

Dr Marko Pavlović, docent¹
Dr Milan Spremić, docent¹
Dr Zlatko Marković, redovni profesor¹
Dr Dragan Buđevac, redovni profesor¹
Dr Milan Veljković, redovni profesor²

SAVREMENA REŠENJA PODUŽNOG SMIČUĆEG SPOJA KOD PREFABRIKOVANIH SPREGNUTIH KONSTRUKCIJA OD ČELIKA I BETONA

0352-2733,47 (20014), p. 1-39

UDK: 624.016.072.2
IZVORNI NAUČNI ČLANAK

Rezime

Prefabrikacijom spregnutih konstrukcija od čelika i betona može se povećati njihova konkurentnost i smanjiti uticaj konstrukcije na životnu sredinu. Ovde su prikazana istraživanja podužnih smičućih spojeva koja su nedavno sprovedena na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Rešenja podužnog smičućeg spoja sa grupisanim moždanicima sa glavom i zavrtnjevima kao sredstvima za sprezanje koja su pogodna za prefabrikaciju spregnutih konstrukcija su ispitivana standardnim

¹ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

² Tehnički univerzitet u Luleu, Švedska

Rad primljen oktobra 2014.

eksperimentom smicanja. Eksperimentalno je ispitano ukupno 30 uzoraka i vršene su analize na bazi MKE korišćenjem softverskog paketa Abaqus/Explicit. Primenom MKE analizirano je i ponašanje nosača sa zavrtnjevima kao sredstvima za sprezanje i uticaj zazora između rupe i zavrtnja. Na bazi eksperimentalnih i numeričkih ispitivanja izvršeno je poređenje ponašanja ova dva sredstva za sprezanje i razvijene su nove preporuke za proračun i konstruisanje.

Ključne riječi: Montažne spregnute grede, grupisani moždanici, zavrtnjevi, eksperimenti, MKE.

CONTEMPORARY APPROACHES FOR LONGITUDINAL SHEAR CONNECTION IN PREFABRICATED STEEL-CONCRETE COMPOSITE STRUCTURES

Abstract

Prefabrication of steel-concrete composite decks can improve their competitiveness and sustainability. This paper presents recent studies of longitudinal shear connection at the University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering. Grouped welded headed studs and bolted shear connectors, suitable for prefabricated composite construction, has been examined in push-out tests. Totally 30 tests were conducted, and advanced Finite Element Analysis (FEA) were made using Abaqus/Explicit dyna-

mic solver. Influence of the bolt-to-hole clearance in case of the composite beam with bolted shear connectors is examined using FEA, as well. Based on the experimental and numerical studies behaviour those two shear connectors are compared.

Key words: prefabricated composite beams, grouped headed studs, bolts, experiments, FEA.

1. UVOD

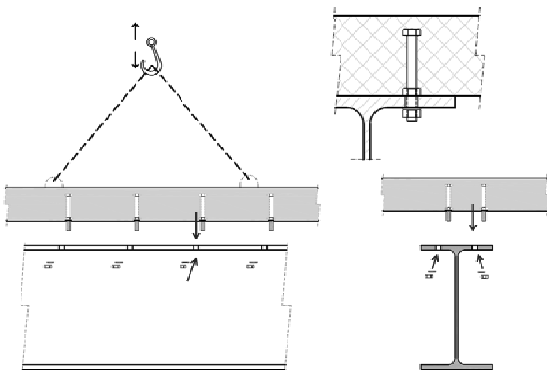
Spregnute konstrukcije od čelika i betona se koriste u zgradarstvu i mostogradnji već decenijama unazad. Live-nje betonske ploče na licu mesta zahteva upotrebu privremenih oslonaca i oplata. Prefabrikacijom betonske ploče u sklopu spregnute konstrukcije moguće je optimizovati proces izgradnje i značajno skratiti vreme potrebno za izgradnju. Spregnuto dejstvo između čeličnog profila i betonske ploče se najčešće postiže primenom zavarenih moždanika sa glavom. Jedan od načina na koji se može izvršiti prefabrikacija je grupisanje moždanika na gornjoj nožici čeličnog nosača na mestima otvora u montažnim armiranobetonskim pločama. Nakon završene montaže, otvori sa moždanicima u prefabrikovanim pločama se ispunjavaju betonom. Na ovaj način se formira diskontinualan podužni smičući spojsa grupisanim moždanicima, videti *sliku 1*. Zbog svoje jednostavnosti ovakvo rešenje podužnog smičućeg spoja se često koristi u montažnim spregnutim mostovskim konstrukcijama. U našoj zemlji je ovakvo rešenje podužnog smičućeg spoja primenjeno na prilaznim konstrukcijama mosta na Adi u Beogradu, videti *sliku 1*.



Slika 1.- Prefabrikovane betonske ploče sa rupama za grupisane zavarene moždanike

Drugo rešenje predstavlja upotrebu zavrtnjeva kao sredstva za ostvarivanje podužnog smičućeg spoja u spregnutoj gredi. Zavrtnjevi mogu biti ubetonirani u segmente prefabrikovane betonske ploče i zajedno sa pločom spojeni sa gornjom nožicom čelične grede sa unapred pripremljenim rupama, videti *sliku 2*. Ovo rešenje pruža omogućava visok stepen prefabrikacije jer za ostvarivanje spregnutog dejstva nosača nije potrebno vreme za očvršćavanje betona. Zavrtnjevi omogućavaju i lako uklanjanje konstrukcije ili zamenu njenih delova, pa timesmanjuju uticaj konstrukcije na životnu sredinu i olakšavaju održavanje.

I pored nesumljivih prednosti koje pružaju prikazana rešenja prefabrikacije, još uvek ne postoje pravila za projektovanje i proračun u aktuelnim svetskim propisima, što predstavlja prepreku za njihovu širu primenu. Razlog za to može biti nedostatak dovoljnog broja istraživanja u vezi specifičnosti ponašanja ovakvih rešenja sredsta-



Slika 2. - *Primena zavrtnjeva kao sredstva za sprezanje ubetonitani u prefabrikovanu betonsku ploču.*

va za sprezanje. Na primer, EN 1994-2 [3] (Evrokod za spregnute mostove) dozvoljava upotrebu grupisanih moždanika ali su istaknuti samo generalnizahtevi koje takvo rešenja mora da zadovolji.

2. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA

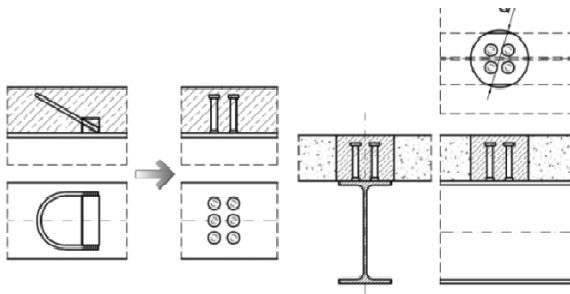
2.1 Moždanici u grupi

Prema EN 1994-2 [3] sledeće činjenice se moraju uzeti u obzir prilikom primene grupisanih moždanika: ne uniformni tok podužne sile smicanja, veća mogućnost

pojave klizanja i vertikalnog odvajanja između betonske ploče i čeličnog profila, izvijanje pritisnute nožice čeličnog profila i nosivost betonske ploče na dejstvo uvećane lokalne sile usled grupe moždanika. Takođe, dozvoljava se primena rastojanja grupa moždanika koja je veća od maksimalno dozvoljenih rastojanja pojedinačnih moždanika, ali nije definisano kolika ova rastojanja mogu biti.

Grupisani moždanici se mogu primenjivati i kao alternativa blok moždanicama, koji imaju veliku nosivost na smicanje. Grupe moždanika sa glavom se mogu uspešno primenjivati i za naknadno izvođenje podužnog smičućeg spoja kao i za ojačanje smičućeg spoja kod izvedenih spregnutih nosača. U ovom slučaju se mogu izvesti otvori ograničenih dimenzija u postojećoj armiranobetonskoj ploči za smeštaj grupe moždanika sa glavom. Da bi se ovakvo rešenje primenilo od posebnog je interesa da se rastojanja između susednih moždanika svedu na minimalnu meru. Redukovanjem rastojanja između moždanika u grupi dobija se grupa manjih dimenzija, čime je omogućeno izvođenje manjih otvora u armiranobetonskoj ploči, a samim tim i kompaktnije prefabrikovane ploče sa manje diskontinuiteta. Princip primene grupisanih moždanika je ilustrovan na *slici 3*. Istraživanja ponašanja zavarenih moždanika u grupi su poslednje dve decenije orijentisana u pravcu smanjivanja podužnog rastojanja između moždanika u grupi.

Prethodna istraživanja nosivosti grupe moždanika, a pre svih istraživanja koje su sproveli Okada i dr. [9] i



Slika 3. - Princip zamene blok moždanika grupom zavarenih moždanika sa glavom.

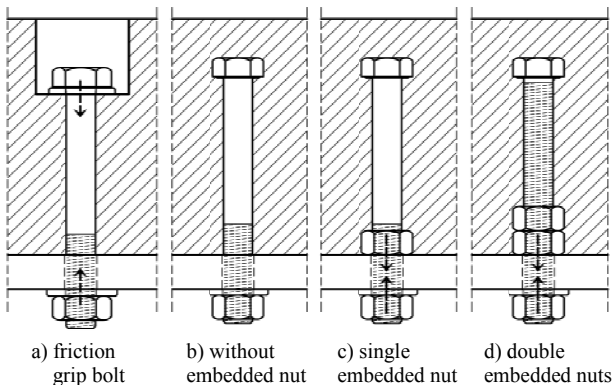
Shim i dr. [13], su sprovedena na bazi uzoraka sa devet moždanika velikih prečnika (22 mm i 25 mm). Ovakve grupe moždanika su primenljive u spregnutim mostovskim konstrukcijama. Međutim jedino su Shim i dr. [13] izveli i publikovali rezultate eksperimentalnih istraživanja sa grupama moždanika koje su izvedene na način da su rastojanja u pravcu smičuće sile između susednih moždanika u grupi manja od minimalno propisanog rastojanja $5d$. Zbog nedostatka eksperimentalnih rezultata sa blisko postavljenim moždanicima na rastojanjima manjim od $5d$, odlučeno je da se sopstveno, eksperimentalna istraživanja zasnivaju upravo na uzorcima sa blisko postavljenim moždanicima.

Pomenuti autori su u svojim istraživanjima predložili koeficijent redukcije nosivosti za grupu moždani-

ka u odnosu na sumu nosivost pojedinačnih moždanika u grupi. Predloženi koeficijenti redukcije u [9] i [13] su u funkciji samo jednog parametra, podužnog rastojanja između moždanika.

2.2 Zavrtnjevi kao sredstva za sprezanje

Mogući načini upotrebe zavrtnjeva kao sredstva za sprezanje su prikazani na slici 4. Spregnuto dejstvo između čelika i betona se može postići sa ili bez navrtke ubetonirane u ploči i sa ili bez prednaprezanja zavrtnjeva. Prikazana rešenja su analizirana u nekoliko prethodnih istraživanja: Marshall i dr. [8], Dedic i Klaiber [1], Ha-



Slika 4. - Različiti vidovi primene zavrtnjeva kao sredstva za sprezanje

wkins [4], Sedlacek i dr. [12], Kwon [6], Lee i Bradford [7]. Osim za rešenje sa prednapregnutim zavrtnjevima, prikazano na *slici 4a*, nijedno od pomenutih prethodnih istraživanja nije rezultovalo detaljnom razjašnjenjem ponašanja ovakvih sredstava za sprezanje. Takođe, za ovakva sredstva za sprezanje ne postoje nikakva pravila za proračun i konstruisanju u aktuelnim svetskim propisima.

3. ISTRAŽIVANJA NA GRAĐEVINSKOM FAKULTETU U BEOGRADU

Od 2009. godine na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu sprovodi se kontinuirani program istraživanja u oblasti prefabrikovanih spregnutih konstrukcija. Kao rezultat dosadašnjih istraživanja odbranjene su dve doktorske disertacije Spremić [14] i Pavlović [10]. Takođe, dva diplomska master rada je odbranjeno u okviru ovog istraživanja: Kovačević [5] i Todorović [16] na teme uporedne analize ponašanja nosača sa moždanicima u grupi i zavrtnjevima i uticaja zazora između rupe i zavrtnja na ponašane spregnutog nosača. Ovo istraživanje se sprovodi u okviru naučnog projekta TR36048 finansiranim od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja u periodu od 2011-2014. Detaljno istraživanje primenom eksperimentalnih ispitivanja i numeričkih analiza je sprovedeno sa ciljem pospešivanja primene moždnika u grupi i zavrtnjeva kao sredstva za spreza-

nje u zgradarstvu. Eksperimentalno su ispitane grupe od četiri moždanika prečnika 16 mm u različitom rasporedu i zavrtnjevi prečnika 16 mm i 24 mm, klase čvrtstoće 8.8. Ponašanje ova dva rešenja podužnog smičućeg spoja upoređeno je posmatrajući osnovne karakteristike sredstva za sprezanje: nosivost, krutost i duktilnost. Razmatrana je mogućnost smanjenja rastojanja između moždanika u grupi. Zavrtnjevi sa jednom ubetoniranom navrtkom, prikazani na slici 4c su ispitivani, jer je pokazano da imaju značajno veću krutost u poređenju sa ostalim rešenjima. Takođe, ovakvo rešenje značajno olakšava proces prefabrikacije betonske ploče jer pruža mogućnost fiksiranja zavrtnja u čeličnom šablonu tokom proizvodnje ploče i kasnije lako uklanjanje šablona nakon očvršćavanja betona. Pored eksperimentalnih ispitivanja sprovedene su i opsežne numeričke analize. Korišćeni su napredni modeli na bazi metode konačnih elemenata koji uključuju nelinearnu kvazi-statičku analizu i modele loma materijala. Numerički modeli su kalibrisani u odnosu na rezultate eksperimentalnih ispitivanja i sprovedene su parametrske studije. Time je formiran širok spektar rezultata iz kojih je bilo moguće definisati preporuke za proračun i konstruisanje.

Kao nastavak ovog programa istraživanja, trenutno je utoku eksperimentalno ispitivanje specijalne vrste moždanika proizvođača „HILTI“. Ovi moždanici se formiraju od posebno profilisanog tankozidnog čeličnog profila, a za gornju nožicu čeličnog profila u okviru spregnu-

te gredese fiksiraju pomoću pirotehničkih eksera (*fired pins*). Prvobitno su razvijeni za upotrebu u zgradarstvu u spregnutim gredama sa betonskom pločom na profilisanom limu. Cilj ispitivanja na Građevinskom fakultetu u Beogradu je analiza ponašanja ovih moždanika u grupi u punim prefabrikovanim betonskim pločama sa otvorima. Koristi se ista metodologija ispitivanja kao i u slučaju zavarenih moždanika i zavrtnjeva što će omogućiti uporedivost rezultata. Pored eksperimentalnih ispitivanja u planu su i numeričke analize u cilju boljeg razumevanja ovog sredstva za sprezanje.

4. EKSPERIMENTALANA ISPITIVANJA

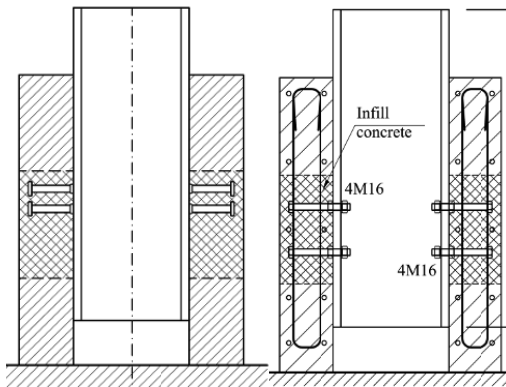
Eksperimentalno je ispitano ukupno 32 uzoraka: 24 sa moždanicama u grupi i 8 sa zavrtnjevima kao sredstvima za sprezanje.

Korišćen je standardan test smicanja definisan standardom EN1994-1-1 [2], kao što je prikazano na *slici 5*.

4.1 Program ispitivanja

Ispitano je šest serija uzoraka sa zavarenim moždanicama, videti *sliku 6a*.

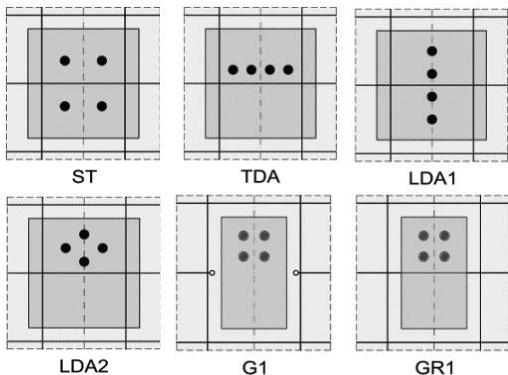
Pored standardnog uzorka (ST) sa uobičajenim rastojanjem između moždanika, ispitano je i pet različitih grupa od po četiri zavarena moždanika sa međusobnim rastojanjem koje je manje od minimalno zahtevanog prema Evrokodu 4 [2] i [3]. Raspored grupa, orijentacija gru-



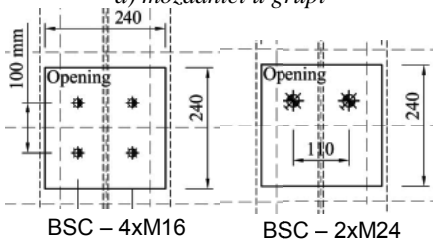
Slika 5. - Uzorci za eksperimentalna ispitivanja(moždanici i zavrtnjevi).

pa u odnosu na pravac dejstva smičuće sile i rastojanje između moždanika su bili promenljivi parametri. Cilj je bio utvrditi kako smanjenje minimalnog zahtevanog rastojanja između moždanika utiče na ponašanje podužnog smičućeg spoja: nosivost, duktilnost i ukupnu podužnu deformaciju smicanja. Analizirane grupe su formirne sa podužnim rastojanjem između moždanika od $s = 45 \text{ mm}$ ($2.8d$) do $s = 50 \text{ mm}$ ($3.1d$), gde je d prečnik moždanika.

Uzorci tipa GR1 i G1 su formirani korišćenjem različitih tipova prefabrikovanih betonskih ploča. Za uzorke tipa GR1 korišćene su prefabrikovane betonske ploče



a) moždanici u grupi



b) zavrtnjevi sa ubetoniranom navrtkom

Slika 6. - Serije uzoraka.

sa šipkama armature ispred grupe moždanika dok su za uzorke tipa G1 korišćene ploče bez armature ispred moždanika.

Zavrtnjevi klase čvrstoće 8.8, ispitani su okviru dve serije uzoraka, prečnika M16 i M24. Ispitivanje uzoraka je vršeno na isti način kao i uzorci sa zavarenim moždanicima u grupi, videti *sliku 6b*. Iako kod ovog tipa podužnog smičućeg spoja nije predvođeno da zavrtnjevi budu grupisani, kao i u slučaju moždanika za standardan test smicanja korišćene su prefabrikovane betonske ploče. Razlog za to je uporedivost rezultata i jednostavnija priprema uzoraka. U relanoj konstrukciji predviđeno je da zavrtnjevi budu ubetonirani u prefabrikovane segmente betonske ploču i kontinualno raspoređeni duž spregnutog nosača. U oba slučaja korišćene su prefabrikovane betonske ploče sa armaturnim šipkama u zoni rupe u kojoj su smešteni zavrtnjevi. U slučaju zavrtnjeva M16, korišćena su po četiri zavrtnja sa svake strane čeličnog profila, na rastojanju koje je isto kao u standardnoj seriji uzoraka sa moždanicima. Uzorci sa zavrtnjevima prečnika M24 formirani su sa dva zavrtnja sa jedne strane veze (ukupno 4). Time je izbegnut globalni lom betonske ploče u standardnom testu smicanja (van zone veze), i dobijen zeljeni lokalni lom betonske ploče oko zavrtnja. Globalni lom ploče usled unošenja sile smicanja nije moguć u slučaju realne konstrukcije sa betonskom pločom značajno većih dimenzija

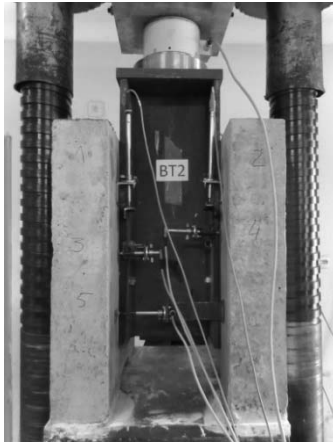
4.2 Priprema uzoraka i ispitivanje

Betoniranje montažnih ploča izvedeno je u pogonu za proizvodnju montažnih armiranobetonskih elemenata

građevinskog preduzeća „GEMAX“ iz Beograd. Tokom pripreme uzoraka određena su mehanička svojstva svih korišćenih materijala: betona, armature, čeličnog profila, moždanika i zavrtnjeva. Da bi se beton adekvatno ugradio, zbog blisko postavljenih moždanika, korišćen je trofrakcijski beton za monolitizaciju uzoraka. Pri projektovanju mešavine betona za monolitizaciju uzoraka korišćen je i aditiv sa ciljem da se smanje ukupne vrednosti dilatacije skupljanja betona koji je korišćen za monolitizaciju. Neposredno pre betoniranja površina starog betona je premazivana epoksidnim premazom za vezu „starog“ i „novog“ betona.



Slika 7. - Priprema uzoraka



Slika 8. - Ispitivanje u hidrauličkoj presi i merna oprema.

Prilikom pripreme uzoraka preduzete su mere da se spreči kontakt epoksida i betona za monolitizaciju sa čeličnim profilom. Ovakvom pripremom uzoraka je potpuno isključena adhezija između armiranobetonskog elementa i čeličnog profila. Betoniranje otvora je vršeno u horizontalnom položaju kao što je prikazano na *slici 7*. Betoniranje duge strane uzorka je vršeno trećeg dana nakon betoniranja prve strane.

Nakon navršenih 28 dana starosti betona u otvorima, uzorci su opremljeni mernim uređajima i postavljeni u hidraulički ram za ispitivanje. Svaka serija, odnosno tip

veze (raspored grupe ili prečnik zavrtnja) ispitan je sa po četiri uzorka.

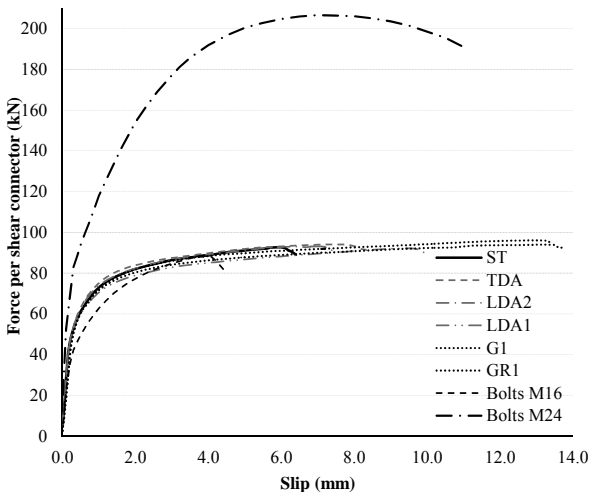
Svaki od uzoraka je bio opremljen sa 8 indukcionih ugibomera (LVDT), videti *sliku 8*. Ovim ugibomerima mereno je klizanje između betonskih ploča i čeličnog profila u pravcu dejstva sile kao i razmicanje betonskih ploča i odvajanje od čeličnog profila. Merenje nanete sile vršeno je putem dozne (load cell) na vrhu, kapaciteta 1000 kN. Kontrola vrednosti aplicirane sile je kontinualno vršena na komandnom pultu prese. Prikupljanje svih podataka sa mernih uređaja vršeno je digitalnim akvizicionim uređajem u hrekvenciji 1 Hz.

4.3 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja su prikazani na slici 9 u vidu krivih sila-klizanje, osrednjenih u okviru četiri uzorka svake serije, za različite smičuće spojeve. Svi smičući spojevi sa zavarenim moždanicima u grupi su dostigli nosivosti na smicanje koje su veće of karakteristične nosivosti prema Evrokodu 4 [2] i [3]. Granične nosivosti serija G1, GR1 i LDA2, sa dva moždanika u pravcu dejstva smičuće sile koji su na rastojanju manjem od preporučenih 5dsu veće ili jednake graničnoj nosivosti serije sa standardnim rasporedom moždanika (ST). Poređenjem graničnih nosivosti serija G1 i GR1 može se zaključiti da armatura u zoni otvora prefabrikovane betonske ploče (grupe moždanika) ne utiču značajno na nosivost grupe. Montaža konstrukcije je svakako jedno-

stavnija ukoliko u zoni otvora u prefabrikovanim betonskim pločama u kojima se smeštaju grupe moždanika ne postoje šipke armature. Bitno je naglasiti da ni kod jednog ispitanog uzorka nije došlo do pojave prslina na spoju „starog“ i „novog“ betona. Na poprečnim preseccima ploča koje su nakon ispitivanja, podužno presečene na dva dela, neposredno uz moždanike jasno se vidi da ne postoji diskontinuitet ni na jednom delu kontaktne površi montažne ploče i betona za monolitizaciju, videti *sliku 12*. Iako je uticaj armature minimalan na smičuću nosivost spoja, adekvatno rešenje detalja armature je važno sa stanovišta globalnog ponašanja betonskog dela spregnutog elementa konstrukcije.

Podužni smičući spoja sa zavrtnjevima M16 dostigao je sličnu nosivost kao i spoj sa moždanicima istog prečnika, dok je krutost i duktilnost približno 30 % manja. U ovom slučaju, lom je nastao smicanjem zavrtnja u zoni navoja pri sili koja je veća od proračunske nosivosti zavrtnja na smicanje. Nosivost podužnog smičući spoja sa zavrtnjevima M24 je značajno veća. Lom po betonu u zoni veze je nastupio u ovoj seriji uzoraka što je uzrokovalo značajno većim vrednostima klizanja pri lomu, a samim tim i većom duktilnosti podužnog smičućeg spoja. U ove dve serije uzoraka detektovana su dva modela loma: lom zavrtnja smicanjem i loma betona čupanjem zavrtnja i dela betona iza zavrtnja pri smicanju (*pryout failure of concrete*).



Slika 9. - Dijagrami sila-klizanje za različite rasporede grupa moždanika i prečnike zavrtnjeva.

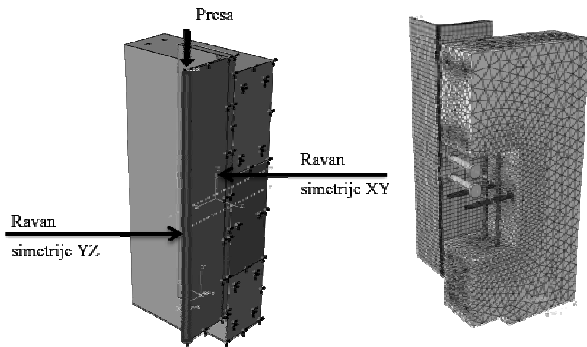
5. NUMERIČKE ANALIZE

Uz eksperimentalna ispitivanja, sprovedene su i veoma sveobuhvatne numeričke analize na bazi metode konačnih elemenata (MKE). Prvo je izvršeno modeliranje uzoraka koji su eksperimentalno ispitani u cilu kalibracije parametara modela. Rezultati ovih modela poslužili su i za bolje razumevanje ponašanja uzoraka i modela loma.

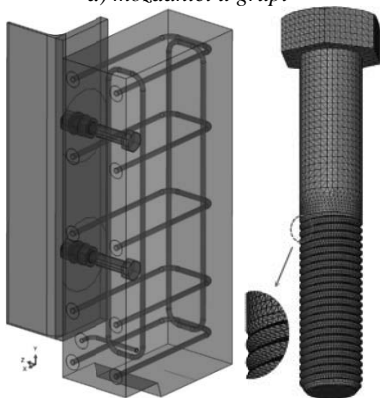
Rezultati MKE pružaju mogućnost analiziranja veličina koje nije moguće meriti u eksperimentima, npr. smičuće sile u moždanicama i zavrtnjevima, sile trenja između čelika i betona, itd. Primeri modela na bazi MKE su dati na *sllici 10*. Numerička analiza sprovedena je koristeći softverski paket Abaqus/Explicit. Modelima su obuhvaćeni svi elementi koji su činili eksperimentalni uzorak. Za betonsku ploču, armaturu i zavrtnjeve korišćeni su četvorovorni tetraedarski prostorni konačni elementi (C3D4), zbog komplikovane geometrije.

Za čelični profil i moždanike korišćeni su osmočvorni heksaedarski konačni elementi sa redukovanom integracijom (C3D8R). Zavrtnjevi i navrtke su modelirani sa realnom geometrijom navoja, kao što je prikazano na *sllici 10b*, a prednaprezanje zavrtnjeva u modelu je izvršeno uvrtanjem navrtke oko ose zavrtnja. Ovo je inovativno rešenje koje omogućava najbolje moguće sagledavanje složenih interakcija između zavrtnja, betona, navrtke i čeličnog profila i realnije predviđanje loma zavrtnja u zoni navoja.

Za materijal betona, moždanika i zavrtnjeva primenjeni su modeli loma materijala. Za beton je korišćen *Concrete Damage Plasticity* model dok su za zavrtnjeve i moždanike korišćeni progresivni modeli loma: *Ductile Damage* u kombinaciji sa *Shear Damage*. Svi pomenuti modeli materijala, kalibrisani su koristeći rezultate standardnih ispitivanja svojstava materijala koji su korišćeni u eksperimentima.

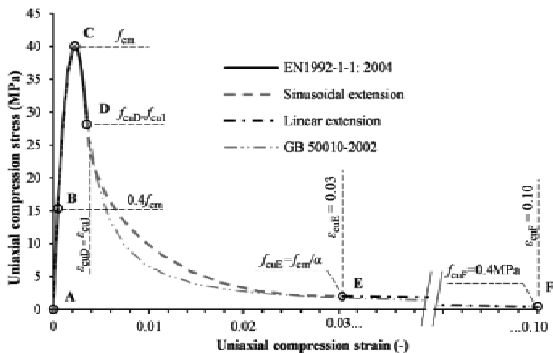


a) moždanici u grupi

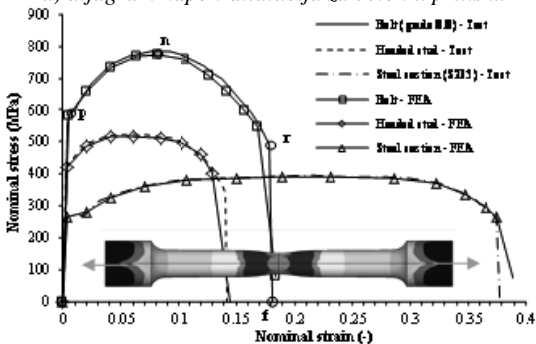


b) zavrtnjevi sa ubetoniranom navrtkom

Slika 10. - Numerički modeli MKE ispitanih uzoraka.

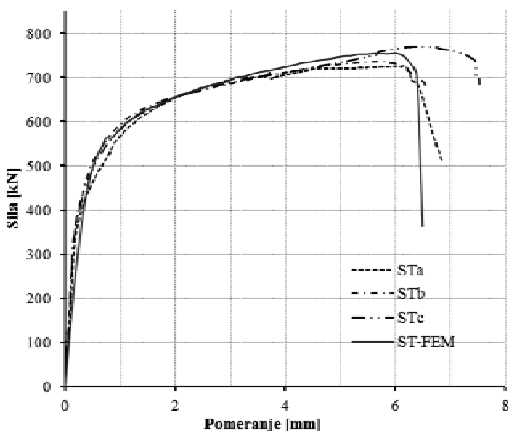


a) dijagram napon-dilatacija za beton u pritisku

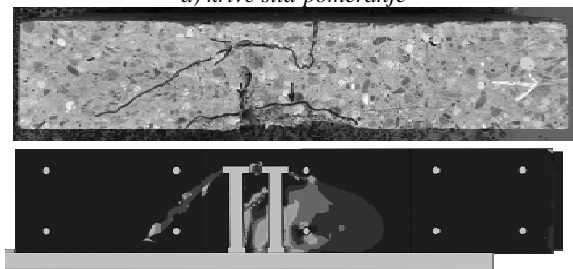


b) dijagram napon-dilatacija za čelične materijale

Slika 11. - Modeli loma materijala kalibrisani u odnosu na rezultate standardnih ispitivanja

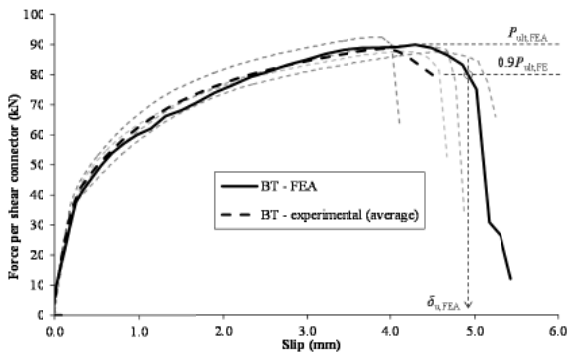


a) krive sila-pomeranje

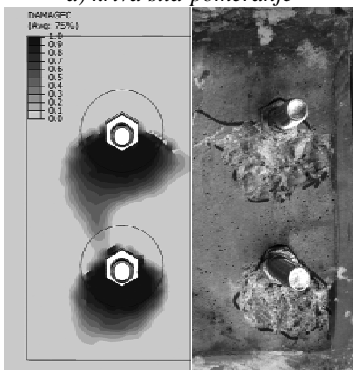


b) prsline u betonu

Slika 12. - Poređenje rezultata eksperimenata i MKE za moždanike.



a) kriva sila-pomeranje



b) zone oštećenja u betonu

Slika 13. - Poređenje rezultata eksperimenata i MKE za zavrtnjeve.

Za ovako složene probleme u smislu: geometrije, materijala, graničnih uslova, interakcije i opterećivanja, korišćenaje kvazi-statička analiza primenom eksplcitnog dinamičkog solvera softverskog paketa Abaqus. Poređenje rezultata MKE sa eksperimentima dato je na *slikama 12 i 13* za moždanike i zavrtnjeve, respektivno. Postignuto je odlično poklapanje eksperimentalnih i numeričkih rezultata. Kasnije su ovakvi modeli MKE iskorišćeni za parametarske analize iz kojih je dobijen dovoljan broj podataka za izvođenje preporuka za dimenzionisanje.

Upotrebom precizne geometrije i naprednih modela loma materija omogućeno je veoma realno sagledavanje loma uzoraka, kao i merodavnosti modela loma betona ili sredstva za sprezanje u numeričkim modelima. Zahvaljujući tome, u slučaju zavrtnjeva, na primer, omogućeno je definisanje kriterijuma duktilnosti smičućeg spoja.

6. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

6.1 Poređenje ponašanja moždanika i zavrtnjeva

Uporednom analizom eksperimentalnih i numeričkih podataka za moždanike prečnika 16 mm, u standardnom rasporedu, i zavrtnjeva M16, sa istom dispozicijom uzorka, izvedeni su sledeći zaključci. Poredeći osnovne karakteristike sredstva za sprezanje: nosivost na smicanje, krutost na smicanje iduktilnost pokazalo se da su zavrtnjevi dostigli skoro istu nosivost kao i moždanici sa glavom, dok su krutost i duktilnost manje, videti *sliku 9*.

6.2 Ponašanje moždanika u grupi

Analizirajući moguće oblike loma grupe moždanika uočeno je da se ponašanje grupe moždanika može opisati na sličan način kao i ponašanje pojedinačnog moždanika-male visine. Na *slici 12* prikazan je poprečni presek ploče uzorka G1 nakon ispitivanja. Upoprečnom preseku se jasno uočavaju prsline u AB ploči koje su karakteristične za kombinovani lom smičućeg spoja. Kombinovani lom smičućeg spoja je upravo karakterističan za spojeve izvedene sa moždanicima visine manje od 4d. Rastojanje u pravcu smičuće sile između susednih moždanika u grupi nema uticaja na nosivost po kriterijumu smicanja stabla pojedinačnog moždanika. Takođe, uticaj ovog rastojanja na nosivost po kriterijumu loma betona je mali ukoliko su moždanici dovoljno visoki da se ostvari adekvatno ankerovanje u betonskom elementu. Većom visinom moždanika se obezbeđuje da se u višim slojevima betona, u odnosu na kontaktnu ravan čeličnog dela preseka i AB ploče, ostvari troosno stanje napona. Primenom visokih moždanika može se obezbediti ista nosivost spoja po kriterijumu loma betona i u slučajevima kada su rastojanja između susednih moždanika manja od minimalno propisanih 5d. Ukoliko se koriste moždanici manje visine i kada je rastojanje između moždanika redukovano, nosivost grupe moždanika je manja od sume nosivosti pojedinačnih moždanika u grupi. U ovom slučaju nosivost grupe moždanika prema [14] jednaka je:

$$P_{\text{Rd,G}} = \alpha_G \cdot \sum P_{\text{Rd}}$$

gde je α_G je koeficijent redukcije.

Pokazano je da se ponašanje grupe moždanika može opisati ponašanjem jednog ekvivalentnog moždanika [14] koji je iste visine kao i pojedinačni moždanik ali većeg prečnika. U [14] je predložen originalni model za određivanje vrednosti koeficijenta redukcije za nosivost na smicanje grupe moždanika sa glavom, koji je zasnovan na ekvivalentnom (zamenjujućem) prečniku moždanika. Novo uvedeni pojam zamenjujućeg prečnika moždanika d_G je funkcija: broja moždanika u grupi, broja redova moždanika n_r , broja kolona moždanika n_c irastojanja u pravcu smičuće sile između susednih moždanika u grupi e_1 :

$$d_G = f(d, n_c, n_r, e_1)$$

Predloženim modelom proračuna ponašanje grupe moždanika aproksimira sa ponašanjem ekvivalentnog pojedinačnog moždanika iste visine ali većeg prečnika $d_G > d$. Koncept proračuna je ilustrovan na slici 14. Koeficijent redukcije za nosivost na smicanje grupe moždanika može se odrediti na sličan način kao za pojedinačni moždanik male visine. Ovakav model proračuna, koji je u potpunosti u skladu sa aktuelnim Evrokodom 4, daje mogućnost da se uvrsti u neku od narednih edicija evropskog standarda za spregnute konstrukcije EN 1994-1-1.

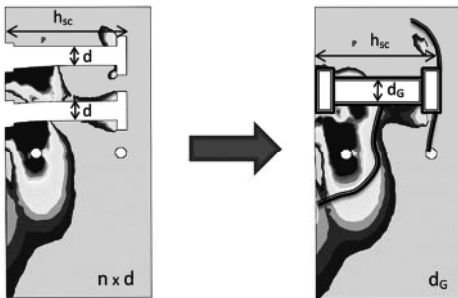
Prema Evrokodu 4 proračunska nosivost na smicanje pojedinačnog moždanika jednaka je:

$$P_{Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.8 \cdot f_u \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{\gamma_v} \\ 0.29 \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}} \frac{1}{\gamma_v} \end{array} \right.$$

Kada se koriste moždanici visine manje od $4d$ Evrokod 4 propisuje redukciju nosivosti moždanika na smicanje po kriterijumu loma betona. Vrednost koeficijent redukcije α je funkcija odnosa visine moždanika h_{sc} prečnika moždanika d jednaka je:

$$\alpha = 0.2 \cdot \left(\frac{h_{sc}}{d} + 1 \right) \text{ kada je } 3 \leq \frac{h_{sc}}{d} \leq 4$$

Model proračuna koeficijenta redukcije predložen u [14], na isti način kao i u slučaju pojedinačnih moždanika male visine, definiše vrednost koeficijenta redukcije



Slika 14. - Ekvivalentan prečnik moždanika.

je nosivosti na smicanje za grupu moždanika u funkciji odnosa visine moždanika i zamanjujućeg prečnika.

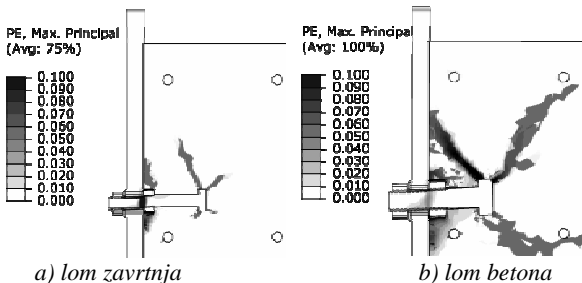
Vrednost koeficijenta redukcije može se sračunati, pomoću izraza za α , kao i za pojedinačne moždanike zamenjujući u izrazu prečnik pojedinačnog moždanika sa ekvivalentnim prečnikom moždanika.

$$\alpha_G = \min\left(0,2 \cdot \left(\frac{h_{sc}}{d_G} + 1\right); 1\right)$$

Dosadašnji predloženi modeli, napred pomenuti, su definisali vrednost koeficijenta redukcije samo u funkciji rastojanja, u pravcu smičuće sile, između susednih moždanika u grupi. Model proračuna nosivosti grupe moždanika predložen u [14] je prvi model koji obuhvata sve geometrijske parametere grupe, od kojih zavisi nosivost grupe.

6.3 Ponašanje zavrtnjeva kao sredstva za sprezanje

Prepoznata su dva osnovna modela loma zavrtnja kao sredstva za sprezanje: lom zavrtnja na spoju čelične nožice i betonske ploče i lom betona čupanjem zavrtnja (*pryout failure*), videti *sliku 15*. Ovi modeli loma su detaljno razjašnjeni, a analitički modeli njihovog ponašanja su razvijeni i potvrđeni koristeći eksperimentalne i rezultate MKE. Lom zavrtnja nastaje na mestu navoja. Za veze sa zavrtnjevima u klasičnim čeličnim konstrukcijama ovaj vid loma nije preporučljiv. Međutima, nosivost



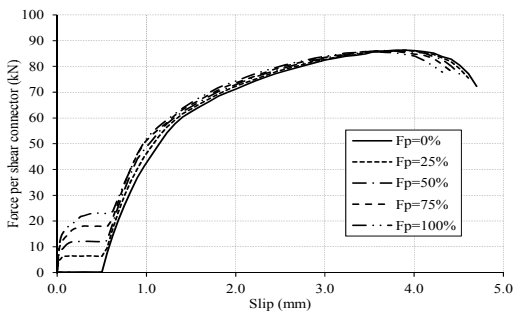
Slika 15. - Modeli loma zavrtnja kao sredstva za sprezanje.

za dejstvo smičuće sile u ovom slučaju je približno dva puta veće od nosivosti na proklizavanje u slučaju smičućeg spoja sa prednapregnutim zavrtnjevima prikzano na slici 4a. Time je upotreba zavrtnjeva sa lomom na mestu navoja opravdana.

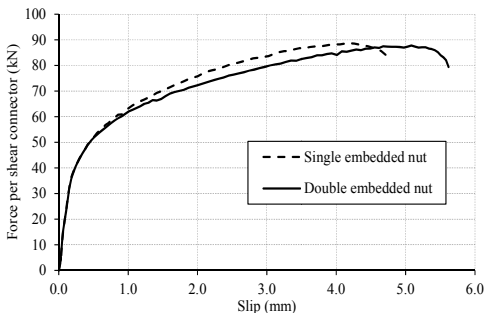
Parametarskim studijama je pokazano da broj ubetoniranih navrtki (više od jedne), kao ni sila prednaprežanja u zavrtnju, između ubetonirane i spoljne navrtje, ne utiču na nosivost i duktilnost zavrtnja kao sredstva za sprezanje, videti slike 16 i 17.

Utvrđeno je da podužno rastojanje između zavrtnjeva veće od pet prečnika za vrtnjeva ($5d$) obezbediće punu nosivost svakog pojedinačnog zavrtnja kao sredstva za sprezanje, t.j. da nema redukcije nosivosti usled grupnog dejstva. Preporučljivo je da podužno rastojanje između zavrtnjeva bude veće od $5d$. Ovaj zahtev je lako ostvariv jer zavrtnjevi nisu predviđeni za upotrebu u grupnom

rasporedu kao moždanici, već kontinualno raspoređeni u prefabrickovanoj betonskoj ploči.



Slika 16. - Uticaj sile prednapreznja na nostivost zavrtnja kao sredstva za sprezanje.



Slika 17. - Uticaj broja ubetoniranih navrtki na nostivost zavrtnja kao sredstva za sprezanje.

Parametri koji najviše utiču na nosivost i duktilnost su: prečnik, čvrstoća i visina zavrtnja, kao i čvrstoća betona. Pokazano je da se pravilnim izborom ovih parametara može postići značajna nosivost uz zadovoljavajuću duktilnost prema EN 1994-1-1 [2] (minimalno 6 mm klizanje pri lomu).

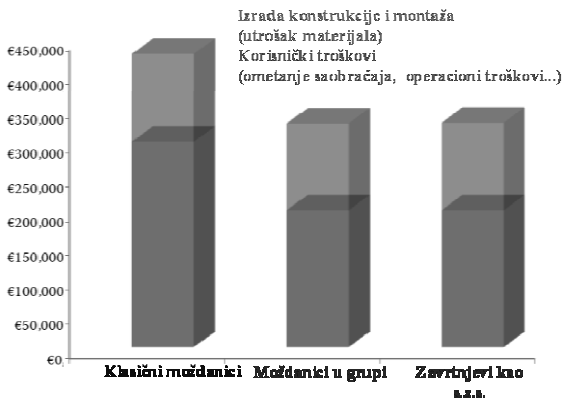
Koristeći eksperimentalne i numeričke rezultate za ciklično opterećenje dat je izraz za određivanje maksimalnog očekivanog početnog klizanja usled pomeranja zavrtnja u rupi i urezivanja navoja: $\delta_g = cmax + d/40$, gde su $cmax$ i d početni zazor u rupi i prečnik zavrtnja u mm, respektivno. Veličina zazora između rupe i zavrtnja je značajna za ponašanje spregnutog nosača što je detaljnije objašnjeno u poglavlju 8.

7. UPOREDNA TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA NOSAČA SA MOŽDANICIMA I ZAVRTNJEVIMA

Na primeru spregnutog drumskog mosta raspona 40 m izvršena je uporedna tehno-ekonomska analiza tri rešenja ostvarivanja podužnog smičućeg spoja: klasično sa kontinualno raspoređenim moždanicima, prefabrikovano sa moždanicima u grupi i prefabrikovano sa ubetonitanim zavrtnjevima. Izvršeno je dimenzionisanje konstrukcije razmatrajući sva granična stanja nosivosti i upotrebljivosti. U slučaju zavrtnjeva kao sredstva za sprezanje razmatrana je i nepotpuna interakcija tokom izgradnje

usled zazora između rupe i zavrtnjeva koja utiče na uvećanje deformacija nosača i naprezanja u čeličnom delu preseka. Zaključeno je da se nepotpuna interakcija uspešno može prevazići upotrebom nadvišenja i da ne iziskuje povećanje dimenzija čeličnog dela preseka usled uvećanog naprezanja u početnoj fazi rada konstrukcije.

U sva tri rešenja dobijena je približno ista cena izrade konstrukcije, i pored razlike u ceni za sredstava za sprežanje koja u ukupnoj ceni učestvuju jako malo. Nasuprot tome, korisnički troškovi se značajno smanjuju u slučaju prefabrikovane gradnje, što je prikazano na *slici 18*. U slučaju zavrtnjeva, očekivano je da će troškovi održava-



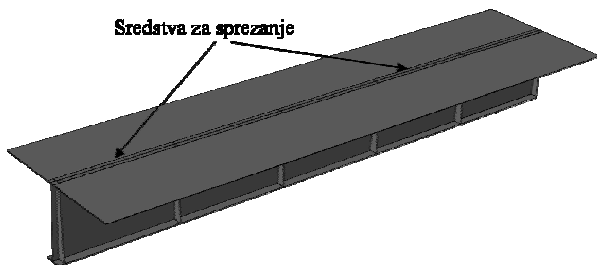
Slika 18. - Poređenje ukupne cene izgradnje za tri varijantna rešenja podužnog smičućeg spoja.

nja i/ili uklanjanja konstrukcije nakon dostizanja životnog veka bude manji, što daje dodatnu prednost ovom rešenju.

8. UTICAJ ZAZORA NA PONAŠANJE SPREGNUTIH NOSAČA SA ZAVRTNJEVIMA

Uticaj zazora između rupe i zavrtnja na ponašanje prefabrikovanog nosača sa zavrtnjevima kao sredstvima za sprezanje analiziran je primenom numeričkog modela u softverskom paketu *Abaqus*. Čelični nosač i betonska ploča modelirani su pomoću površinskih konačnih elemenata, videti *sliku 19*.

Veza između betonske ploče i čeličnog nosača definisana je pomoću nelinearnih opruga kojima je varirana vrednost zazora u vidu položaja početka krive sila-po-

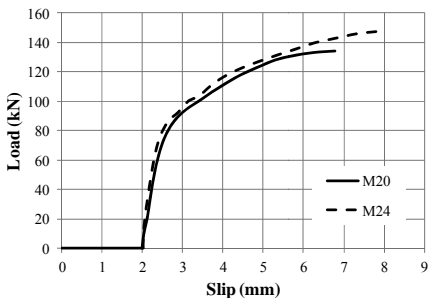


Slika 19. - Model spregnutog nosača sa zavrtnjevima.

meranje, videti *sliku 20*. Numerički model je verifikovan eksperimentalnim rezultatima drugih autora[6]. Zazori između rupa i zavrtnjeva su varirani od 0 do 8 mm na dva načina: 1) ravnomerno raspoređeni i 2) u proizvoljnoj raspodeli od 0 do 8 mm.

Razmatrana su dva nosača statičkog sistema proste grede: 1) raspona 40 m, svojstveno drumskom mostu malog raspona i 2) raspona 12 m, svojstveno spregnutom nosaču u zgradarstvu.

Rezultati ovih analiza pokazali su da granična nosivost nosača nije uslovljena veličinom zazora između rupe i zavrtnja. Veličina inicijalnih deformacija i naprezanja u čeličnom nosaču linerno rastu sa porastom zazora. Ovaj fenomen izraženiji je kod nosača manjeg raspona. Utvrđeno je da se ostvarivanje spregnutog dejstva nosača



Slika 20. - Dijagrami sila-pomeranje nelinearnih opruga kojima je definisana veza između čelika i betona.

uz poništavanje svih zazora postiže samo delom stalnog opterećenja, pa se nepotpuna interakcija u ovom slučaju može rešiti primenom odgovarajućeg nadvišenja. Takođe, zaključeno je da se proračun nepotpune interakcije može vršiti primenom linearne teorije elastičnosti. Velična početnog zazora koju treba uzeti pri proračunu opterećenja koje prihvata samo čelični deo preseka jednaka polovini inicijalnog (nominalnog) zazora, zbog prizvoljnog zazora u stvarnoj konstrukciji.

9. ZAKLJUČCI

Na osnovu rezultata sprovedenog istraživanja zaključeno je da je prefabrikacijuspregnutih nosača od čelika i betona moguće izvršiti primenom zavarenih moždanika u grupi ili zavrtnjeva kao sredstva za sprezanje.

Koncept zamenjujućeg prečnika grupe moždanika je prikazan u [14] na osnovu kog je definisan faktor redukcije za nosivost moždanika u grupi. Ovaj faktor redukcije je potvrđen poređenjem sa rezultatima sopstvenih i eksperimentalnih ispitivanja drugih autora.

Kompletni proračunski modeli za nosivosti zavrtnjeva kao sredstva za sprezanje, kao i za definisanje njihove duktilnosti su razvijenu u [10]. Ovi proračunski modeli analiziraju dva moguća modela loma: lom betona u okolini zavrtnja i lom zavrtnja kombinovanim naprezanjem.

Primenom prefabrikovane gradnje, moguće je značajno skratiti vreme izgradnje. Razmatrajući ukupnu ce-

nu izgradenje koja uključuje cenu konstrukcije i njene montaže, ali i korisničke troškove (ometanje saobraćaja, operacione troškove,...), na primeru mosta raspona 40 m, pokazano je da su oba predložena rešenja, i pored nešto veće cene same izrade konstrukcije, ekonomski isplativa. Početno klizanje zavrnja u rupi ne predstavlja problem u smislu nosivosti, a da se funkcionalni nedostaci (uvećani ugibi i naprezanja u čeliku) mogu ukloniti primenom adekvatnog nadvišenja konstrukcije.

Preporuke za projektovanje moždanika u rupi i zavrtnjeva kao sredstva za sprezanje date su u oblicima koji su pogodni za primenu u okviru standarda Evrokod 4 [2].

10. LITERATURA

- [1] Dedic DJ, Klaiber WF. High-Strength Bolts as Shear Connectors in Rehabilitation Work. *Concrete international* 1984;6(7):41–46.
- [2] EN1994-1-1: Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN); 2004.
- [3] EN1994-2: Eurocode 4 - Design of Composite Steel and Concrete Structures. General Rules and Rules

- for Bridges. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN); 2005.
- [4] Hawkins N. Strength in shear and tension of cast-in-place anchor bolts. Anchorage to Concrete 1987;SP-103:233–255.
 - [5] Kovačević S. Projektovanje i konstruisanje sprengnutih mostova sa aspekta prefabrikovane gradnje. Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 2013
 - [6] Kwon G. Strengthening existing steel bridge girders by the use of post-installed shear connectors. PhD thesis. The University of Texas at Austin, 2008;p.239.
 - [7] Lee M. Bradford MA. Sustainable composite beam behaviour with deconstructable bolted shear connectors. Proceedings of the 2013 Composite Construction in Steel and Concrete VII.
 - [8] Marshall WT, Nelson HM, Banarjee HK. An experimental study of the use of high strength friction-grip bolts as shear connectors in composite beams. The Structural Engineer 1971;49(4):171-178.
 - [9] Okada J, Teruhiko Y, Lebet JP., A study of the grouped arrangements of stud connectors on shear strength behaviour, Structural Eng./Earthquake Eng.,JSCE 2006;23(1):75-89.
 - [10] Pavlović M., Resistance of bolted shear connectors in prefabricated steel-concrete composite decks,

- PhD thesis, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering; 2013.
- [11] Pavlović M, Marković Z, Veljković M, Budjevac D, Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests, *Journal of Constructional Steel Research* 2013;88:134-149.
 - [12] Sedlacek G. Hoffmeister B. Trumpf H. Kühn B. et al. Composite bridge design for small and medium spans. Final report. European Commission – technical steel research Contract No 7210-PR/0113. Luxembourg, 2003.
 - [13] Shim CS, Lee, PG, Kim DW, Chung CH., Effects of Group Arrangement on the Ultimate Strength of Stud Shear Connection. *Proceedings of the 2008 Composite Construction in Steel and Concrete Conference VI, ASCE Conf. Proc.*
 - [14] Spremić M., The analysis of headed studs group behavior in composite steel-concrete beam, PhD thesis, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering; 2013.
 - [15] Spremić M, Marković Z, Veljković M, Budjevac D., Push-out experiments of headed shear studs in group arrangements, *Advanced Steel Construction*; 2013,9(2):170–191.
 - [16] Todorović M. Analiza ponašanja spregnutih mostova sa zavrtnjevima kao sredstvima za sprezanje. Diplomski master rad. Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 2013