

Primljen / Received: 5.3.2018.

Ispravljen / Corrected: 11.7.2019.

Prihvaćen / Accepted: 10.8.2019.

Dostupno online / Available online: 10.6.2020.

Analiza inovativnog projekta mosta Liyutuo Lounge u Dujiangyanu

Autori:

^{1,2}Izv.prof.dr.sc. **Xianbin Huang**hxianbin@sicau.edu.cn

Autor za korespondenciju

^{1,2}**Chenyang Liu**, dipl.ing.grad.Cysc9495@163.com³**Yongding Tian**, dipl.ing.grad.tydseu1991@163.com^{1,2}**Chunyang Chen**, dipl.ing.grad.1428724458@qq.com¹**Jialin Xu**, dipl.ing.grad.201709960@stu.sicau.edu.cn⁴Mr.sc. **Jian Wu**, dipl.ing.grad.wujian_air@hotmail.com¹Agrikulturalno sveučilište u Sichuanu, Kina
Građevinski fakultet²Sečuanski visokoškolski inženjerski istraživački centar
za prevenciju katastrofa i ublažavanje gradnje sela³Sveučilište Southeast, Kina
Građevinski fakultet⁴Institut za hidroelektrane Chengdu za istraživanje i dizajn

Stručni rad

Xianbin Huang, Chenyang Liu, Yongding Tian, Chunyang Chen, Jialin Xu, Jian Wu

Analiza inovativnog projekta mosta Liyutuo Lounge u Dujiangyanu

U projektu mosta Liyutuo Lounge višekratna okvirna konstrukcija kombinirana je s masivnom konstrukcijom mosta, te je tako projektirana jedinstvena građevina dvostruke namjene. Prometni dio rasponske konstrukcije mosta je prednapeti kruti betonski okvir, kruto spojen sa stupom, nosačem i poprečnim nosačem koji se odlikuju tipičnim značajkama prednapete betonske konstrukcije i okvirne konstrukcije. Pri projektiranju temelja stupa, primjenjeno je naknadno injektiranje te kombinacija uzdužnih veznih greda kako bi se riješili problemi malog promjera pilota i velikog opterećenja.

Ključne riječi:

most Liyutuo Lounge, integracija, projekt konstrukcije, optimizacija, inovacija

Professional paper

Xianbin Huang, Chenyang Liu, Yongding Tian, Chunyang Chen, Jialin Xu, Jian Wu

Analysis of Innovative Structural Design of Liyutuo Lounge Bridge in Dujiangyan

According to its design, the Liyutuo Lounge Bridge combines a multilayer frame structure with a large bridge structure, offering a solution involving a unique dual-use structure. The transport layer of the superstructure is a prestressed concrete rigid frame, and the pier, girder, and cross girder, are rigidly connected, and have typical characteristics of a prestressed concrete bridge structure and frame structure. For the structural design of pier foundations, the post-grouting and a combination of longitudinal tie beams are used to solve the challenges associated with a small pile diameter and large loads.

Key words:

Liyutuo Lounge Bridge, integration, structural design, optimization, innovation

Fachbericht

Xianbin Huang, Chenyang Liu, Yongding Tian, Chunyang Chen, Jialin Xu, Jian Wu

Analyse des innovativen Brückenprojektes Liyutuo Lounge in Dujiangyan

Im Brückenprojekt Liyutuo Lounge wird die mehrstöckige Rahmenkonstruktion mit der massiven Brückenkonstruktion kombiniert, wodurch ein einzigartiges Gebäude mit doppeltem Verwendungszweck entsteht. Der Verkehrsteil der Spannweitenkonstruktion der Brücke ist ein vorgespannter starrer Betonrahmen, starr verbunden mit dem Pfeiler, dem Träger und dem Querträger, die sich durch typische Merkmale der vorgespannten Betonkonstruktion und der Rahmenkonstruktion auszeichnen. Bei der Planung des Pfeilerfundaments wurden nachfolgende Vergussarbeiten sowie eine Kombination der Längsverbindungs balken angewendet, um die Probleme des kleinen Pfeilerdurchmessers und der großen Belastung zu lösen.

Schlüsselwörter:

Brücke Liyutuo Lounge, Integration, Konstruktionsprojekt, Optimierung, Innovation

1. Uvod

U projektu mosta Liyutuo Lounge mogu se uočiti zanimljiva tehnička rješenja. Općenito uzevši, most je zamišljen kao integralna građevina koja se sastoji od višekratne okvirne konstrukcije i masivnog mosta. Kombinacija krute okvirne konstrukcije i prednapete konstrukcije mosta primjenjuje se u prometnom dijelu rasponskog sklopa. Profilirani čelik visoke čvrstoće, rebrasta armatura visoke čvrstoće i beton visoke čvrstoće zajedno se koriste u stupovima na razini donjeg ustroja. Osim toga, naknadno injektirani piloti i uzdužni nosači predviđeni su za ukrućenje temelja stupova. Ovakvim rasporedom riješene su poteškoće koje se odnose na velika opterećenja, dugačak raspon i male dužine pilota [1-5]. Kolnička ploča i nosači u skladu su s propisima za mostove i zgrade [6-9], a seizmičko projektiranje stupa okvira i glavnog nosača u skladu je s propisom za zgrade, te su verificirana s utjecaji graničnog katnog pomaka i gravitacijskog opterećenja te utjecaj potresa na projektiranu čvrstoću okvirne konstrukcije [10-12]. Ova jedinstvena dvonamjenska građevina odabrana je zbog sljedećih razloga. Prvo, ona je zamišljena u funkciji razvoja grada Dujiangyana, poznate turističke destinacije i grada bogate kulturne i povijesne baštine. Drugo, prema zahtjevima koji se odnose na otjecanje poplavnih voda, uzdužni razmak stupova iznosi 30 m, a širina uzvodne strane stupa ne bi smjela biti veća od 1,5 m. Treće, osim sila koje djeluju na konstrukciju, u obzir se pri projektiranju trebaju uzeti česti i snažni potresi [13]. Seizmički se zahtjevi nikako ne smiju zanemariti jer se most Liyutuo Lounge nalazi na 20 km od epicentra potresa Wenchuan ("5/12"). Također se u obzir treba uzeti i velika opasnost od erozivnog djelovanja s obzirom na to što je lokacija mosta udaljena samo 8,2 km od brane Zipingpu.

1.1. Opis mosta

Most Liyutuo Lounge nalazi se 1200 m uzvodno od mosta Qingcheng preko kojeg prelazi državna cesta G213 za Dujiangyan.

Prva razina mosta koristi se za cestovni i pješački promet, tj. kao prometni kolnik. Druga, treća i četvrta razina projektirane su po načelima stare pejzažne arhitekture s terasom – vidikovcem [14-16]. Most je prikazan na slici 1. Temeljno tlo na lokaciji mosta sastoji se od kvartarnih holocenskih nanosa (Q4me) i kvartarnih holocenskih riječnih diluvijalnih nanosa (Q4al+pl). Geotehnička karakterizacija tla, otpor na vrhu pilota i bočni otpor pilota prikazani su u tablici 1. Profil tla prikazan je na slici 2.



Slika 1. Prikaz mosta Liyutuo Lounge

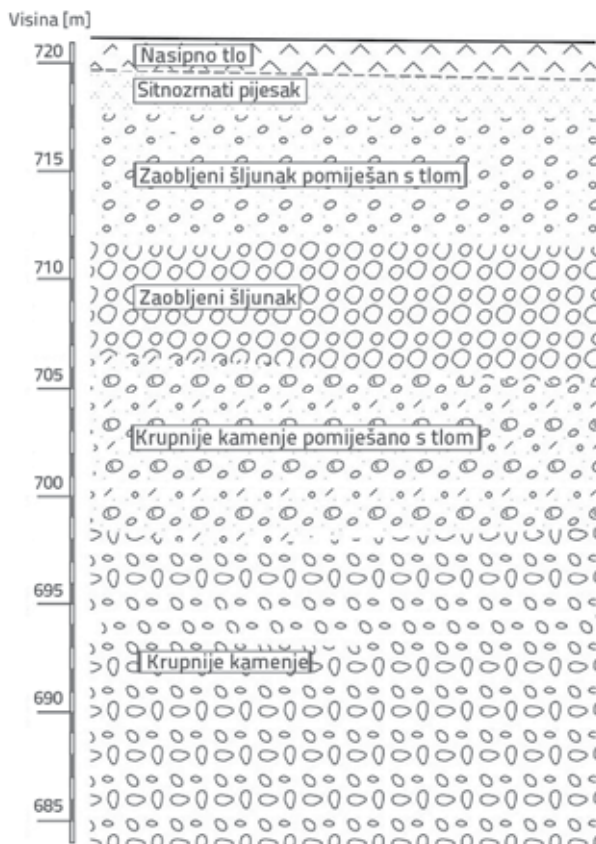
Vršna vrijednost stogodišnjih mjerodavnih velikih voda za most Liyutuo Lounge iznosi 3748 m³/s. Odgovarajuća razina mjerodavnih velikih voda iznosi 722,11 m, a uspora iznosi 0,28 m. Najniža razina glavnog mosta je 723,20 m, što je u skladu sa zahtjevima glede stogodišnjih mjerodavnih velikih voda. Prema rezultatima matematičkog modela, nakon izgradnje mosta, stogodišnje područje protoka smanjeno je za 5,0 %, maksimalna visina uspora iznosi 0,28 m, a maksimalna dužina uspora 460 m. Stoga se može reći da je na ovom projektu amplituda uspora mala te da malo utječe na razinu vode u kontekstu kontrole velikih voda.

Količina vučenog nanosa i lebdećeg nanosa u rijeci Jinma iznosi otprilike devet milijuna tona materijala godišnje. Većina tog nanosa posljedica je nailaska velikih voda rijeke Minjiang. Nakon izvođenja projekta zaštite voda Zipingpu bitno je smanjena

Tablica 1. Rezultati mjerenja

Oznaka	Geotehnički naziv	Debljina sloja [m]	Gustoća [kN/m ³]	Kut unutarnjeg trenja [°]	Dopuštena nosivost [kPa]	Standardna vrijednost granične bočne otpornosti pilota [kPa]	Standardna vrijednost granične otpornosti pilota na vrhu [kPa]
	Nasip	1,0-5,6	17,5	/	/	/	/
②	Sitnozrnati pijesak	0,4-1,2	18,5	20	110	40	/
③-1	Obluci pomiješani s tlom	1,5-10,0	20,0	28	180	100	/
③-2	Obluci	1,2-15,3	20,5	35	320	140	/
③-3	Blokovi pomiješani s tlom	1,5-13,9	21,0	40	550	200	3000
③-4	Blokovi	5,7-32,0	22,5	45	800	300	4000

koncentracija nanosnog materijala u rijeci, ali se ipak može očekivati erozija riječnog korita uslijed djelovanja velikih voda.

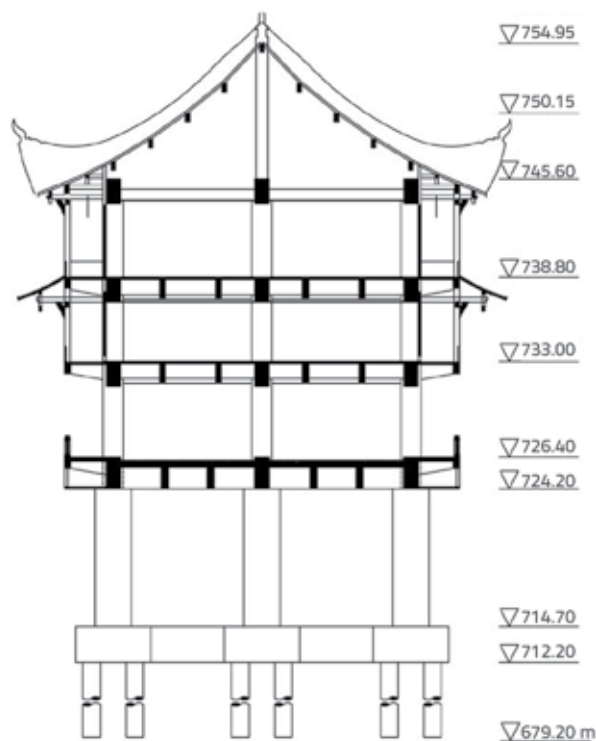


Slika 2. Geološki profil tla

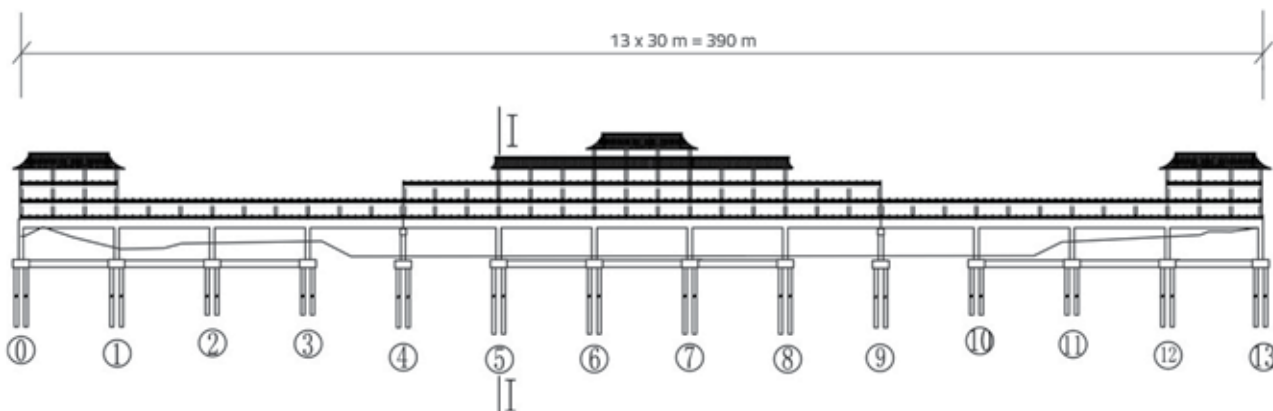
1.2. Dispozicija mosta

Broj i dužina raspona mosta Liyutuo Lounge je 13 x 30 m, a ukupna je dužina mosta 579,5 m. Glavni dio mosta dužine 391,5 m sastoji se od tri konstrukcijske cjeline, središnjeg te dva bočna dijela. Dimenzije središnjeg dijela iznose 5 x 30 m, od čega je srednji dio veličine 3 x 30 m zapravo monolitna konstrukcija

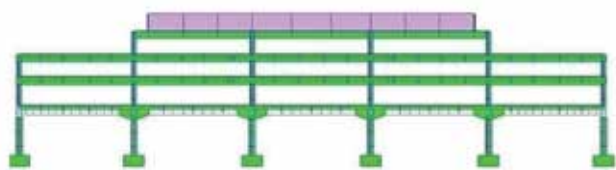
sastavljena od pilota i nosača. S jedne strane tog srednjeg dijela nalazi se kruti spoj, a s druge je strane izveden zglobovi spoj. Dimenzije bočnog dijela iznose 4 x 30 m, pri čemu se segment veličine 3 x 30 m sastoji od monolitnog sklopa pilota i nosača, dok je ostatak dijela monolitan na jednom kraju i zglobovno povezan na drugom (slike 3. i 4.). U ovom se radu analizira središnji dio. Model konstrukcije središnjeg dijela prikazan je na slikama 5. i 6. Konstrukcijski sustav ovog mosta osmišljen je kao prednapeti betonski kruti okvir, a glavni nosač je punostijena pravokutna greda od prednapetog betona. Stupovi mosta visoki su 8,5 m, osim rubnog stupa čija visina iznosi 5,4 m. Stupovi su u presjeku zaobljeni a u njima se koristi profilirani čelik. Temelji mosta sastoje se od naglavnicu pilota te skupine pilota. Vezne grede leže uzdužno i poprečno na naglavnicama pilota.



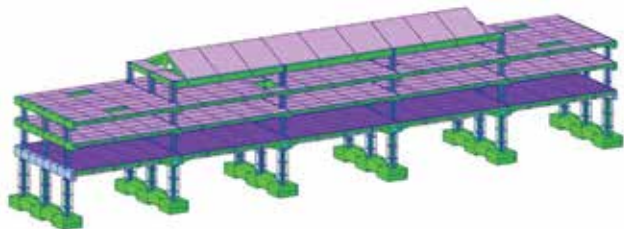
Slika 4. Poprečni presjek 1-1



Slika 3. Uzdužni profil glavnog mosta



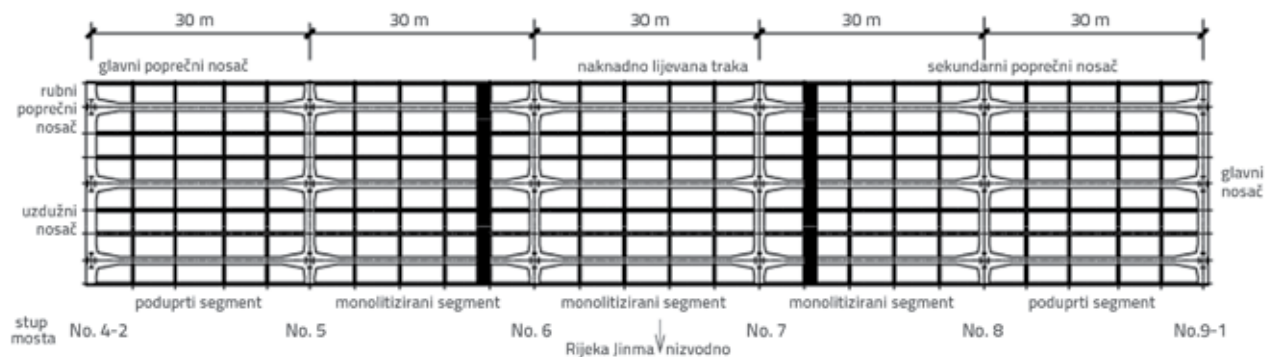
Slika 5. Pogled na model konstrukcije središnjeg dijela



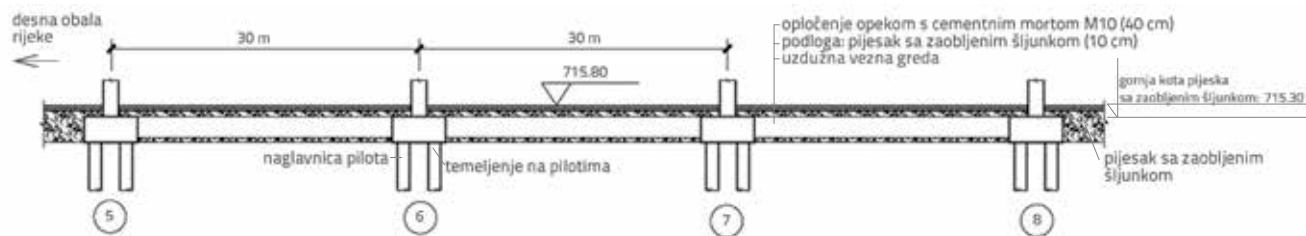
Slika 6. Bočni pogled na model konstrukcije središnjeg dijela

1.3. Oblikovanje rasponske konstrukcije

Na središnjem dijelu glavnog mosta koristi se sustav za lokalnu zaštitu od potresa. Taj se sustav sastoji od konzolnih greda kojima se može djelotvorno anulirati naprezanje uzrokovano temperaturnim promjenama, te koje mogu preuzeti horizontalne sile. Prometni dio rasponske konstrukcije sastoji se od prednapetog betonskog krutog okvira dimenzija 4 × 30 m + 5 × 30 m + 4 × 30 m. Raspored i konfiguracija glavnog nosača prikazani su na slikama 7., 11. i 12. Tri nosača položena su poprečno na pravac mosta, a uzdužne grede kolnika postavljene su između susjednih nosača. Glavna greda kruto je spojena sa stupom mosta, a glavna poprečna greda postavljena je na spoju između glavnog nosača i stupa mosta (slika 7.).



Slika 7. Raspored greda u prometnom koridoru mosta



Slika 8. Uzdužni presjek nasipavanja građevne jame za stupove (5 do 8)

Uzdužna greda kolnika i glavni nosači prednapregnuti su elementi u kojima je korišten čelik visoke čvrstoće i niske vrijednosti otpuštanja, dok su za bočne ležajeve korišteni nosivi protupotresni ležajevi tipa GQJZ17500ZX-e60. Oni su na slici 7. označeni crvenim točkicama.

2. Inovativna analiza donjeg ustroja

Glavni okvir mosta Liyutuo Lounge kompozitna je konstrukcija sastavljena od profiliranog čelika i armiranog betona. Glavni nosač rasponske konstrukcije leži na armiranobetonskim stupištima sastavljenima od po tri stupa ovalnog presjeka postavljenim u jednom redu. Vrh kruto spojenog stupa kruto je spojen s glavnim nosačem i poprečnom gredom rasponskog sklopa (slike 10. i 12.). Ovaj most nalazi se na rijeci Jinma, a uz tu rijeku izveden je i glavni odteretni kanal rijeke Mingjiang. Raspored otvora na mostu Liyutuo Lounge definiran je prema razini velikih voda rijeke Jinma (P = 1 %). Uzimajući u obzir zahtjeve za protok velikih voda koje je ispicao i odobrio Odbor za zaštitu rijeke Yangtze, definiran je uzdužni razmak stupova koji iznosi 30 m, a širina stupa na uzvodnoj strani ne smije biti veća od 1,5 m [17].

2.1. Oblikovanje temeljenja na pilotima

Piloti se izvode do dubine od 33 m, promjera su 1,2 m a izvode se od podvodnog betona klase C40. Očekivana vertikalna i horizontalna nosivost svakog pilota iznosi redom 33.000 kN i 2200 kN. Pri izvođenju svih pilota primjenjuje se tehnologija naknadnog injektiranja. Kako bi se provjerila nosivost temelja na pilotima, provedeno je statičko ispitivanje vertikalne nosivosti

pilota 3c2 i 3c4 na desnoj obali rijeke, a horizontalna nosivost ispitana je na pilotima s1, s2, 3c2 i 3c4, [18, 19].

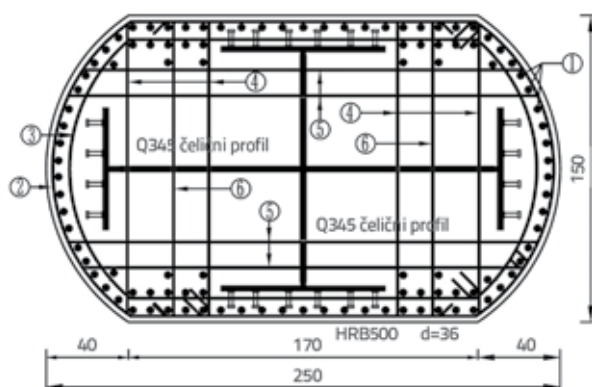
Uzdužne i poprečne vezne grede postavljene su na svakoj naglavnici pilota u uzdužnom i poprečnom smjeru. Uzdužna greda nosive platforme pravokutnog je poprečnog presjeka, a dimenzije joj iznose 0,85 m x 2,0 m (slika 8.). Metoda naknadnog injektiranja i montaže razupornih greda u svrhu povećanja nosivosti mosta smatra se jednim od inovativnih obilježja projekta donjeg ustroja mosta Liyutuo Lounge.



Slika 9. Raspored profiliranog čelika i armature stupa

2.2. Oblikovanje elementa stupa

Očekivana vertikalna i horizontalna opterećenja iznose 4×33.000 kN tj. 4×2200 kN. Visina krutog spojnog stupa iznosi 8,5 m, a u projektu stupova koriste se ovalni puni AB stupovi. Dimenzije stupova su 1,5 m x 2,5 m. Širina zaustavne površine iznosi 1,5 m. Horizontalni presjek i armatura stupova dužine 2,5 m prikazani su na slikama 9. i 10.



Slika 10. Armatura stupa (profilirani čelik Q345)

Izazovni problem s kojim su se suočili projektanti sastojao se u prikladnom raspoređivanju profiliranog čelika i velike količine armature po poprečnom presjeku ograničene veličine. Između ostalog, taj problem uključuje i određivanje odgovarajućih pozicija za armaturu i zaštitni sloj betona, te prihvatljivo doziranje profiliranog čelika i vertikalne armature u krutom spojnom stupu. Kako bi se riješili ti problemi, profilirani čelik Q345 i 40-milimetarske čelične ploče dvosmjerno su postavljeni

u horizontalni presjek stupova 6. i 7. Za svaki stup visine 8,5 m korišteni su sljedeći materijali: 24.987 kg profiliranog čelika, 11.653 kg vertikalne glavne armature HRB500 promjera 36 mm, 4916 kg poprečne armature HRB400 promjera 14 mm, $28,8 \text{ m}^3$ betona klase C50. Stupovi mosta monolitizirani su na spoju glavnog poprečnog nosača i glavnog nosača pomoću profiliranog čelika Q345, glavne armature HRB500 i betona klase C50 kako bi se poboljšala nosivost. Ta kombinacija profiliranog čelika, armiranobetonskog stupa i šestosmjernih čvorova (stupovi, glavna poprečna greda i glavni nosač) očita je inovacija ovog projekta.

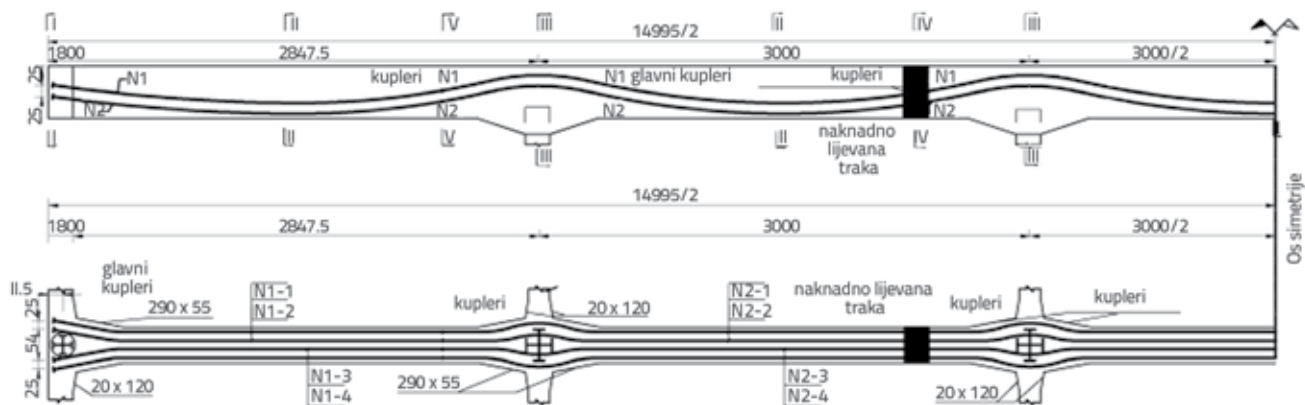
3. Inovativna analiza rasponske konstrukcije glavnog mosta

Prijenos sile na razini rasponske konstrukcije u središnjem dijelu glavnog mosta odvija se kako slijedi: grede u gornjem okviru, stup u gornjem okviru, ojačani spojevi okvira na kraju glavne poprečne grede i stupova. U glavnom nosaču kolničke konstrukcije sila se prenosi kako slijedi: kolnička ploča, sekundarna poprečna greda, uzdužna greda kolničke ploče, glavna poprečna greda, ojačani spojevi okvira na kraju glavne poprečne grede i stupovi donjeg okvira.

U projektu se istovremeno trebaju ispuniti zahtjevi normi za zgrade i normi za mostove. Kako bi se udovoljilo seizmičkim zahtjevima i osigurala odgovarajuća pouzdanost konstrukcije, u ovom je projektu korištena prednapeta konstrukcija bazirana na propisima o projektiranju mostova i prednapeti betonski okvir baziran na propisima za projektiranje zgrada. U rasponskom se sklopu ne koristi niti konstrukcija greda-most, koja uključuje prosto poduprtu gredu, kontinuiranu gredu i kontinuirani kruti okvir prema koncepciji projektiranja iz propisa o mostovima, niti armiranobetonsku okvirnu konstrukciju prema koncepciji projektiranja iz propisa o zgradama.

3.1. Oblikovanje glavnog nosača

Središnji dio sadrži glavne uzdužne nosače i sekundarne uzdužne nosače. Ukupno tri glavna uzdužna nosača izravno leže na glavnom poprečnom nosaču, dok su glavni uzdužni nosači, stupovi i glavni poprečni nosači kruto spojeni. Šest sekundarnih uzdužnih nosača leži izravno na glavnom poprečnom nosaču. Glavni se nosač odlikuje varijabilnim pravokutnim presjekom, a sastoji se od prednapete betonske konstrukcije s osam snopova od kojih svaki sadrži sedam prednapetih čeličnih užadi (slika 11.). Svaki čelični kabel uzdužno je zakrivljen u skladu s karakteristikama naprezanja, a tlocrtni raspored također je zakrivljen kako bi se postigao izmaknuti raspored profiliranog čelika Q345 u stupovima i kabelima na kraju nosača. S obzirom na kontinuirano temperaturno naprezanje i naprezanje uslijed skupljanja betona konstrukcije i ploče mosta, projektirane su dvije naknadno lijevane trake s poboljšanim svojstvima glede skupljanja betona. Te trake su široke 150 cm, a raspoređene su po središnjem dijelu. Kabeli svih glavnih nosača spojeni su



Slika 11. Raspored prednapetih kabela u glavnom nosaču

ovijenim kuplerima na poziciji naknadno lijevanih traka, dok su 32 kompleta kuplera raspoređena duž grede. Dvije uzdužne grede od prednapetog betona položene su paralelno s glavnim gredama mosta Liyutuo Lounge.

Oblikovanje glavnog nosača odlikuje se brojnim inovacijama. Osnovna inovacija je kombiniranje okvirne konstrukcije i prednapete betonske konstrukcije mosta. Glavni nosač učvršćuju spoj stupa i poprečne grede, tj. okvirnu konstrukciju. U prednapetoj betonskoj konstrukciji uzdužna čelična užad glavnog nosača odlikuje se dvosmjernim krivljenjem. Kako bi preuzela pozitivni moment na sredini i negativni moment na osloncu, čelična je užad zakrivljena prema dolje tj. prema gore. Glavne grede imaju kuplere za spajanje uzdužnih prednapetih kabela u području naknadno lijevane trake. Dio prednapetih kabela prolazi kroz profilirani čelik Q345 (slika 11.). Može se dakle zaključiti da je izuzetno teško projektirati i izvesti kruti spoj nosača s prednapetom armaturom.



Slika 12. Stup mosta, glavni nosač i glavni poprečni nosač

3.2. Oblikovanje središnjeg dijela glavnog mosta

Uzdužni čelični kabeli glavnog nosača savija se u oba smjera te se prisilno dijeli na naknadno lijevanim trakama (za spajanje se koriste kupleri). Uzdužni čelični kabeli prolazi kroz stupove i povezuje se vertikalnim profiliranim čelikom Q345 i glavnom vertikalnom armaturom HRB500. Montaža uzdužne čelične armature glavnih

nosača zahtjevan je zadatak. Stoga je bilo potrebno detaljno osmisliti plan montaže u fazi projektiranja. Izvođenje središnjeg dijela glavnog mosta provest će se u pet etapa:

Prva etapa: izvesti pilote, naglavnice pilota i glavne stupove, montirati skelu i odrediti visinu oplata. Zatim montirati oplatu i odrediti točke zavarivanja armature (npr. glavnu i poprečnu armaturu). Montirati dilatacijske spojnice i odgovarajuću užad. Na kraju, betonirati gredu pomoću betona C50 otpornog na skupljanje.

Druga etapa: Njegovati beton barem 14 dana kako bi se postigla stopostotna projektirana čvrstoća. Zatim prednapeti prvi segment prednapete armature te injektirati kabele cementnim mlijekom koje je otporno na skupljanje i ne sadrži klor. Spojiti kabele s elementom ML 15-7 rotiranjem oko ovijenog spojnog kuplera na kraju sidrišta te s odgovarajućim sidrom M15-7 na kraju nosača.

Treća etapa: Kontinuirano njegovati beton koji se nalazi na obje strane naknadno lijevane trake i to u vremenu od barem 42 dana. Obraditi spoj betona na prvoj naknadno lijevanoj traci. Betonirati prvu naknadno lijevanu traku betonom C55 otpornim na skupljanje, te njegovati svaku naknadno lijevanu traku barem 28 dana [20].

Četvrta etapa: Nakon 14-dnevne njege prve naknadno lijevane trake te nakon što beton postigne stopostotnu projektiranu čvrstoću, nanijeti opterećenje na drugi segment prednapetog čeličnog kabela i injektirati kabele cementnim mlijekom koje je otporno na skupljanje i ne sadrži klor. Zatim spojiti čeličnu užad s elementom ML 15-7 rotiranjem oko ovijenog spojnog kuplera na kraju sidrišta te nastaviti njegu prve naknadno lijevane trake u vremenu od najmanje 28 dana. Na kraju, obraditi spoj betona druge naknadno lijevane trake, te betonirati drugu stražnju traku betonom C55 otpornim na skupljanje. Naknadno lijevana traka treba se njegovati barem 28 dana.

Peta etapa: Nakon 14-dnevne njege druge stražnje trake te nakon što beton postigne stopostotnu projektiranu čvrstoću, nanijeti opterećenje na treći segment prednapetog čeličnog kabela i injektirati kabele cementnim mlijekom M50 koje je otporno na skupljanje i ne sadrži klor. Usidriti čeličnu užad na

kraju grede sidrom tipa ML 15-7 te zabrtviti spoj cementnim mlijekom M50 koje je otporno na skupljanje i ne sadrži klor.

U ovom se postupku građenja predlaže kontradiktoran mehanizam korištenja kontinuiranih kabela i naknadno lijevane trake u središnjem dijelu, tj. korištenje čeličnog kuplera užadi i betoniranje glavnih nosača i naknadno lijevanih traka prema redosljedu. Ovaj mehanizam omogućuje postizanje kontinuiranih karakteristika kabela te smanjenje temperaturnog naprezanja i naprezanja od skupljanja betona nakon postavljanja zadnje trake.

4. Rasprava

U oblikovanju mosta Liyutuo Lounge mogu se uočiti značajna inovativna rješenja. Naročito se to odnosi na višekratnu okvirnu konstrukciju koja se prvi put primjenjuje na masivnim mostovima. Osim toga, projekt konstrukcije sadrži više proračunskih modela te proračuna u više programskih paketa za provođenje elastične i elastoplastične analize konverzije temelja i višeraspanske kontinuirane konstrukcije od prednapetog čelika i armiranog betona (eng. *steel reinforced concrete* - SRC) pri djelovanju čestih potresa te pri rijetkim seizmičkim uvjetima.

Za temelje na pilotima karakterističan je mali promjer pilota i veliko opterećenje. Naknadno injektiranje provedeno je nakon formiranja pilota. Osim toga, uzdužne vezne grede inovativno su razmještene po naglavnica pilota. Kako su razmak stupova i uzdužne dimenzije poprečnog presjeka limitirane zahtjevima za zaštitu od poplava koje je formulirao Odbor za zaštitu rijeke Yangtze, poprečni presjek poprima oblik "luk + četverokut + luk" s krutim kosturom od profiliranog čelika Q345 i armaturnog čelika HRB500 promjera 36 mm.

Čitav konstrukcijski sustav projektiran da preuzme opterećenja vozilima ustvari je jedinstven kruti okvir izveden od prednapetog betona. Svaki od tri konstrukcijska segmenta glavnog mosta ima drugačije karakteristike. Središnji segment ima pet prednapetih raspona, od kojih tri imaju kruti spoj grede i stupa, dok su preostala dva raspona rubni rasponi koji su kruto spojeni na jednom kraju i zglobno spojeni na drugom.

U zaključku se može reći da je konstrukcijski sklop mosta Liyutuo Lounge prepun inovacija, izazova i uspješnih rješenja.

Zbog određenih složenih ograničenja, u oblikovanju konstrukcije mosta Liyutuo Lounge ipak su uočeni i neki nedostaci. Na prvom mjestu je težina gornjeg dijela konstrukcije, što se može vidjeti u rasponskom sklopu s kompozitnim okvirom od prednapetog betona. Isto tako, može se uočiti da je dno građevine lagano jer su za preuzimanje velikih vertikalnih i bočnih opterećenja korišteni kratki piloti malog promjera. Zbog zahtjeva koji su formulirani radi zaštite od poplava, širina stupa s uzvodne strane ne smije prelaziti 1,5 m. Stoga se može reći da nosivost stupova nikako nije dostatna [17]. Dimenzioniranje pilota i stupova na mostu Liyutuo Lounge zasniva se na horizontalnim seizmičkim djelovanjima. Proračun temelja zasniva se na sposobnosti preuzimanja vertikalnih opterećenja te na otpornosti na slijeganje. Osim velikog ekvivalentnog gravitacijskog

opterećenja rasponske konstrukcije, projektanti su u izradi projekta trebali obratiti veliku pažnju i na izraženu lokalnu eroziju korita rijeke na lokaciji temelja mosta, slabu otpornost pilota na horizontalna djelovanja, horizontalni pomak pilota te na horizontalnu nosivost pilota [21]. Iako su poduzete određene mjere u smislu poboljšanje pilota (npr. uključivanje uzdužnih veznih greda i uvođenje postupka naknadnog injektiranja), a stupovi su pojačani profiliranim čelikom Q345 i armaturom HRB500IV promjera 36 mm, te su mjere ipak nekonvencionalne, skupe i problematične u fazi izvođenja.

Kako riješiti te poteškoće na prikladan način? Autori smatraju da su se ti problemi možda mogli riješiti primjenom matematičkih modela te na temelju praktičkog iskustva. Svakako se može mnogo toga naučiti iz iskustva stečenog na mostu Qingcheng koji se nalazi nizvodno od mosta Liyutuo Lounge a izgrađen je prije 22 godine. Slijedeća dva aspekta mogu se kombinirati kako bi se riješile poteškoće i kontradikcije prisutne na ovom projektu.

4.1. Poboljšanje nosivosti pilota povećanjem promjera i dužine pilota

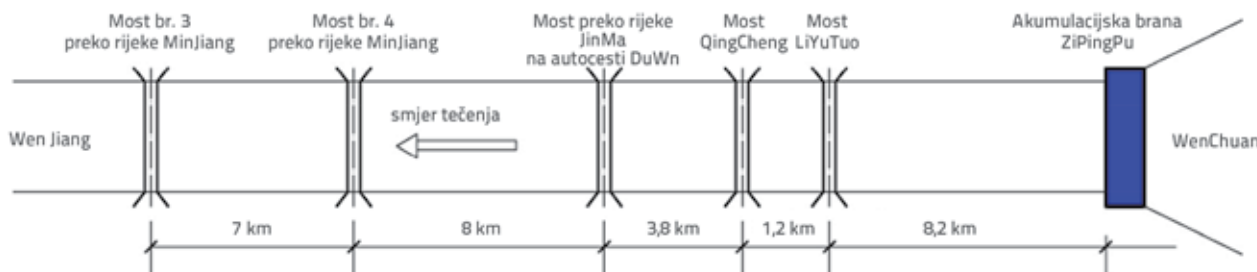
Piloti nisu u potpunosti otporni na djelovanje poplava. Promjer pilota na mostu Liyutuo Lounge iznosi 1,2 m, a dužina mu je 33 m. Kako bi se poboljšala nosivost pilota, mogu se poduzeti sljedeće mjere: podizanje klase betona na C40, primjena uzdužne vezne grede te naknadno injektiranje. Djelotvornost tih mjera može se provjeriti tek po isteku dužeg razdoblja nakon izgradnje mosta. Treba ovdje napomenuti da naknadno injektiranje pilota može negativno utjecati na udovoljavanje zahtjevima iz projekta. Stoga naknadno injektiranje nije idealno rješenje.

Prema projektu, temelji stupova 0-3 i 11-13 zatrpavaju se neporemećenim pijeskom do razine prirodnog tla. Kod stupova 4-10 u koritu rijeke Jinma tijekom godina se stanje stabiliziralo i ostvarena je sedimentacijska ravnoteža, ali su u vezi s nanosom uočene određene promjene na godišnjoj razini. Korito rijeke obloženo je lomljenim kamenom i mortom M10 do visine od 40 cm i to 15 m uzvodno i nizvodno od osi mosta (slika 8. i tablica 2.). Taj lomljeni kamen osigurava stabilnost konstrukcije mosta tj. smatralo se da je definirana dubina nasipavanja temelja mosta prikladna za rješavanje problema erozije. Nakon izgradnje brane Zipingpu, posve je narušena ravnoteža nanosa što je dovelo do erozije bez taloženja, a to je opet neizbježno uzrokovalo eroziju u rijeci Jinma nizvodno od akumulacije Zipingpu. Debljina nasipa kod stupova 5-8 u sredini korita iznosi 1,10 m. Čak i ako bi se površina korita jednostavno obložila, nije sigurno da bi to spriječilo eroziju zbog djelovanja vode iz sliva rijeke Minjiang tijekom ljeta i u razdoblju jakih kiša.

Most br. 3 preko rijeke Minjiang nalazi se 15 km nizvodno od mosta Liyutuo Lounge. Pronos vučenog nanosa je prekinut a lebdeći nanos se zadržava u akumulaciji Zipingpu, pa se tako bitno smanjuje koncentracija nanosa koji se pronosi rijekom Jinma. Erozija u koritu rijeke Jinma može se pogoršati u slučaju nailaska poplavnog vala, a treba napomenuti da i ilegalni rudnici također na određen način pridonose propadanju pilota. Dubina

Tablica 2. Debljina zasipa na mostu Liyutuo Lounge

Oznaka stupa	Debljina nosive platforme [m]	Donja razina nosive platforme [m]	Gornja razina zasipa ili obloge [m]	Debljina zasipa [m]	Napomena
0-3	2,0	712,70	720,00	5,30	Riječni nasip
4, 9	2,0	712,19	715,80	1,61	
5-8	2,0	712,70	715,80	1,10	
10-13	2,0	712,70	721,00	6,30	Riječni nasip



Slika 13. Shematski prikaz lokacije obližnjih mostova

erozije pilota na mostu br. 3 preko rijeke Mijiang iznosi 4,5-9,2 m u glavnom toku rijeke, a prosječna i maksimalna dubina erozije iznosi 6,9 m tj. 9,2 [22]. Istraživanja provedena u tom području pokazuju da maksimalna dubina erozije kod mosta Qingcheng, koji se nalazi 1,2 km nizvodno do mosta Liyutuo Lounge, iznosi više od 2,0 m. Osim toga, maksimalna dubina erozije kod mosta na rijeci Jinma, koji je smješten 5,4 km nizvodno od mosta Liyutuo Lounge, iznosi više od 2,0 m. Debljina nasipanog materijala kod uzdužnih veznih greda iznosi 1,61 m za stupove 4 i 9, tj. 1,10 m za stupove 5-8. Analiza erozije na nizvodnim mostovima pokazuje da postoji velik rizik od izravnog ugrožavanja uzdužnih veznih greda uslijed erozije generirane poplavnim valom. Ako uzdužne vezne grede ostanu nezaštićene uslijed erozivnog djelovanja, velike vode, vučeni nanos i lebdeći nanos izravno će podlokati uzdužne vezne grede zbog erozivnog djelovanja velikih voda u ljetnim mjesecima. Itekako su značajni i negativni efekti dodatne horizontalne sile uzrokovane erozijom. Nakon izvođenja mosta, trebat će se provesti dodatna motrenja i istraživanja utjecaja

dubine erozije i erozivnog djelovanja na uzdužne vezne grede. Očito je da su piloti na mostu Liyutuo Lounge podložni podlokavanju do kojeg dolazi zbog djelovanja velikih voda. Ukupna nosivost pilota znatno bi se poboljšala povećanjem promjera pilota na 1,5-2,0 m ili odgovarajućim povećanjem dužine pilota.

4.2. Smanjenje razmaka i povećanje veličine stupova na uzvodnoj strani radi poboljšanja nosivosti

Most Qingcheng izgrađen je 1994. godine a nalazi se 1,2 km nizvodno od mosta Liyutuo Lounge. Raspon mu iznosi 22,2 m, ima masivne temelje isto kao i masivni stup promjera 3 m (tablica 3. i slika 13.). Na temelju 21 godine korištenja mosta Qingcheng utvrđeno je da je kapacitet mosta u pogledu nailaska velikih voda u skladu sa zahtjevima.

Prema zahtjevima za otjecanje velikih voda koje je odobrio Odbor za zaštitu rijeke Yangtze, uzdužni razmak iznosi 30 m, a širina uzvodne strane stupa ne smije biti veća od 1,5 m. Prema

Tablica 3. Osnovni podaci o projektu mosta Liyutuo Lounge

Naziv projekta	Smještaj	Udaljenost [km]	Jedan raspon [m]	Promjer stupa [m]	Promjer pilota [m]	Godina dovršetka
Akumulacijska brana ZiPingPu	Uzvodno	8,2	/	/	/	2003.
Most Liyutuo	Analizirani most	0	30	Širina vododržive površine 1,5	Grupe pilota 1,5	2014.
Most Qingcheng	Nizvodno	1,2	22,2	Gravitacijski 3,0	Plitki temelji	1994.
Most Duwen Highway JinMaHe	Nizvodno	5	20	1,2	Jedan pilot 1,5	2009.
Treći most preko rijeke Mingjiang	Nizvodno	20	25	1,6	Jedan pilot 1,8	2009.
Četvrti most preko rijeke Mingjiang	Nizvodno	13	20	1,3	Jedan pilot 1,5	2005.

podacima prikazanima u tablici 3., raspon mostova smještenih nizvodno od mosta Liyutuo Lounge manji je od 30 m. U mostu Liyutuo Lounge arhitektura i mostovi spojeni su u izuzetno skladnu cjelinu. Ako se razmak stupova smanji s 30 m na 20 m, širina uzvodne strane mora se povećati ili se promjer stupa mora povećati s 1,5 m na 2,0 m. Te korekcije omogućuju sljedeće prednosti:

- pojednostavljuje se ukupan projekt konstrukcije
- zbog smanjenja vertikalnog i horizontalnog opterećenja temelja, iz projekta se mogu izbaci dva kompleksna zahvata, tj. naknadno injektiranje i gornja zaštita vezne grede
- zbog manjeg horizontalnog i vertikalnog opterećenja, ne treba se koristiti profilirani čelik Q345
- povoljnije rješenje spoja između stupa i glavnog nosača i krutih spojeva glavnih nosača
- povoljnije rješenje rasporeda izvođenja prednapetih kabela
- bitno se smanjuje cijena i vrijeme projektiranja i građenja.

5. Zaključak

Sljedeći se zaključci mogu donijeti nakon analize projekta konstrukcije mosta Liyutuo Lounge:

- U ovom se projektu po prvi put kombinira višekratna okvirna konstrukcija i masivni most te se uspješno rješava problem integracije arhitekture i konstrukcije mosta. Osim toga, na ovom se projektu inovativno koristi dvostrana konzolna podupora sa sustavom za lokalno ublažavanje vibracija.
- Prednapeti betonski okvir s krutom okvirnom konstrukcijom koristi se kao prometni kolnik u sklopu kolničke konstrukcije mosta. Stup, glavni nosač i glavni poprečni nosač kruto su spojeni, pa se tako ujedno postižu karakteristike i prednapete i okvirne konstrukcije.
- Razmak stupova i širina uzvodne strane stupa ograničeni su prema zahtjevima Odbora za zaštitu rijeke Yangtze. Nosivost mosta postignuta je primjenom spregnuto projektirane

konstrukcije s profiliranim čelikom visoke čvrstoće Q345, visokovrijednom armaturom HRB500 i betonom visoke čvrstoće C50.

- Zbog malog promjera pilota od samo 1,2 m i velikog opterećenja temelja, na mostu Liyutuo Lounge upotrebljava se beton C40, provodi se naknadno injektiranje te se primjenjuje kompozitni sastav uzdužnih veznih greda. Za naglavnice pilota s dvojnimi pilotima provedeno je ispitivanje vertikalne nosivosti i samoravnoteže, ispitivanje horizontalnog opterećenja jednog pilota te ispitivanje horizontalnog opterećenja. Uočene su brojne prednosti u projektiranju, istraživanju i građenju.
- Analizom nizvodnog mosta Qingcheng i nekoliko drugih mostova, utvrđeno je da bi se most Liyutuo Lounge mogao dodatno optimizirati smanjenjem razmaka između stupova, povećanjem promjera pilota, te reduciranjem problema na koje se naišlo pri projektiranju i građenju.

Na mostu Liyutuo Lounge uočene su brojne inovativne zamisli na razini ukupnog projekta, projekta rasponske konstrukcije i projekta pilota. Stoga se može zaključiti da je analiza projekta ovog mosta itekako korisna kao značajna podloga za projektiranje građevina za koje je karakteristična integracija arhitektonskih i konstrukcijskih rješenja.

Zahvala

Ovo je istraživanje provedeno uz podršku Državne zaklade za prirodne znanosti (potpore br. 51508358, 4167020785, 41502242), Centra za prevenciju i ublažavanje posljedica katastrofa u urbanim i ruralnim sredinama u okviru financiranja visokoškolskih projekata u Sichuanu (potpora br. CDPMV1403) i Sichuanske uprave za obrazovanje u okviru financiranja istraživačkih i inovacijskih projekata (potpora br. 16TD0006).

LITERATURA

- [1] Aref, J.E.: A Novel Fiber-Reinforced Composite Bridge Structural System, 1997.
- [2] Fabbrocino, F., Modano, M., Farina, I., Carpentieri, G., Fraternali, F.: Optimal prestress design of composite cable-stayed bridges. *Composite Structures*, pp. 167-172, 2017.
- [3] González-Vidosa, F., García-Segura, T., Martí, J., Yepes, V.: Heuristics in optimal detailed design of precast road bridges. *Archives of Civil & Mechanical Engineering*, 17 (2017) 4, pp. 738-749.
- [4] Rana, S., Islam, N., Ahsan, R., Ghani, S.N.: Application of evolutionary operation to the minimum cost design of continuous prestressed concrete bridge structure. *Engineering Structures*, pp. 38-48, 2013.
- [5] Smits, J.: Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands, *Architectural Challenges toward Innovative, Sustainable, and Durable Bridges*. *Engineering* (No.4), pp. 518-527, 2016.
- [6] Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts, JTG D62-2004, Ministry of Transport of the People's Republic of China, China Communications Press: Beijing, pp. 14-109, 2004.
- [1] Code for design of concrete structures, GB50010-2010, Ministry of Home and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, China Architecture & Building Press: Beijing, pp. 34-80, 2015.

- [7] Load code for the design of building structures, GB50009-2012. Ministry of Home and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, China Architecture & Building Press: Beijing, pp. 13-23, 2012.
- [8] Code for seismic design of buildings, GB50011-2010, Ministry of Home and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, China Architecture & Building Press: Beijing, pp. 67-137, 2010.
- [9] Akguzel, U., Pampanin, S.: Performance-Based Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Frame Buildings using Fibre-Reinforced Polymers: Challenges and Solutions. *Structural Engineering International*, 21 (2011) 3, pp. 260-270.
- [10] Elliott, K.S., Jolly, C.K.: *Multi-storey Precast Concrete Framed Structures*, 2011.
- [11] Sullivan, T.J.: Highlighting Differences between Force-Based and Displacement-Based Design Solutions for Reinforced Concrete Frame Structures, *Structural Engineering International*, 23 (2013) 2, pp. 122-131.
- [12] Parghi, A., Alam, M.S.: Seismic collapse assessment of non-seismically designed circular RC bridge piers retrofitted with FRP composites, *Composite Structures*, (2017), pp. 901-916.
- [13] Test Pile Design Drawing of Liyutuo Lounge Bridge, Jinma River, Dujiangyan, Sichuan, Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute Of SPC, pp. 1-10, 2011.
- [14] Main Bridge Construction Design Engineering Description of Liyutuo Lounge Bridge, Jinma River, Dujiangyan, Sichuan Chengdu. Hydroelectric Investigation and Design Institute Of SPC, pp. 1-22, 2011.
- [15] Geotechnical Engineering Survey Report of Liyutuo Lounge Bridge project, Jinma River, Dujiangyan, Sichuan, Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute Of SPC, pp.1-9, 2010.
- [16] Zhou, J.P.: Youth Forum Organizing Committee, Enterprise technology innovation and practice, China Water & Power Press, Beijing, pp. 645-651, 2012.
- [17] Huang, X.B., Wang, Z.L., Hou, S., Pu, H.: Horizontal Static Loading Test for Pile and Pile with Cap of Liyutuo Bridge. *Industrial Construction*, 45 (2015) 11, pp. 116-121.
- [18] Huang, X.B., Wang, X.Y., Pu, H., Hou, S.: Horizontal Static Loading Test for Pile and Pile with Cap of Liyutuo Bridge. *Industrial Construction*, 14 (2015), pp. 87-91.
- [19] Technical code for waterproofing of underground works, GB50108-2008. Ministry of Home and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, China Planning Press, Beijing, pp. 42-49, 2008.
- [20] Huang, X., Hou, S., Liao, M., Zhu, Z.: Bearing capacity evaluation and reinforcement analysis of bridge piles under strong earthquake conditions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22 (2018) 4, pp. 1-9.
- [21] Maintenance engineering construction design of Minjiang River Bridge NO.3. Sichuan Southwest Jiaotong University Civil Engineering Design Co, Ltd., pp. 2-18, 2013.