontrolne točke koje odgovaraju srednjem rasponu sedam glavnih greda

5. Određivanje dinamičkih parametara čvorišta mosta

5.1. Određivanje dinamičkih parametara

Povećanom osjetljivošću senzora i napretkom internetske tehnologije, određivanje dinamičkih parametara pri ambijentalnoj pobudi postala je široko rasprostranjena praksa. Ova se metoda oslanja na ambijentalnoj, kao što su kretanje tla, opterećenje uzrokovano vjetrom i vozilima, kako bi se izazvale vibracije mosta. Odziv mosta može se zabilježiti pomoću senzora visoke osjetljivosti, sustava za prikupljanje podataka i računala. Metode modalne analize kao što su metoda odabiranja vrha, metoda empirijskog razlaganja i metoda slučajnog potprostora [22, 23] primjenjuju se za utvrđivanje dinamičkih parametara konstrukcije.

Usporedba ove metode koja se koristi pri ambijentalnoj pobudi s tradicionalnim pristupom, koji istovremeno iskorištava ulazne i izlazne informacije za utvrđivanje dinamičkih parametara mosta, nudi nekoliko prednosti. Kao prvo, eliminira potrebu za mjerenjem podataka o pobuđivanju konstrukcije i izravno prepoznaje dinamičke parametre pomoću podataka o odzivu, čime se smanjuje radno opterećenje i povećava praktičnost.

Drugo, metoda ispitivanja pri ambijentalnoj pobudi ne zahtijeva prekid normalnog rada konstrukcija mosta, dok tradicionalna ručna pobuda zahtijeva složenu opremu za pobudu, koja je skupa, a proces pobude zahtijeva kontrolu prometa, što ga čini manje prikladnim za mostove s gustim protokom prometa.

Dinamičko ispitivanje opisano u ovom istraživanju usvaja metodu slučajne ambijentalne pobude. Senzori za mjerenje ubrzanja BY-S07 (osjetljivost: 0,3 v/(m/s²)) postavljeni su na osam međusobno jednako udaljenih točaka na svakoj glavnoj gredi. Odgovarajuća količina adhezijskog veziva ravnomjerno je raspoređena i zalijepljena na dno akcelerometra. Čvrsto prijanjanje između veziva i dna senzora sigurno pričvršćuje senzor za mjerenje ubrzanja s vezivom na kolnik mosta, pritom osiguravajući da senzor ostane stabilan tijekom ispitivanja. Da bi se to postiglo, senzor za mjerenje ubrzanja je pričvršćen na mjerno mjesto, takozvanu referentnu točku, a ostala mjerna mjesta su pomaknuta u tri serije kako bi se zabilježili podaci. Ova se metoda kombinira s metodom modalne sinteze kako bi se dobili dinamički parametri cijelog mosta. Kako bi se u potpunosti izmjerio odziv mosta, vrijeme uzorkovanja za svaku seriju postavljeno je između 20 i 30 minuta s frekvencijom uzorkovanja od 500 Hz. Ispitivanje mosta prikazano je na slici 10, a raspored mjernih mjesta ilustriran je na slici 11.

5.2. Identifikacija dinamičkih parametara mosta

Pri procjeni stanja nosivosti mostova pomoću metode ispitivanja modalnog progiba pri ambijentalnoj pobudi, za matricu fleksibilnosti zabilježena je brza konvergencija. Posljedično, dinamički parametri višeg stupnja tek jedva doprinose matrici fleksibilnosti. Stoga su obično potrebni samo dinamički parametri prvih nekoliko stupnjeva kako bi se dobila dovoljno točna matrica fleksibilnosti [24].

Određivanjem matrice fleksibilnosti, predviđen je modalni progib mosta, a predviđeni rezultati brzo su se približili stvarnom statičkom progibu. Posljedično, za ovaj slobodno oslonjeni gredni most potrebno je odrediti samo dinamičke parametre za prva četiri moda kako bi se predvidjele deformacije na središnjem kontrolnom dijelu i ispunili zahtjevi o preciznosti. Dinamički parametri slobodno oslonjenog mosta s T-gredom određeni su SSI metodom određivanja dinamičkih parametara. Rezultati zabilježenih vrijednosti vlastitih frekvencija prikazani su u tablici 3.

Tijekom procesa izgradnje mosta, kako bi se osigurala njegova stabilnost, postavljena je određena sigurnosna granica, što je rezultiralo većom krutošću K , pri čemu je izmjerena vrijednost vlastite frekvencije bila veća od teorijske frekvencije. Prva četiri modalna oblika mosta prikazana su na slici 12.

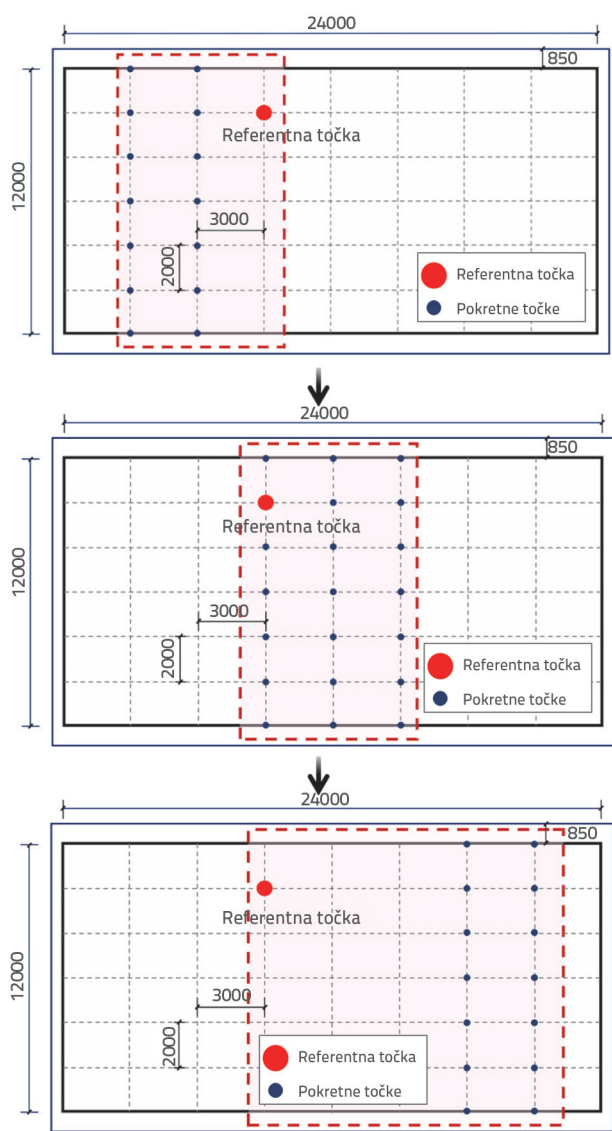
Ako položaj mjesta za određivanje dinamičkih parametara ne odgovara položajima opterećenja kotača tijekom statičkog, nedostatak raspodjele opterećenja rezultirat će neusklađenošću između matrice fleksibilnosti dobivene dinamičkim ispitivanjem i vektora opterećenja iz statičkog testa. Modalni progibi izračunani pomoću izraza (11) imaju značajne pogreške u usporedbi s progibima izmjerenim statičkim ispitivanjima. Raspodjela opterećenja kotača na obližnja mjerna mjesta i uzimanje u obzir samo okomite raspodjele opterećenja može točno prikazati učinke opterećenih kotača na mostu.

Modalni oblici utvrđeni kroz određivanje dinamičkih parametara na 49 mjernih mjesta podvrgnuti su interpolacijskoj obradi u poprečnom i uzdužnom smjeru mosta. Pomoću ove metode mogu se dobiti podaci o modalnom obliku na mjestu gdje su bili kotači pri statičkom ispitivanju, što omogućuje izračun matrice fleksibilnosti koja odgovara stvarnom vektoru opterećenja kotača. Ovaj proces olakšava predviđanje modalnih progiba i eliminira potrebu za specifičnom raspodjelom opterećenja kotača.

Uobičajene metode interpolacije uključuju interpolaciju inverzne udaljenosti, radialne bazične funkcije i Krigingovu interpolaciju [25-27]. U usporedbi s tradicionalnim metodama modalne ekstrapolacije, Kriging interpolacija nameće manje ograničenja



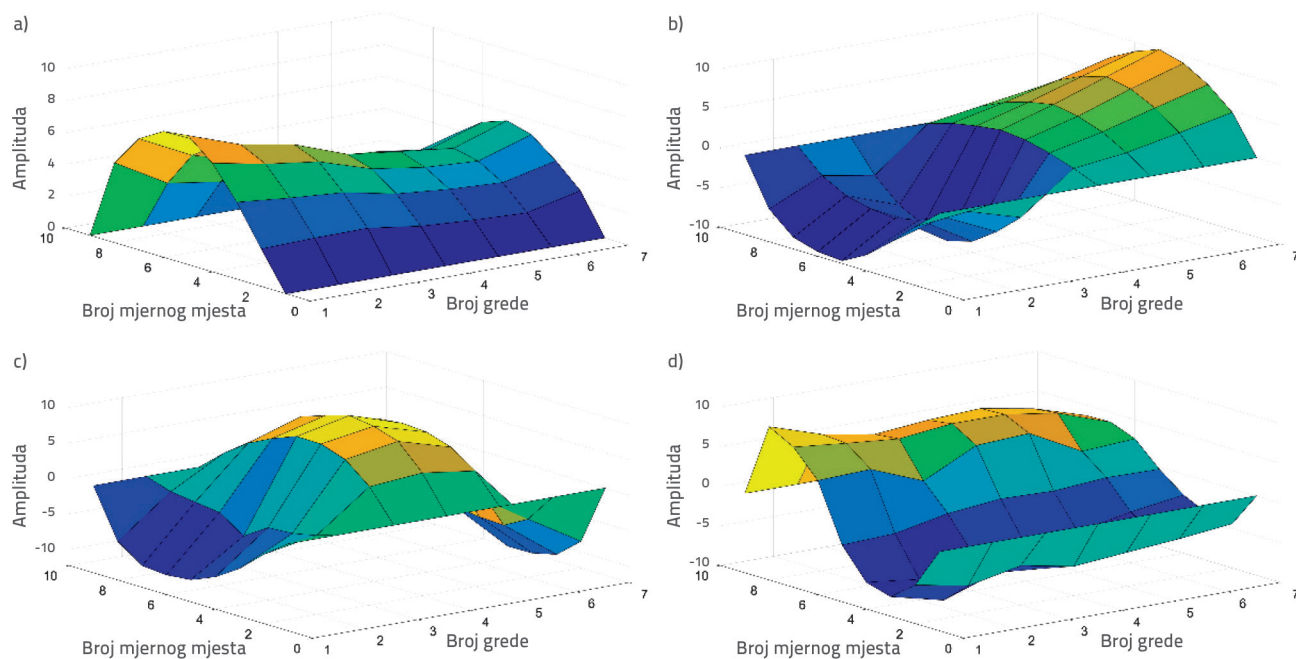
Slika 10. Terenska fotografija određivanja dinamičkih parametara mosta



Slika 11. Raspored mjernih mjesta (dimenzije u mm)

Tablica 3. Rezultati zabilježenih vrijednosti vlastitih frekvencija

Modalni oblik	Prvi oblik titranja	Drugi oblik titranja	Treći oblik titranja	Četvrti oblik titranja
Teorijska frekvencija [Hz]	4,433	6,988	12,959	17,748
Utvrđena frekvencija [Hz]	6,475	7,575	13,381	20,581



Slika 12. Eksperimentalno identificirana prva četiri modalna oblika: a) Prvi oblik titranja; b) Drugi oblik titranja; c) Treći oblik titranja; d) Četvrti oblik titranja

Tablica 4. Utvrđivanje vrijednosti kriterija modalnog osiguranja (MAC)

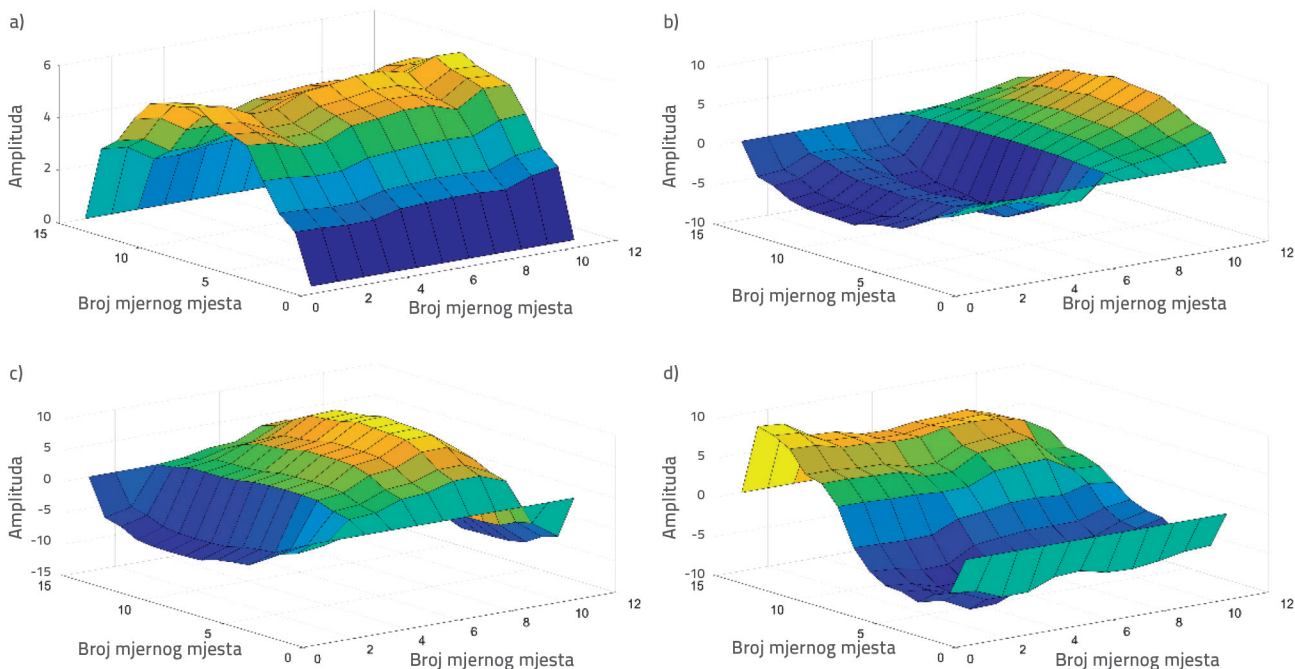
Stanje opterećenja	Prvi oblik titranja	Drugi oblik titranja	Treći oblik titranja	Četvrti oblik titranja
Simetrično opterećenje	0,9947	0,8578	0,8887	0,9480
Nesimetrično opterećenje	0,9930	0,8608	0,8623	0,9395

i pokazuje širu primjenjivost. U potpunosti uzima u obzir prostornu korelaciju varijabli, odražava prostornu strukturu varijabli i pruža minimalnu procjenu varijable nepoznatih podataka unutar područja procjene, pokazujući na taj način izvrsne učinke zaglađivanja. Zahvaljujući ovim prednostima, Krigingova metoda nudi izvrsnu izvedbu simulacije u usporedbi s drugim uobičajenim metodama interpolacije.

Stoga je u ovom istraživanju korištena Krigingova metoda za interpolaciju i proširenje izmjerenih modalnih oblika. Tijekom određivanja dinamičkih parametara konstrukcije mosta postavljena su mjerna mjesta na svakoj osmoj točki duž svake grede. Virtualna mjerna mjesta postavljena su na mjestu kotača, a vrijednosti modalnih oblika na tim virtualnim točkama dobivene su interpolacijom sa stvarnim vrijednostima mjernih mjesta. Prošireni modalni oblici za prva četiri oblika titranja

nakon interpolacije prikazani su na slici 13., a vrijednosti kriterija modalnog osiguranja (MAC) prikazane su u tablici 4.

MAC se upotrebljava za procjenu korelacije vektora oblika titranja u modalnom prostoru. Izračunana skalarna vrijednost pada između nule i jedan, a vrijednost bliža jedinici upućuje na bolju korelaciju između oblika. Iz tablice 4. vidljivo je da se MAC vrijednost proširenih oblika titranja pod simetričnim i nesimetričnim opterećenjem kreće između 0,85 i 0,99. Značajno je da su točnosti prvog i drugog vertikalnog oblika titranja iznosile više od 0,85, što upućuje na najveću preciznost među svim oblicima titranja. Rezultati naglašavaju pouzdanost primjene Krigingove metode za interpolaciju oblika titranja na mjestu položaja kotača, učinkovito rješavajući problem neusklađenosti između točaka mjerenja oblika titranja i položaja stvarnog opterećenja.



Slika 13. Proširena prva četiri oblika titranja mosta nakon interpolacije: a) Prvi oblik titranja; b) Drugi oblik titranja; c) Treći oblik titranja; d) Četvrti oblik titranja

5.3. Matrica fleksibilnosti

Fleksibilnost predstavlja pomak konstrukcije uslijed djelovanja jedinice sile, koja je recipročna vrijednost krutosti, i može karakterizirati sposobnost deformacije konstrukcije u njenom elastičnom stanju [28, 29]. Element u matrici fleksibilnosti predstavlja progib u čvoru uzrokovan primjenom jedinичne sile u čvoru. Za predviđanje progiba mosta pod poznatim opterećenjem upotrebljava se matrica fleksibilnosti.

U ovom istraživanju primijenjen je poboljšani model konačnih elemenata za normalizaciju eksperimentalnih oblika titranja, a za izračun matrice fleksibilnosti korišteni su normalizirani dinamički parametri. Prva četiri oblika titranja normalizirana su i zamijenjena u izrazu (11) kako bi se dobila matrica fleksibilnosti, kako slijedi: za proučavanje matrice fleksibilnosti

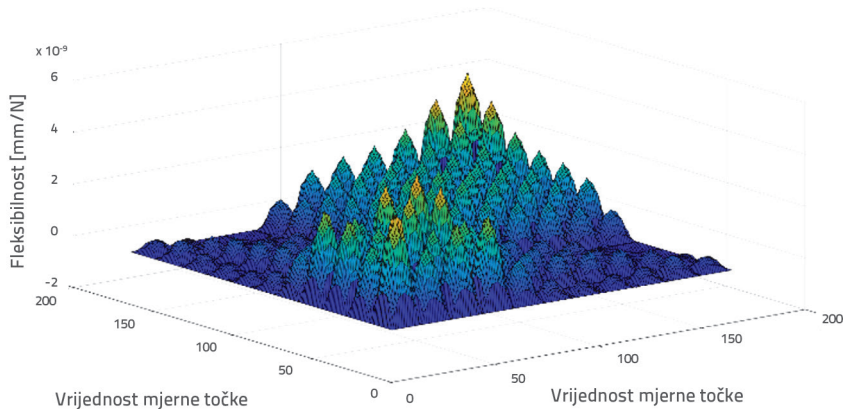
mosta izrađen je trodimenzionalni dijagram, kao što je prikazano na slici 14.

Iz trodimenzionalnog prikaza matrice fleksibilnosti vidljivo je da ona odražava deformaciju konstrukcije pod opterećenjem. Vršne točke na grafu odgovaraju središnjim dijelovima raspona rubova grede mosta. Ovaj je rezultat u skladu s fizičkim značajem ukupne vertikalne deformacije konstrukcije mosta.

6. Procjena nosivosti mosta

Pomak je jedan od najvažnijih parametara u projektiranju konstrukcija i procjeni njezina stanja jer daje intuitivan odraz osnovne izvedbe i stanja krutosti konstrukcije. Stoga je utvrđivanje pomaka konstrukcije oduvijek bio glavni cilj građevinara i istraživača. Tipično, vertikalni pomak izmjeren

izravno tijekom statičkog ispitivanja služi kao glavni kriterij za procjenu nosivosti mosta. Međutim, zbog troškova i vremena potrebnog za provođenje statičkog ispitivanja, ova metoda nije prikladna za ocjenu nosivosti malih i srednjih mostova. Modalni progib konstrukcija pod statičkim opterećenjem predviđen je upotrebom inherentnog svojstva matrice fleksibilnosti. Ovaj pristup jasno zamjenjuje izmjereni statički progib za procjenu nosivosti mosta, čime se učinkovito kompenziraju nedostaci tradicionalnih statičkih ispitivanja.



Slika 14. 3D prikaz matrice fleksibilnosti

Tablica 5. Pogreška između modalnog i izmjerenog statičkog otklona

Mjerno mjesto	Stanje simetričnog opterećenja			Stanje nesimetričnog opterećenja		
	Statički progib [mm]	Modalni progib [mm]	Relativna pogreška [%]	Statički progib [mm]	Modalni progib [mm]	Relativna pogreška [%]
CN1	-1,12	-1,37	22,3	-2,38	-2,47	4,0
CN2	-2,03	-2,15	6,0	-2,74	-3,00	9,5
CN3	-2,69	-2,61	3,0	-2,81	-2,54	9,7
CN4	-3,02	-2,85	5,8	-2,27	-2,11	6,9
CN5	-2,82	-2,57	8,9	-1,66	-1,51	9,0
CN6	-2,15	-2,08	3,1	-0,73	-0,94	28,8
CN7	-1,49	-1,81	21,5	-0,36	-0,45	25,0

Napomena: CN1–CN7 su kontrolne točke koje odgovaraju srednjem rasponu sedam glavnih greda

Tablica 6. Koeficijent provjere progiba

Mjerno mjesto	Stanje simetričnog opterećenja			Stanje nesimetričnog opterećenja		
	S_s [mm]	S_e [mm]	η	S_s [mm]	S_e [mm]	η
CN1	/	/	/	-3,45	-2,47	0,716
CN2	-4,26	-2,15	0,505	-4,26	-3,00	0,704
CN 3	-4,98	-2,61	0,524	-4,98	-2,54	0,510
CN 4	-5,32	-2,85	0,536	-5,32	-2,11	0,397
CN 5	-4,98	-2,57	0,516	-4,98	-1,51	0,303
CN 6	-4,27	-2,08	0,487	/	/	/
CN 7	/	/	/	/	/	/

Napomena: CN1–CN7 su kontrolne točke koje odgovaraju srednjem rasponu sedam glavnih greda

U ovom istraživanju, matrica fleksibilnosti u kombinaciji s vektorom opterećenja koji odgovara opterećenom kotaču u statičkom ispitivanju korištena je za određivanje modalnog oblika za slučaj simetričnog i nesimetričnog opterećenja. Izračunani modalni progibi zatim su uspoređeni s izmjerenim statičkim progibima dobivenim iz ispitivanja statičkim opterećenjem za analizu pogreške, a rezultati su prikazani u tablici 5.

Prema podacima u tablici, vrijednosti progiba greda koje odgovaraju CN2 do CN6 pri simetričnom opterećenju veće su od vrijednosti koje odgovaraju CN1 i CN7, s ukupnim rezultatom relativne pogreške manjim od 9 % za ovih pet greda. Najveća i najmanja relativna pogreška iznose 8,9 % odnosno 3,0 %. U uvjetima nesimetričnog opterećenja, vrijednosti progiba greda koje odgovaraju CN1–CN5 bile su veće od onih koje odgovaraju CN6 i CN7, s ukupnom relativnom pogreškom manjom od 10 % za ovih pet greda. Najveća i najmanja relativna pogreška iznose 9,7 % odnosno 4,0 %. Analiza je pokazala da su unatoč određenim razlikama u progibu, ukupne relativne pogreške ostale na relativno niskim razinama, unutar 8,9 % odnosno 10 %. Uzrok pogreške leži u skraćivanju modalnih redova; predviđeni

modalni otkloni pod oba uvjeta opterećenja stoga su zadovoljili zahtjeve inženjerske preciznosti.

Osim toga, mjerne točke bile su daleko od točaka opterećenja za grede CN1 i CN7 za slučaj simetričnog opterećenja i za grede CN6 i CN7 za slučaj nesimetričnog opterećenja, što je rezultiralo malim vrijednostima progiba. Osim toga, izmjerene vrijednosti za statički progib podložne su pogreškama u mjerenju. Stoga su relativne pogreške između modalnog i izmjerenog progiba velike za ove četiri mjerne točke. Međutim, grede s manjim progibima nisu utjecale na ocjenu nosivosti mosta.

Koeficijent provjere progiba η za svaku glavnu gredu izračunan je prema [19], a η je izračunan prema izrazu (14).

$$\eta = \frac{S_e}{S_s} \quad (14)$$

Gdje η predstavlja koeficijent provjere progiba, S_e predstavlja izmjerene vrijednosti elastičnog pomaka glavnih mjernih točaka pod dinamičkim opterećenjem, a S_s je jednak kao u izrazu (13).

Nakon točnog predviđanja izmjerenog modalnog progiba presjeka na sredini glavne grede, izračunan je koeficijent provjere modalnog progiba presjeka. Taj izračun uključivao je upotrebu predviđenog modalnog progiba stvarnog mosta pod simetričnim i nesimetričnim uvjetima opterećenja uz eliminiranje irelevantnih mjernih točaka. Rezultati izračuna nalaze se u tablici 6.

Rezultati u tablici pokazuju da su pod simetričnim ili nesimetričnim opterećenjem tijekom ispitivanja, koeficijenti provjere progiba izračunani iz predviđenih modalnih progiba i da su iz modalnih ispitivanja mosta bili manji od 1. Ovo je u skladu sa specifikacijama [19], što dokazuje da se ispitivanjem modalnog progiba temeljenog na ambijentalnoj pobudi može učinkovito procijeniti stanje nosivosti mostova. Nadalje, moguće je provesti određivanje dinamičkih parametara na stvarnim mostovima bez prekidanja prometnog toka, što upućuje na njegovu praktičnu primjenu u građevinarstvu.

7. Zaključak

S obzirom na izazove povezane s mjerenjem progiba mostova i specifičnosti metoda za određivanje dinamičkih parametara konstrukcijskih susatava, u ovom istraživanju provedeno je mjerenje progiba, utvrđivanje i predviđanje slobodno oslonjenog mosta s gredom T-presjeka. Zaključci su sažeti kako slijedi:

- Na temelju metode određivanja modalnih oblika pri ambijentalnoj pobudi utvrđeni su dinamički parametri prva četiri moda na temelju mjerenja provedenih u 49 mjernih mjesta. Krigingova metoda interpolacije korištena je za proširenje modalnih oblika uzdužno i poprečno na kolnik mosta. Izračunani su modalni progibi u presjeku srednjeg raspona pri ispitivanju mosta statičkim opterećenjem. U usporedbi s izmjerenim statičkim pomacima pod uvjetima simetričnog opterećenja, najveće relativne pogreške za pet greda s najvećom efikasnosti bile su sve ispod 10 %. Slično tome, pod uvjetima

nesimetričnog opterećenja, najveće relativne pogreške pet greda s najvećom efikasnosti bile su manje od 10 %. Ovo zadovoljava zahtjeve povezane s inženjerskom preciznosti, pokazujući na visoku preciznost predviđanja modalne deformacije na temelju utvrđivanja dinamičkih parametara pri ambijentalnoj pobudi. Ono može učinkovito zamijeniti izmjerene statičke deformacije za procjenu nosivosti mosta.

- Upotrebom metode utvrđivanja dinamičkih parametara pod različitim uvjetima statičkog opterećenja i izračunavanjem koeficijenta provjere progiba, u kombinaciji s trenutnim tehničkim uvjetima [19], može se procijeniti krutost postojećih mostova. Stoga metoda utvrđivanja dinamičkih parametara pri ambijentalnoj pobudi može zamijeniti tradicionalna statička za procjenu nosivosti mosta.
- Metoda ispitivanja modalnog progiba koja se temelji na ambijentalnoj pobudi kombinira prednosti tradicionalnih statičkih i dinamičkih ispitivanja za ocjenu nosivosti mostova. Može prikupiti podatke o vibracijama mostova u funkciji bez prekida prometa i olakšati brzo određivanje dinamičkih parametara mostovnih konstrukcija. Brzim razvojem tehnologija za ispitivanje i modalnih metoda za identifikaciju, točnost ove metode nastavlja se poboljšavati. Stoga imaju visoku tehničku uporabnu vrijednost i širok raspon mogućih primjena.

Zahvala

Ovo istraživanje je podržano Projektom znanstvenog i tehnološkog plana za stambenu i urbanu ruralnu izgradnju pokrajine Shandong (br. 2024KYKF-CSGX024), Projektom znanstvenog i tehnološkog plana Jiqing High speed Railway Co., Ltd. (br. JQKJ2024-10), Projektom plana znanosti i tehnologije Odjela za promet pokrajine Shandong (br. 2022B06) i Projektom tehnoloških inovacija u poduzećima provincije Shandong (br. 202250101726 i 202160101415).

LITERATURA

- [1] Xiang, L.: Detection and bearing capacity evaluation of existing concrete bridges, Southwest Jiaotong University, 2017.
- [2] Yi-feng, Z., Jin-song, Z.: Damage identification for bridge structures based on correlation of the bridge dynamic responses under vehicle load, Structures, 33 (2021), pp. 68-76
- [3] Yu-zhao, L., Feng, X.: Measurement-based bearing capacity evaluation for small and medium span bridges, Measurement, 149 (2020).
- [4] Fang, Z., Kai-quan, Z., Jie-chao, D., Qian, Y., Xiang, W., et al.: Research progress of bridge evaluation and reinforcement in 2020, Journal of Civil and Environmental Engineering, 43 (2021), pp. 152-166.
- [5] Chuang, L., Su-feng, Z.: Research on rapid detection and identification method of bridge structure, Highway Traffic Technology, 6 (2004), pp. 60- 65, 85
- [6] Dong-ping, L., Xin-kui, T., Ning-bo, W.: Bridge rapid detection method based on actual influence line, Bridge construction, 49 (2019), pp. 42-46
- [7] Sasmal, S., Ramanjaneyulu, K.: Condition evaluation of existing reinforced concrete bridges using fuzzy based analytic hierarchy approach, Expert Systems With Applications, 35 (2008), pp. 1430-1443
- [8] De-li, Z.: Research on bearing capacity identification of long-span Bridges, Bridge construction, 48 (2018) 5, pp. 43-47

- [9] Ning-Bo, W., Wei, S., Chuanrui, G., Hua-Ping, W.: Moving load test-based rapid bridge capacity evaluation through actual influence line, *Engineering Structures*, 252 (2022), pp. 113630
- [10] Xue, M.S., Yi, T.H., Qu, C.X., et al.: Structural modal flexibility identification through a novel mode selection method, *Journal of Engineering Mechanics*, 147 (2021) 3, pp. 06021001
- [11] Maas, S., Nguyen, V.H., Kebig, T., et al.: Comparison of different excitation and data sampling methods in structural health monitoring, *Civil Engineering Design*, 1(2019), pp. 10-16
- [12] Yun, Z., Wei-jian, Y., Yun-zhong, J., Li-min, X., Mister, L.: China journal of highway and transport, 28 (2015) 9, pp. 46-56
- [13] Yun, Z., Yun-zhong, J., Wei-jian, Y., Li-min, X., Fanding, J.: Experimental research on structural damage diagnosis based on modal flexibility theory, *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 42 (2015) 5, pp. 36-45
- [14] Tian, Y.D., Zhang, J., Xia, Q., et al.: Flexibility identification and deflection prediction of a three-span concrete box girder bridge using impacting test data, *Engineering Structures*, 146 (2017), pp. 158-169
- [15] Tian, Y.D., Zhang, J., Han, Y.X.: Structural scaling factor identification from output-only data by a moving mass technique, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 115 (2019), pp. 45-49
- [16] Necati Catbas, F., Brown, D.L., Emin Aktan, A.: Use of modal flexibility for damage detection and condition assessment: Case studies and demonstrations on large structures, *Journal of Structural Engineering*, 132 (2006) 11, pp. 1699-1712
- [17] Shuang-lin, G.: Identification method of displacement compliance and strain compliance based on impact vibration, Southeast University, 2015.
- [18] Yong-ding, T.: Identification and performance evaluation of bridge structural flexibility based on environmental vibration, Southeast University, 2016.
- [19] JTG/T J21-01-2015: Load test methods for highway bridge, <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/JTGJ21-01-2015>, [1.6.2023.]
- [20] JTG/T J21-2011: Specification for inspection and evaluation of load-bearing capacity of highway bridges, <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/JTGTJ21-2011>, [1.6.2023.]
- [21] CJJ/T 233-2015: Technical code for test and evaluation of city bridges, <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/CJJT233-2015>, [1.6.2023.]
- [22] Yong-gao, C., Zhen-yu, Z.: Modal parameter identification of bridge structure based on improved EEMD algorithm, *Journal of highway and transportation science and technology*, 35 (2018) 4, pp. 49-57
- [23] Ze-xin, C., Yong, H., Zhen-yu, Y., et al.: Earthquake engineering and engineering vibration, 39 (2019) 2, pp. 213-224
- [24] Qi-cheng, R.: Research on bridge rapid diagnosis technology based on compliance coefficient, Civil Aviation University of China, 2018.
- [25] Buhmann, M.D.: Radial basis functions: Theory and implementations, Cambridge University Press, New York, 2003.
- [26] Morlier, J., Chermain, B., Gourinat, Y.: Original statistical approach for the reliability in modal parameters estimation, 27th International Modal Analysis Conference, Orlando, 2009.
- [27] Shepard, D.: A two-dimensional interpolation function for irregularly - spaced data, 23rd ACM National Conference, New York, 1962., pp. 517-524
- [28] Xing-jun, Q., Yue, Z., Qi, Z.: Numerical method for static load test of skew bridge based on modal deflection, *Journal of building science and engineering*, 37 (2020) 3, pp. 55-62
- [29] Qi, X.: Rapid test method and theoretical innovation of bridge based on impact vibration, Southeast University, 2017.