

Nove konstrukcije velikih montažnih lučnih mostova

Vinko Čandrlić, Silvija Mrakovčić, Marijan Skazlić

Ključne riječi

betonski lučni most, tehnologija izvedbe, montažni odsječci, vanjsko prednapinjanje, RPC – beton od reaktivnog praha vrlo visokih svojstava

Key words

concrete arch bridge, construction technology, prefabricated segments, external prestressing, RPC - superior-quality reactive powder concrete

Mots clés

pont en arc en béton, technique de construction, segments préfabriqués, précontrainte extérieure, RPC – béton à poudre réactive à ultra haute performance (BUHP)

Ключевые слова

бетонный арочный мост, технология строительства, монтажные отрезки, внешняя предварительная нагрузка, RPC – бетон из реактивного порошка

Schlüsselworte:

Betonbogenbrücke, Ausführungstechnologie, Montageteilstücke, äussere Vorspannung, RPC - Beton aus Reaktivstaub sehr hoher Eigenschaften

V. Čandrlić, S. Mrakovčić, M. Skazlić

Prethodno priopćenje

Nove konstrukcije velikih montažnih lučnih mostova

Opisani su konstrukcijski i tehnološki aspekti gradnje velikih lučnih mostova s montažnim odsječcima primjenom betona od reaktivnog praha. Odsječci se izrađuju betoniranjem sukladnih sljubnica, spajaju epoksidnim smolama i potom prednapinju vanjskim čeličnim šipkama samo na dijelu spojnica. Lukovi se izvode zrakastim ovješanjem konzola preko petnih stupova, a grede obostranim potiskivanjem bez klasičnog kljuna s istodobnim postavljanjem stupova s grede i reguliranjem visine nivelete.

V. Čandrlić, S. Mrakovčić, M. Skazlić

Preliminary note

New structures of large-span prefabricated arch bridges

Structural and technological aspects in the construction of large-span arch bridges, characterized by the use of prefabricated segments and reactive powder concrete, are described. Segments are realized by concreting corresponding joints, and are then linked with epoxy resins and prestressed with external steel bars but only in the joint zone. Arches are erected by radial suspension of cantilevers over abutment piers, while beams are realized by two-sided pushing without traditional nose, with simultaneous positioning of piers from the beam and regulation of the grade line.

V. Čandrlić, S. Mrakovčić, M. Skazlić

Note préliminaire

Nouvelles constructions des grands ponts en arc préfabriqués

L'article décrit les aspects constructifs et techniques de la construction des grands ponts en arc avec des segments préfabriqués en béton à poudre réactive. Les segments sont réalisés par bétonnage des joints conformes, ils sont assemblés par des résines époxy et précontraints ensuite par des tirants en acier extérieurs seulement au niveau des joints. Les arcs sont réalisés par suspension rayonnante des encorbellements sur les butées, et les poutres par poussage bilatéral sans avant-bec classique, avec mise en place simultanée des piles depuis la poutre et réglage de la ligne de niveau.

В. Чандрлич, С. Мраковчич, М. Сказлич

Предварительное сообщение

Новые конструкции больших монтажных арочных мостов

В работе описаны конструкционные и технологические аспекты строительства больших арочных мостов с монтажными отрезками применением бетона из реактивного порошка. Отрезки изготавливаются бетонированием соответствующих муфт, соединяются эпоксидными смолами и затем предварительно напрягаются стальными прутьями только на частях муфт. Арки выполняются лучистым подвесом консолей через пяточные столбы, а балки – двусторонним давлением без классического носка с одновременной постановкой столбов с балок и регулированием уровня проектной линии.

V. Čandrlić, S. Mrakovčić, M. Skazlić

Vorherige Mitteilung

Neue Konstruktionen grosser Montagebogenbrücken

Beschrieben sind konstruktive und technologische Aspekte des Bauens grosser Bogenbrücken mit Montageteilstücken, unter Anwendung von Beton aus Reaktivstaub. Teilstücke werden mit konformen Fugen betoniert, mit Epoxy-Harz verbunden und dann mit äusseren Stahlstäben nur im Bereich der Verbindungen vorgespannt. Die Bögen werden als Konsolen ausgeführt, strahlenartig am Widerlagspfeiler aufgehängt. Die Balken werden durch beiderseitigen Vorschub ausgeführt, ohne klassischem Schnabel und mit gleichzeitigem Aufstellen der Pfeiler vom Balken aus und Regulieren der Nivelethenhöhe.

Autori: Dr. sc. **Vinko Čandrlić**, dipl. ing. građ., redoviti sveučilišni profesor u mirovini; mr. sc. **Silvija Mrakovčić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci; **Marijan Skazlić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

1 Uvodno o stanju područja i cilju istraživanja

Prema sadašnjim podacima, od dvadesetpet najvećih betonskih lučnih mostova na svijetu samo su dva sagrađena od montažnih dijelova. To su Krčki most u nas i Gladesville u Australiji, koji se ujedno nalaze među prvih pet najvećih. Tako je most Gladesville bio najveći u razdoblju od 1964. do 1980., a most Krk od 1980. do 1996.

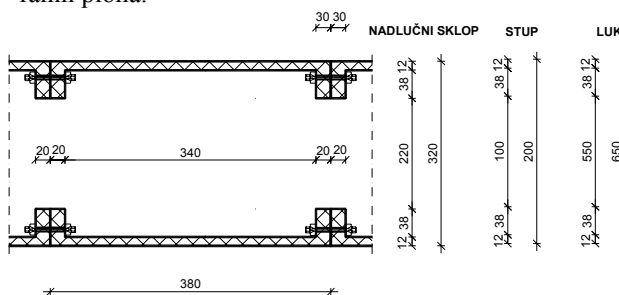
Primjenom betona od reaktivnog praha (RPC), novog gradiva 21. stoljeća vrlo visokih svojstava: veoma visokih tlačnih i vlačnih čvrstoća i velike duktilnosti i trajnosti stanje bi se moglo bitno promijeniti u korist montažnih mostova. Cilj istraživačkog rada [1], čiji se rezultati ovdje iznose u opširnijem obliku negoli u izlaganju [2], bio je stoga poraditi na tome i osmisлити i analizirati domišljaje novih izvornih konstrukcija i tehnologija gradnje velikih lučnih mostova raspona 200 - 500 m, koji bi se gradili s montažnim odsječcima od RPC - a. Bitni kriteriji ocjene uspjeha ovih domišljaja jesu: ponašanje konstrukcija po stadiju I betona, kvalitativne prednosti potpunog predgotavljanja tvorničkom izradbom svih dijelova konstrukcije mosta te jednostavnost njihova postavljanja i spajanja pri gradnji.

RPC je složeni beton izvrsnih svojstava s cementnom osnovom [3]. Zbog finoće zrna i reaktivnosti suhih komponenta materijal je nazvan betonom od reaktivnog praha (RPC – Reactive Powder Concrete). Tlačna mu se čvrstoća kreće u području 200 - 800 MPa, a u usporedbi s klasičnim betonom visokih svojstava – HPC - om, u RPC - u ukupna je poroznost 4 - 5 puta manja, mikroporoznost 10 - 30 puta manja, propusnost zraka i apsorpcija vode 50 puta manja te difuzija iona klora 25 puta manja, što je veoma značajno za mostove uz more [4]. RPC se može proizvoditi, ugrađivati i njegovati rabeći uobičajene postupke za klasični beton.

Prvi pokusi s RPC - om obavljani su i na Građevinskom fakultetu u Zagrebu 2000. godine i nastavljani po novom programu [5], [6], [7]. To se poglavito odnosilo na uporabu čeličnih vlakana debljine 0,2 mm, duljine 13 mm i čvrstoće 2600 MPa u količini 190 kg/m³ betona, koja djeluju kao šipke armature u odnosu prema veličini najvećeg promjera zrna od 0,8 mm. Konstrukcije od RPC - a tako su mikroarmirane pa je nepotrebna uobičajena pasivna armatura. Pri izradbi analiza u radu [1] uporabljena su najniža svojstva RPC - a i podaci o skupljanju i puzanju: tlačna čvrstoća je 200 MPa, svijajuća vlačna čvrstoća 40 MPa, modul elastičnosti 50 GPa, skupljanja betona u montiranoj konstrukciji nema, a puzanje iznosi 5% vrijednosti puzanja klasičnog betona. U najnovijim istraživanjima RPC - a koja su objavljena u nas u okviru rada [7] postignuta je najveća tlačna čvrstoća 189 MPa i najveća svijajuća čvrstoća 71 MPa.

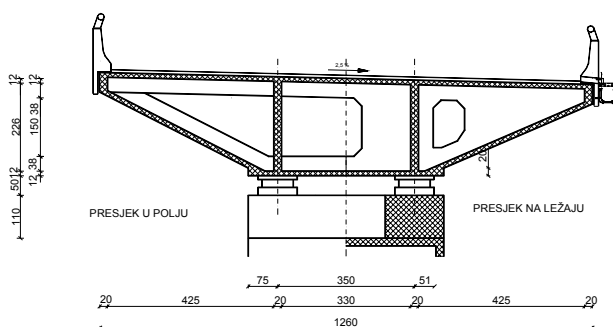
2 Poprečne i uzdužne dispozicije mostova raspona 200, 300, 400 i 500 metara

Jedino se temelji mosta, upornjaci i najviši stupovi na osloncima lukova betoniraju na mjestu gradnje. Montažni sandučasti odsječci nadlučnih sklopova, stupova i lukova modularne su duljine 3,80 m, izrađuju se u tvornici postupkom betoniranja sukladnih sljubnica, pri postavljanju na mostu međusobno se spajaju epoksidnim smolama i zatim prednapinju vanjskim čeličnim šipkama (slika 1.). Svaki odsječak porubljen je poprečnim nosačima da vitkost pojasnica debljine 12 cm bude 1/30 raspona. Konstruktivno rješenje odsječaka slično je onom u čeličnim mostovima, samo su ovdje odsječci geometrijski jednostavniji jer nema uzdužnih ukruta, a i spajanje je lakše i preciznije jer se obavlja lijepljenjem konjugiranih ploha.



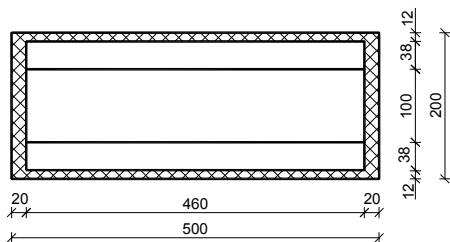
Slika 1. Djelomični uzdužni presjek triju osnovnih oblika odsječaka

Nadlučni sklop (greda) trodijelni je sanduk trapezasta oblika tako da su toplinski uvjeti na kolničkoj ploči zimi jednaki na cijelom mostu. Visina mu je 2,50 m pa je omogućena prohodnost kroz sva tri otvora sanduka. Odnos visine i raspona jest 1/12, (2,50/30,40) što je optimalno za izvedbu potiskivanjem. Između odbojnih ograda kolnik je na mostu širok 12,0 m s voznim trakom 7,5 m, zaustavnim trakom 2,5 m i sa dva rubna zaštitna traka do ograda po 1,0 m tako da je to most ujedno za jednosmjerni promet na autocesti i dvosmjerni promet na cesti najvišeg razreda (slika 2.). Težina karakterističnog odsječaka grede je 525 kN.



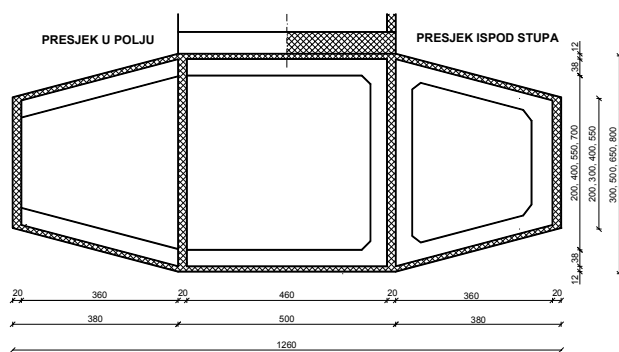
Slika 2. Poprečni presjek grede

Stupovi nadlučnog i prilaznog sklopa jednodijelni su sanduci četvrtasta oblika čija je težina 216 kN (slika 3.).



Slika 3. Poprečni presjek stupova

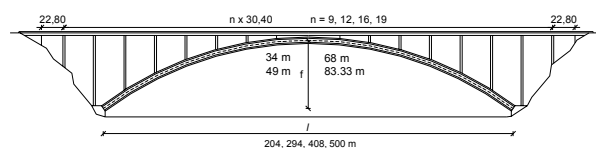
Lukovi su trodijelni sanduci aerodinamična osmerokutna oblika, kojih se visina poprečnog presjeka na srednjem dijelu sanduka, na kojem se oslanjaju stupovi, kreće unutar uobičajenih granica 1/40 - 1/70 raspona luka, a jednake su širine kao i greda. Odsječci luka raspona 200 m teški su 554 kN, 300 m 683 kN, 400 m 790 kN i 500 m 912 kN (slika 4.).



Slika 4. Poprečni presjeci lukova raspona 200, 300, 400 i 500 m

Uzdužne dispozicije mostova odabrane su na sljedeći način. Rasponi greda zadane visine 2,50 m ovise o izvedbi potiskivanjem i o modularnoj dužini odsječka i za srednja su polja $8 \cdot 3,80 = 30,40$ m, a za krajnja $6 \cdot 3,80 = 22,80$ m. Za sva četiri luka uzeto je da imaju uobičajenu srednju spljoštenost $f/l = 1/6$, da je i u slučaju neparnog i parnog broja raspona greda odvojena od luka pri tjemenu za visinu ležaja i jastuka (1,60 m), te da je os luka odabrana po složenoj paraboli 4. stupnja, tako da su svijajući momenti za stalno opterećenje neznatni.

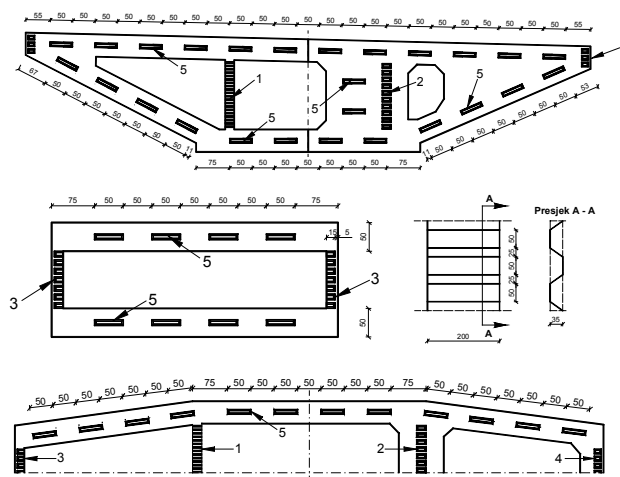
Uzevši u račun točne udaljenosti između osi petnih stupova zavisne od određenog broja modularnih raspona greda (30,40 m), te oduzevši od njih potrebne razmake između osi petnih stupova i osi lukova na upornjacima, dobiva se da je pri nazivnom rasponu luka 200 m stvarni raspon 204 m sa strjelicom 34 m, pri nazivnom rasponu 300 m stvarni raspon 294 m sa strjelicom 49 m, pri nazivnom rasponu 400 m stvarni raspon 408 m sa strjelicom 68 m i pri nazivnom rasponu 500 m i stvarni raspon 500 m sa strjelicom 83,33 m (slika 5.).



Slika 5. Uzdužna dispozicija lučnih mostova raspona 200, 300, 400 i 500 m

3 Nova integralna tehnologija izvedbe velikih lučnih mostova

Montažni odsječci izrađuju se u tvornici postupkom betoniranja konjugiranih spojnika i da bi se pri postavljanju na mostu mogli međusobno slijepiti epoksidnim smolama i potom prednapeti vanjskim šipkama, potrebno je na spojnica izraditi zupce za prihvat poprečnih sila u vrijeme postavljanja odsječaka prije no što ljepilo polimerizira. Zavisno od položaja u poprečnom presjeku (srednji i vanjski hrbat, poprečno rebro i dijafragma), na spojnica odsječaka grede, stupova i lukova izrađuje se pet tipova zubaca (slika 6.).

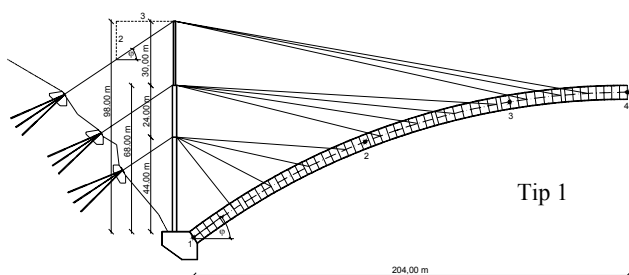


Slika 6. Tipovi i raspored zubaca u odsječcima grede, stupa i lukova

U novoj integralnoj tehnologiji izvedbe velikih lučnih mostova od montažnih odsječaka, koja se cjelovito prvi put prikazuje u radu [1], lukovi se uvijek grade zrakaštim ovješanjem konzola preko petnih stupova, pa se stoga betoniranjem u prijenosnoj oplati uz uporabu toranj-skih dizalica prvo grade petni stupovi (slika 7.). Dizalica s kojom se postavljaju odsječci kreće se po luku i zavisno od prepreke koja se premošćuje, odsječci se doplovljavaju teglenicom ispod mosta, podižu i postavljaju, ili se dovoze po izgrađenom prilaznom sklopu do petnog stupa, spuštaju na petu luka, prevoze po luku i postavljaju. Svaki dan se postavlja po jedan lučni odsječak sa svake strane konzole. Postupno s napredovanjem radova konzola luka duga do šest duljina odsječaka prvo se prihvaća vanjskim prednapetim šipkama unutar poprečnog pres-

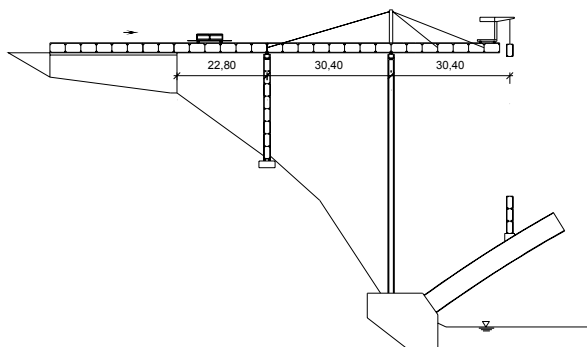
jeka luka, a tek potom vješaljka i zategama. Ovisno o rasponima lukova u promatrana četiri slučaja, zrakasto obrazovane vješaljke na luku i usporedne zatege koje se sidre u tlo s druge strane postavljaju se na luku raspona 200 m u jednoj razini na vrhu petnog stupa, na luku raspona 300 m u prvoj razini na vrhu stupa i u drugoj razini na vrhu pomoćnog čeličnog pilona, na luku raspona 400 m u prvoj i drugoj razini na stupu i u trećoj razini na vrhu pomoćnoga čeličnog pilona (slika 7.) te na luku raspona 500 m isto u tri razine.

Sile u zategama i petnim stupovima izračunane su za sva četiri luka na pojednostavljen način. Horizontalna sila pridržanja konzole na luku raspona 200 m $H = 25$ MN, ukupna pridržajna horizontalna sila na luku raspona 300 m $\Sigma H = 35$ MN, na luku raspona 400 m $\Sigma H = 70$ MN i na luku raspona 500 m $\Sigma H = 90$ MN. Isto tako pojednostavljeno izračunane su i sile u Bakarskom luku [1] i uspoređene s točnijim izračunom [8] da bi se dobio približan uvid u pogreške pojednostavljenog načina.



Slika 7. Gradnja luka raspona 400 m zrakastim ovješanjem konzole

Da bi luk bio simetrično opterećen, nadlučni sklop gradi se istodobnim potiskivanjem s dviju strana mosta bez uporabe čeličnih kljunova, jer njihovu zadaću preuzimaju konzole grede pridržane zategama preko privremenih čeličnih pilona (slika 8.).



Slika 8. Gradnja nadlučnog sklopa potiskivanjem uz istodobno postavljanje stupova

Odsječci nadlučnog sklopa sastavljaju se, slijepaju i prednapinju u potisnoj stanici iza upornjaka u duljinama čitavih raspona polja i potom potiskuju, a postavljanje stupova obavlja se dizalicom s konzole grede (kljuna).

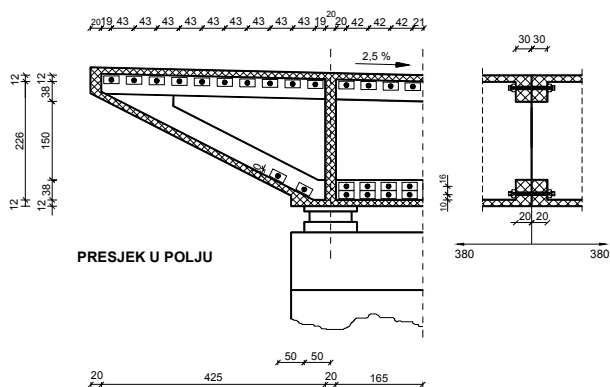
Po tehnologiji koja je analizirana i predložena, u tjednim taktovima postavlja se s obje strane mosta po jedno polje grede skupa sa stupom. Grede će se tijekom potiskivanja deformirati poradi deformacija luka unatoč proračunskom nadvišenju luka, pa je u svakom taktu treba sustavno i stalno rektificirati. Izravnanjem progiba podizanjem grede s pomoću hidrauličnih preša održava se oblik nivelete i ostvaruju predviđeni momenti za izvedbu potiskivanjem, kao na kontinuiranoj gredi na nepopustljivim osloncima.

4 Pojednostavljeni proračun sila i naprezanja u osnovnim dijelovima nosivih sklopova

Pojednostavljenom analizom sila može se dobiti osnovni uvid u stanje naprezanja u glavnim dijelovima nosivih sklopova. To se poglavito odnosi na stanje naprezanja od osnih tlačnih sila u petama promatranih lukova gdje su ova naprezanja najveća i mjerodavna. Na osnovi radova [9] i [10] takva pojednostavljena analiza sila i naprezanja obavljena je za montažne lučne mostove od HPC-a već u izvornom znanstvenom radu [11], te kasnije i za luk Bakarskog mosta [1], i uspoređena je s točnijom analizom [12]. Kako u vrijeme izradbe prethodnih studija i napose rada [1] nije još bilo nikakvih norma za proračun konstrukcija od RPC – a (prve francuske preporuke za betone vrlo visokih svojstava armirane vlaknima tek su odnedavno u optjecaju) svi izračuni konstrukcija obavljani su na osnovi dopuštenih naprezanja kao u prednapetom betonu, jer su ove konstrukcije koncipirane tako da se isto ponašaju po stadiju I betona. Dopuštena naprezanja uzeta su pritom u vrijednosti $1/3$ normne čvrstoće f_{ck} . Da bi se identičan izračun uradio po graničnim stanjima nosivosti, pri globalnom koeficijentu sigurnosti 1,8 za djelovanja, računaska čvrstoća betona treba biti $f_{cd} = 1,8/3 f_{ck} = 0,6 f_{ck}$, što je prihvatljiva vrijednost.

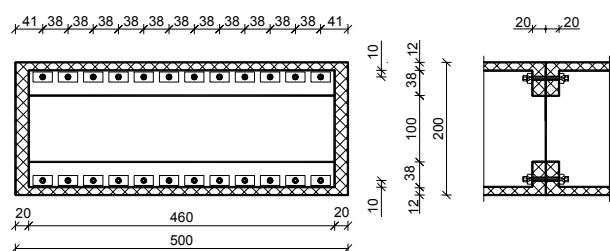
Zbog sličnosti oblika poprečnog presjeka Bakarskog luka i poprečnih presjeka analiziranih lukova, te zbog jednakih spljoštenosti lukova $f/l = 1/6$, pretpostavljeno je da će odnos između najvećih rubnih stvarnih tlačnih naprezanja i najvećih osnih stvarnih naprezanja na sva četiri promatrana luka biti približno isti kao na Bakarskom luku. Tamo je taj odnos ≈ 2 . Kako su dopuštena rubna tlačna i vlačna naprezanja za osnovno opterećenje uzeta u vrijednosti $1/3$ normne tlačne čvrstoće 200 MPa i normne svijajuće vlačne čvrstoće 40 MPa, dopušteno osno naprezanje za pojednostavljenu analizu promatranih lukova jest $\approx 1/6$ tlačne čvrstoće. Najveća osna tlačna naprezanja pojavljuju se tako u peti luka raspona 500 m i iznose $29,05 \text{ MPa} < 200/6$ ($33,33 \text{ MPa}$).

Točnija analiza kolničke ploče i poprečnih nosača, grede i najvišeg stupa na luku uključujući i faze građenja, izvršena je isto po linearnoj teoriji, stadiju I betona i do



Slika 9. Raspored prednapetih šipki ϕ 36 mm na spojevima odsječaka grede

puštenim naprezanjima. Najveća vlačna naprezanja u kolničkoj ploči su $12,88 \text{ MPa} = 40/3,10$ i u poprečnim nosačima $13,21 \text{ MPa} = 40/3,02$, a u gredi $8,41 \text{ MPa} = 40/4,76$ i najvišem stupu. Količine vanjskih prednapetih čeličnih šipki ϕ 36 mm u spojnicama odsječaka grede (slika 9.) i odsječaka stupova (slika 10.) određene su iz uvjeta da su svi spojevi na mostovnim sklopovima uvijek stlačeni i da su najmanja tlačna naprezanja u slijep-ljenim spojnicama $1,5 \text{ MPa}$.



Slika 10. Raspored prednapetih šipki ϕ 36 mm na spojevima odsječaka stupa

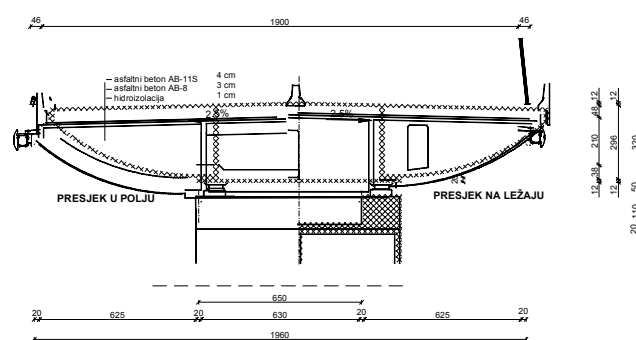
5 Točniji proračun sila i naprezanja na primjeru Bakarskog mosta

Tijekom 2001. i 2002. godine o Bakarskom je mostu izlagano na Brijunima [13], u Bergenu [14], Parizu [15] i Osaki [16], [17], pa će stoga ovdje biti samo ukratko iznijeti neki osnovni podatci o projektu i njegovu poboljšanju u radu [1]. Gradnjom mosta, put cestom koja obilazi Bakarski zaljev spuštajući se pritom i dižući 100 m, skratio bi se za 7 km i izbjegao taj izgubljeni pad. Luk mosta raspona je 432 m sa strjelicom 72 m pa mu je spljoštenost $f/l = 1/6$. Nadlučni sklop kontinuirana je greda preko 22 polja duljine $30+20\cdot 38+30$ m što ukupno je 820 m (slika 11.).

Radi izvedbe potiskivanjem prvotni poprečni presjek grede izmijenjen je povećanjem visine njezina srednjeg dijela u obliku stepenice od 0,20 m (slika 12.).

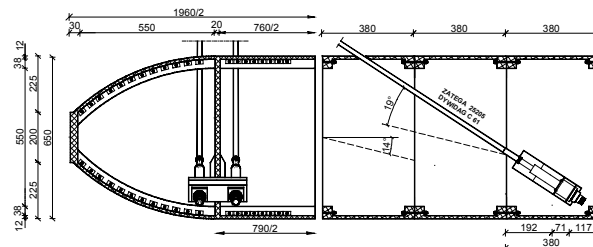


Slika 11. Simulacija Bakarskog mosta računalom



Slika 12. Poprečni presjek grede Bakarskog mosta

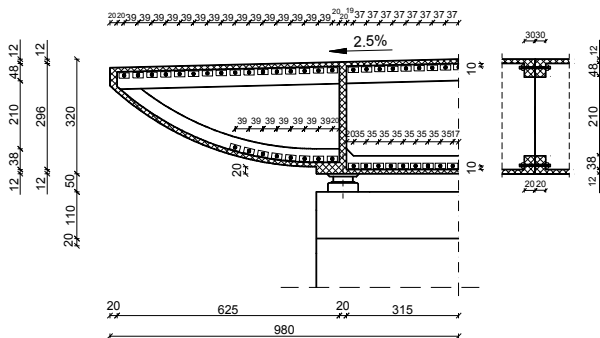
Sandučasti odsječci grede, stupova i luka isto su modularne duljine 3,80 m i izrađuju se, montiraju i spajaju na identičan način kao u četiri prije opisana mosta. Odsječci luka prihvaćaju se vješaljka i zategama u tri razine poput onih na slici 7. Po točnom proračunu [8] ukupna horizontalna pridržajna sila ne djeluje istodobno u sve tri razine i iznosi $\Sigma H = 88 \text{ MN}$, dok po približnom proračunu djeluje istodobno [1] i jednaka je $\Sigma H = 78 \text{ MN}$. Približni proračun uvijek daje manje ukupne vrijednosti sila, jer se po točnom proračunu, zbog krutosti luka, vješaljke i zatege u višim razinama aktiviraju i za prijenos opterećenja nižih razina. Na slici 13. prikazani su detalji sidrenja vješaljki u luku i spajanja odsječaka luka prednapetim šipkama.



Slika 13. Sidrenje vješaljki u luku i spajanje odsječaka prednapetim šipkama ϕ 36 mm

Točnija analiza kolničke ploče i poprečnih nosača i gređa, uključujući i faze njezina građenja konzolnim načinom polje po polje [18] po postupku Mathivata [19] uz istodobno postavljanje stupova, te analiza luka, obavljena je po linearnoj teoriji, stadiju I betona i dopuštenim naprezanjima u radu [12], a grede uključujući i faze građenja potiskivanjem uz istodobno postavljanje stupova i reguliranje visine nivelete, te najvišeg stupa na luku, obavljena je u radu [1]. Pri izvedbi nadlučnog sklopa polje po polje po postupku Mathivata konačne vrijednosti momenata od vlastite težine na ležajevima i u poljima grede su $M_{min} = g \cdot l^2/19$ i $M_{max} = g \cdot l^2/14$ [18], a pri izvedbi potiskivanjem, koje je usvojeno kao racionalniji postupak, konačni momenti na ležajima i u poljima jesu $M_{min} = -g \cdot l^2/12$ i $M_{max} = g \cdot l^2/24$. Izravnjanjem progiba podizanjem nadlučnog sklopa s pomoću hidrauličnih preša održava se oblik nivelete i ostvaruju željeni momenti kao u kontinuiranoj gredi na nepopustljivim osloncima.

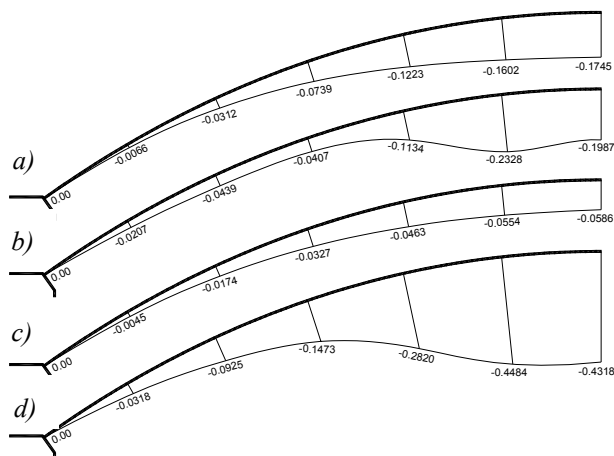
Najveća su vlačna naprezanja u kolničkoj ploči 15,30 MPa = 40/2,61 i u poprečnom nosaču 15,69 MPa = 40/2,55 pa pri odabranim izmjerama ploče i nosača valja normnu svijajuću čvrstoću povećati od 40 na 50 MPa. Najveća vlačna naprezanja u gredi su 10,40 MPa = 50/4,81, a u najvišem stupu 7,63 MPa = 40/5,24. Količine vanjskih prednapetih čeličnih šipki ϕ 36 mm u spojnicama odsječaka grede (slika 14.) i odsječaka stupova određene su i ovdje iz uvjeta da su svi spojevi montažnih sklopova uvijek stlačeni i da su najmanja tlačna naprezanja u slijepjenim spojevima 1,5 MPa.



Slika 14. Raspored prednapetih šipki ϕ 36 mm na spojevima odsječaka grede

Najveće tlačno naprezanje u luku pojavljuje se pri petama luka i za djelovanje vlastite težine i stalnog tereta, prometnog opterećenja, vjetrova i temperature jest 67,35 MPa = 200 · 1,15/3,41, a za djelovanje vlastite težine i stalnog tereta, 50% prometnog opterećenja, 50% vjetrova, temperature, utjecaja puzanja i potresa jest 64,86 MPa < 67,35. Najveće vlačno naprezanje pojavljuje se također pri petama luka i iznosi 10,61 MPa = 40/3,77, uz istodobno najveći ostvareni tlak od 67,35 MPa. Odnos tih naprezanja je $\approx 1/6$, što je povoljno jer je vlak manji od

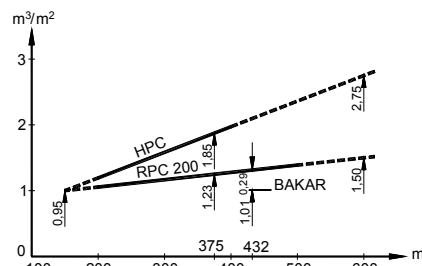
1/4 ostvarenog tlaka. Izračunani su i progibi luka od vlastite težine, težine nadlučnog sklopa u konačnom stanju te zbog puzanja betona (slika 15.). Ukupni najveći progibi luka od svih navedenih utjecaja je 44,84 cm, pa je odnos progiba i raspona približno 1/1000 raspona luka, što je u skladu s odnosima za betonske sklopove. Luku se pri izgradnji daje nadvišenje u iznosu veličina progiba kako bi nakon pomaka od navedenih djelovanja došao u proračunski položaj.



Slika 15. Progibi luka u m: a) od težine luka, b) od težine grede - konačno stanje c) od puzanja betona, d) ukupni progibi

6 Količine betona po m^2 tlocrta mostova

Na osnovi podataka iz rada [11] određene su količine betona po m^2 tlocrta montažnih lučnih mostova od klasičnog betona (HPC-a), a na osnovi podataka iz rada [1] određene su isto takve količine betona od reaktivnog praha (RPC-a). Te količine odnose se na lučne dijelove mostova, a određene su tako, da su ukupne količine betona lukova različitih raspona, pripadajućih im stupova i dijelova gređa, podijeljene s umnoškom raspona lukova i konstruktivnih širina gređa na kolniku. Rezultati su prikazani u obliku dvaju dijagrama (slika 16.).



Slika 16. Dijagrami količina betona po m^2 tlocrta

Na apscisi su označeni rasponi lukova u m, a na ordinati količine betona u m^3 po m^2 tlocrta. Dijagrami imaju pravce različitih nagiba sa sjecištem na mjestu lukova raspona 150 m. Pri rasponu lukova 375 m količine HPC-a veće su od količina RPC-a za 50% i to se može uzeti kao

donja ekološka granica primjene montažnih lučnih mostova od RPC-a, jer ovi betoni u svom sastavu zahtijevaju 50% veće količine cementa od klasičnog betona, a time i veću emisiju stakleničkog plina pri proizvodnji cementa. Na primjeru Bakarskog mosta potom se na dijagramu vidi da široki lučni mostovi zahtijevaju 30% manji utrošak betona po m^2 od uskih mostova.

Kod uskih grednih mostova od HPC – a utrošak betona grede je $0,488 m^3/m^2$ tlocrta, kod uskih grednih mostova od RPC – a $0,439 m^3/m^2$, a kod širokih grednih mostova od RPC – a $0,386 m^3/m^2$ [20].

7 Zaključni naglasci i promišljanje budućega

- Cjelovito su osmišljene i analizirane nove izvorne konstrukcije i tehnologije gradnje velikih montažnih lučnih mostova u RPC – u, betonu od reaktivnog praha vrlo visokih svojstava armiranom vlaknima.
- Beton od reaktivnog praha visoke tlačne čvrstoće 200 do 800 MPa, najniže svijajuće čvrstoće 40 MPa i velike duktilnosti, osobito je prikladan za izradbu predgotovljenih odsječaka velikih mostova. Proizvodi se, ugrađuje i njeguje na isti način kao i klasičan beton visokih svojstava (HPC), ali ima znatno bolja svojstva trajnosti, što je veoma značajno, a za mostove uz more.
- Analizirana je gradnja mostova pet različitih funkcionalnih oblika poprečnog presjeka predgotovljenih odsječaka: lučnih osmerokutnih trodijelnih sanduka, stupnih četverokutnih jednodijelnih ili dvodijelnih sanduka, grednih trapezastih trodijelnih sanduka te lučnih i grednih aerodinamično oblikovanih trodijelnih sanduka.
- Mostovi se grade izvornim postupkom: lukovi sa zrakastim ovješanjem konzola preko petnih stupova, a nadlučni sklopovi obostranim potiskivanjem bez klasičnog kljuna s istodobnim postavljanjem stupova s nadlučnog sklopa i reguliranjem visine nivelete.
- Pojednostavljena analiza lukova raspona 200, 300, 400 i 500 m, točnija analiza stupova i nadlučnog sklopa te točnija analiza Bakarskog mosta, uključujući i faze građenja, obavljani su po linearnoj teoriji, stadiju I betona i dopuštenim naprezanjima, kao u konstrukcija od prednapetog betona.

IZVORI

[1] Mrakovčić, S.: *Montažni lučni mostovi u betonu od reaktivnog praha*, Magistarski rad, Zagreb 2001.

[2] Mrakovčić, S., Bjegović, D., Bleiziffer, J., Čandrić, V.: *Veliki montažni lučni mostovi od betona RPC200*, Interdisciplinarno znanstveno – stručni simpozij Graditeljstvo i okoliš HDGK, Brijuni 2002.,

- Određene su količine betona po m^2 tlocrta lučnih dijelova mostova od HPC – a i RPC – a i prikazane u obliku dvaju linearnih dijagrama s različitim nagibima pravaca.
- Rezultati istraživanja pokazali su da se domišljajima novih konstrukcija i tehnologija u gradnji velikih montažnih lučnih mostova radovi mogu potpuno industrijalizirati, ubrzati i racionalizirati. Zatim, rezultati se mogu uporabiti kao podloga za izradu propisa, preporuka i nuputaka za projektiranje i građenje novih mostovnih konstrukcija od RPC –a, a otvaraju se i područja novih istraživanja. To se poglavito odnosi na utvrđivanje veličina normnih čvrstoća, dopuštenih tlačnih i vlačnih svijajućih naprezanja ili računskih čvrstoća, na probleme umora betona dijelova izravno opterećenih kolničkih konstrukcija te na probleme lokalne stabilnosti pojasnica lukova i globalne stabilnosti lukova.
- Ograničavajući činitelj vrijednosti najvećeg dometa od 500 m raspona ovih montažnih lučnih mostova jest nosivost derrick dizalice od 1000 kN koja se premješta po luku i približno je jednaka težini predgotovljenog odsječaka luka. Dizalicom posebne konstrukcije i dvostruko veće nosivosti, namijenjene za montiranje lučnih odsječaka teških do 2000 kN, i rasponi lukova građeni ovom novom tehnologijom bili bi znatno veći.
- Primjena betona vrlo visokih svojstava nedvojbeno će omogućiti neslučen razvoj posve novih konstrukcija i tehnologija, poglavito rešetkastih mostova od prednapetog i ovijenog betona u kojima će velike tlačne čvrstoće RPC – a biti ravnomjernije iskorištene uzduž čitavih sklopova, koji ne moraju u cijelosti biti montažni kao u ovom istraživanju i u kojih stoga težina odsječaka i svijajuća vlačna čvrstoća ne mora biti ograničavajući činitelj u njihovu konstrukcijskom, oblikovnom i tehnološkom koncipiranju. Štapovi od ovijenog RPC – a bit će osnovni nosivi dijelovi i kao rešetkasti hrptovi grednih mostova s dvije betonske pojasnice i kao pojasni štapovi lučnih mostova. Sasvim jednostavne analize pokazuju da se možebitni dometi takvih novih sklopova očekuju približno dva puta većim od dometa sadašnjih. Zato valja što prije otpočeti s teoretskim i eksperimentalnim istraživanjima ovih kompozitnih štapova.

[3] Cheyrezi, M.: *Structural Applications of RPC*, International Conference: New Technologies in Structural Engineering, Lisbon 1997., Volume 1,5.-14.

[4] Roux, N.; Andrade, C.; Sanjuan, M.A.: *Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes*, Journal of Materials in Civil Engineering, February 1996., 1.-6.

- [5] Čandrlić, V.; Bjegović, D.; Skazlić, M.: *Croatian Experience with RPC*, 6th International Conference on Short & Medium Span Bridges, Vancouver 2002.
- [6] Bjegović, D.; Skazlić, M.; Čandrlić, V.: *RPC in Croatia, Challenges of Concrete Construction*, Concrete for Extreme Conditions, Dundee 2002.
- [7] Skazlić, M.: *Hibridni mikroarmirani betoni visokih uporabnih svojstava*, Magistarski rad, Zagreb 2002.
- [8] Budić, S.: *Most preko Bakarskih vrata*, Diplomski rad, Zagreb 2000.
- [9] Čandrlić, V.: *Istraživanje kompozicija luka i grede u masivnim konstrukcijama*, Disertacija, Zagreb 1982.
- [10] Čandrlić, V.: *Određivanje optimalnog oblika osi luka svodenih mostova*, Naše građevinarstvo 35(1981)3, 397.-404.
- [11] Čandrlić, V.; Mrakovčić, S.; Hrelja, G.: *Betonski mostovni lučni sklopovi od predgotovljenih odsječaka*, Građevinar 51(1999)3, 205.-214.
- [12] Bleiziffer, J.: *Most preko Bakarskih vrata*, Diplomski rad, Zagreb 2000.
- [13] Čandrlić, V.; Bleiziffer, J.; Mandić, A.; Mrakovčić, S.: *Bakarski most u betonu od reaktivnog praha*, Peti opći sabor HDGK, Brijuni 2001.
- [14] Čandrlić, V.; Mandić, A.; Bleiziffer, J.: *The Largest Arch Bridge Designed of RPC 200*, Strait Crossing 2001, Bergen 2001.
- [15] Čandrlić, V.; Bleiziffer, J.; Mandić, A.: *Bakar Bridge Designed in Reactive Powder Concrete*, Third International Arch Bridges Conference, Paris 2001.
- [16] Radić, J.; Šavor, Z.; Čandrlić, V.; Puž, G.: *Designs for New Bridges on the Croatian Coast*, fib 2002 Osaka Congress.
- [17] Mrakovčić, S.; Bjegović, D.; Bleiziffer, J.; Čandrlić, V.: *Large Precast Arch Bridges Designed of RPC200*, Croatian National Report 2002, fib 2002 Osaka Congress.
- [18] Čandrlić, V.; Gukov, I.: *Momenti u grednim mostovima pri gradnji polje po polje*, Zbornik radova IV. Kongresa DHGK, Cavtat 1996.
- [19] Mathivat, J.: *Evolution et récents développement des ponts à voussoirs préfabriqués*, Annales (1976) 342, 21. – 63.
- [20] Mrakovčić, S.; Čandrlić, V.; Bleiziffer, J.; Hrelja, G.; Skazlić, M.: *Gredni i lučni montažni mostovi od HPC – a i RPC – a razdvojene i jedinstvene konstrukcije*, Objekti na autocestama, Znanstveno stručno savjetovanje HDGK, Plitvička jezera, 2002.