

Primljen / Received: 19.6.2016.

Ispravljen / Corrected: 24.2.2017.

Prihvaćen / Accepted: 10.4.2017.

Dostupno online / Available online: 10.6.2017.

Posmični spoj ostvaren grupama moždanika s glavom

Autori:



¹Doc.dr.sc. **Milan Spremić**, dipl.ing.građ.
spremic@grf.bg.ac.rs



¹Prof.dr.sc. **Zlatko Marković**, dipl.ing.građ.
zlatko@imk.grf.bg.ac.rs



¹Doc.d.sc. **Jelena Dobrić**, dipl.ing.građ.
jelena@imk.grf.bg.ac.rs



²Prof.dr.sc. **Milan Veljković**, dipl.ing.građ.
m.veljkovic@tudelft.nl



¹Prof.dr.sc. **Dragan Buđevac**, dipl.ing.građ.
budjevac@grf.bg.ac.rs

¹Sveučilište u Beogradu, Građevinski fakultet
²Tehničko sveučilište u Delftu, Fakultet za građevinarstvo i geologiju

Pregledni rad

Milan Spremić, Zlatko Marković, Jelena Dobrić, Milan Veljković, Dragan Buđevac

Posmični spoj ostvaren grupama moždanika s glavom

Ponašanje i karakteristike predgotovljenih spregnutih elemenata konstrukcija od čelika i betona određeni su ponašanjem uzdužnog posmičnog spoja. Grupe moždanika s glavom najčešće se koriste za formiranje uzdužnog posmičnog spoja predgotovljenih spregnutih nosača. U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih istraživanja i naprednih numeričkih modela posmičnih spojeva, koji su ostvareni grupama moždanika s glavom. Kada se moždanici izvode u grupama, preporuka je da se koriste veće visine od 4d koja je propisana europskom normom.

Ključne riječi:

posmični spoj, grupe moždanika, predgotovljeni spregnuti nosači

Subject review

Milan Spremić, Zlatko Marković, Jelena Dobrić, Milan Veljković, Dragan Buđevac

Shear connection with groups of headed studs

The behaviour and characteristics of the elements of prefabricated composite steel and concrete structures are determined by behaviour of the longitudinal shear connection. Headed studs in groups are most frequently used for forming longitudinal shear connection of prefabricated composite beams. The results of experimental research and advanced numerical models of shear connections, obtained using groups of headed studs, are presented in the paper. When headed studs are arranged in groups, it is recommended to use the headed studs with the height greater than the 4d height prescribed by the Eurocode.

Key words:

shear connection, groups of studs, prefabricated composite beams

Übersichtsarbeit

Milan Spremić, Zlatko Marković, Jelena Dobrić, Milan Veljković, Dragan Buđevac

Scherverbindungen realisiert durch gruppierte Kopfdübel

Das Verhalten und die Eigenschaften vorgefertigter Verbundelemente für Konstruktionen aus Stahl und Beton werden durch das Verhalten der Scherverbindungen in Längsrichtung bestimmt. Meistens werden gruppierte Kopfdübel angewandt, um diese Verbindungen zu realisieren. In dieser Arbeit werden die Resultate experimenteller Untersuchungen und fortschrittlicher numerischer Modelle von Scherverbindungen, die durch gruppierte Kopfdübel realisiert werden, dargestellt. Bei einer Anordnung der Dübel in Gruppen, ist es empfehlenswert größere Dübelhöhen als die gemäß europäischer Norm vorgeschriebene Mindesthöhe von 4d anzusetzen.

Schlüsselwörter:

Scherverbindung, gruppierte Dübel, vorgefertigte Verbundträger

1. Uvod

U industrijskoj visokogradnji značajno je zastupljeno montažno izvođenje. To se posebno odnosi na spregnute međukatne konstrukcije. Rad prikazuje eksperimentalna i teorijska istraživanja ponašanja uzdužnog posmičnog spoja ostvarenog grupiranim moždanicama s glavom. Ovakvo rješenje posmičnog spoja montažnih spregnutih konstrukcija je karakteristično za gradnju mostova, slika 1.



Slika 1. Primjena grupe moždanika u gradnji mostova

Spoj formiran s grupama moždanika je diskontinuiran. Moždanici u grupama se izvode na mjestima otvora u predgotovljenim AB pločama. Nakon montaže predgotovljenih ploča, otvori se ispunjavaju betonom za ostvarivanje posmičnog spoja. Pri grupiranju moždanika, teži se minimalnim dimenzijama grupe, s ciljem smanjenja otvora u predgotovljenoj ab ploči. Za praktičnu primjenu važno je da se eksperimentalno i teorijski istraži otpornost i ponašanje uzdužnog spoja s grupama moždanika koji su izvedeni na manjim međusobnim razmacima u smjeru posmične sile od normom propisanih vrijednosti.

U radu se analizira uzdužni posmični spoj tipičnih spregnutih nosača u objektima visokogradnje. Analizirane grupe moždanika projektirane su s manjim razmacima između moždanika, u smjeru posmične sile, u odnosu na minimalno propisanu vrijednost $5d$, (d – promjer moždanika). Okomito na smjer posmične sile minimalno propisani razmak između moždanika u

punoj betonskoj ploči je $2,5d$, što je neznatno više od tehnološki minimalnog razmaka koji iznosi oko $2,1d$.

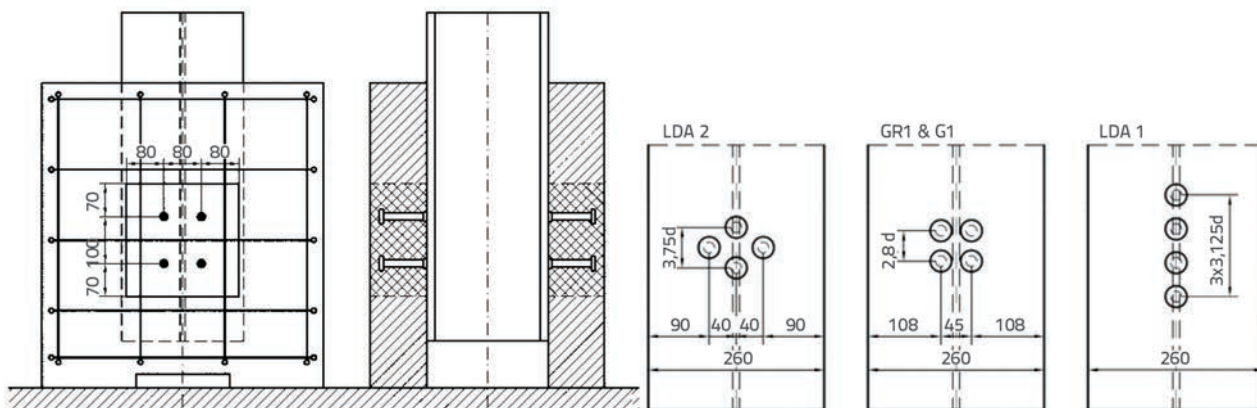
Da bi se ostvarilo spregnuto djelovanje različitih dijelova poprečnog presjeka spregnutog nosača, osim ograničenja klizanja između betona i konstrukcijskog čelika, mora se spriječiti i međusobno razdvajanje različitih komponenata poprečnog presjeka. Način prenošenja uzdužne posmične sile, između čeličnog profila i betonske ploče jedna je od glavnih konstrukcijskih karakteristika spregnutog nosača, pa je zbog toga posebno važno analizirati ponašanje posmičnog spoja.

1.1. Prethodna istraživanja

U prethodnim eksperimentalnim istraživanjima montažnih posmičnih spojeva ostvarenih s grupiranim moždanicama s glavom ispitivani su normirani uzorci s devet moždanika u rasporedu 3×3 . Najznačajnija istraživanja posmičnih spojeva s grupiranim moždanicama s glavom proveli su: Okada i drugi [1], Shim C.S. i drugi [2], Dongyan i drugi [3], Guezouli i drugi [4], Chen Xu i drugi [5]. Od svih spomenutih, samo je u istraživanju koje su proveli Shim C.S. i drugi [2] analizirano otpornost grupiranih moždanika s manjim razmakom između moždanika nego što je normom propisani minimalni razmak. Eurokod 4, dio 2 [6] za spregnute mostove, dopušta primjenu grupiranih moždanika u posmičnim spojevima i propisuje da se pri proračunu moraju uzeti u obzir: lokalna naprezanja u betonu, nejednoliki prijenos sile između dva dijela poprečnog presjeka kao i moguće veće vrijednosti klizanja u uzdužnom posmičnom spoju. Međutim, detaljne smjernice za proračun posmičnih spojeva ostvarenih grupama moždanika s glavom u aktualnim izdanjima norme ne postoje. Od spomenutih istraživanja samo Okada i drugi [1] i Shim C.S. i drugi [2] daju preporuke za proračun karakteristične posmične otpornosti uzdužnog spoja ostvarenog grupama moždanika s glavom.

2. Eksperimentalno istraživanje

Eksperimentalno istraživanje obuhvatilo je šest serija normiranih uzoraka izvedenih u skladu s Prilogom B Eurokoda



Slika 2. Normirani uzorak i ispitane serije s grupom moždanika

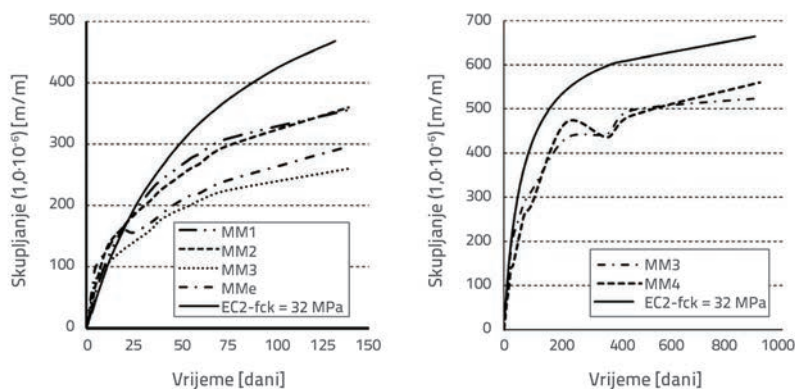
4 [7]. Posmični spojevi su izvedeni s četiri moždanika s glavom promjera 16 mm. Izveden je spoj s normiranim rasporedom moždanika prema Eurokodu [8] (serija ST). Također, ispitivani su i spojevi s grupama moždanika izvedeni s reduciranim vrijednostima razmaka između moždanika u grupi, serije uzoraka: G1, GR1, LDA1 i LDA2. Ispitane serije uzoraka prikazane su na slici 2.

Svaki uzorak je formiran od čeličnog profila HEB 260 i dvije predgotovljene ab ploče debljine 12 cm. Ploče su armirane rebrastom armaturom promjera 10 mm, kvalitete B500, prema Prilogu B Eurokoda 4 [8]. Uzorci su betonirani u laboratoriju (slika 3.). Nakon što je predgotovljena ab ploča horizontalno postavljena preko čeličnog profila, izvedeno je betoniranje otvora u pločama, najprije jedne strane, a nakon tri dana druge strane uzorka (slika 3.).



Slika 3. Sastavljanje uzoraka u laboratoriju

Za betoniranje otvora upotrijebljen je beton s najvećim nominalnim zrnim agregata od 16 mm. Pri projektiranju mješavine betona jedan od ciljeva je bio dobivanje betona sa što manjim skupljanjem. Primjenom aditiva za redukciju skupljanja betona dobiveno je skupljanje koje je do 20 % manje od proračunskih vrijednosti dobivenih prema Eurokodu 2 [9]. Usporedbe mjerenih vrijednosti dijagrama skupljanje betona

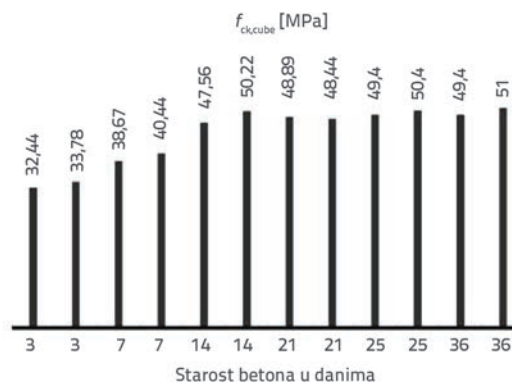


Slika 4. Dijagrami skupljanja betona

– vrijeme, s proračunskim dijagramima skupljanja prema [9], prikazane su na slici 4. Skupljanje je mjereno na kontrolnim uzorcima u laboratoriju s kontroliranom temperaturom i vlažnosti zraka, slika 5. Tijekom ispitivanja mjerene su vrijednosti temperature i relativne vlažnosti zraka. Mjerene vrijednosti temperature bile su u području od 20 do 25 °C, a relativne vlažnosti 23 ± 2 %.



Slika 5. Mjerenje skupljanja betona



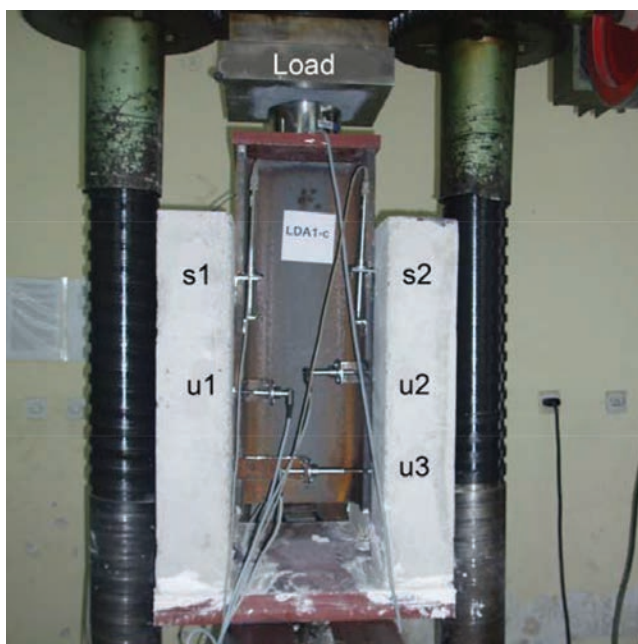
Slika 6. Prirast čvrstoće betona

Površina čeličnog profila prije ugradnje betona premazana je uljem, kako bi se uklonio utjecaj prionjivosti betona. Površine predgotovljenih ab ploča koje su u direktnom kontaktu sa svježim betonom za ostvarivanje posmičnog spoja tretirane su premazom za kontaktne spojeve starog i novog betona. Treći dan nakon betoniranja jedne strane uzorka, uzorci su okretani i betonirana je druga strana uzorka. Uzorci su ispitivani 21 dan nakon betoniranja druge strane, odnosno 24 dana nakon betoniranja prve strane uzorka. Prirast tlačne čvrstoće betona u vremenu prikazan je na slici 6. Na temelju prikazanih vrijednosti na slici 6, može se zaključiti da nema razlike u vrijednostima tlačne čvrstoće betona, odnosno, zanemarive su razlike između vrijednosti tlačne čvrstoće betona nakon 14 dana.

Normiranim vlačnim ispitivanjem definirani su dijagrami naprežanje-deformacija za materijal čeličnog profila i materijal moždanika. Također su ispitani uzorci armature koja je korištena za izradu ab ploča. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće materijala moždanika prikazani su na slici 9. Detaljni rezultati ispitivanja korištenih materijala prikazani su u [7].

Ispitivanje uzorka provedeno je u dvije faze u skladu s Prilogom B norme EN 1994-1-1 [8]. Najprije su uzorci 25 puta opterećeni do vrijednosti od 40 % očekivane posmične otpornosti (približno 270 kN) i rasterećeni na vrijednost od 5 % (približno 32 kN) očekivane posmične otpornosti. Nakon "treniranja" uzorci se opterećuju do sloma tako da zadnji ciklus opterećenja mora trajati najmanje 15 minuta. Pri ispitivanju bilo je važno da do sloma uzorka dođe za 20-25 minuta od početka zadnjeg ciklusa nanošenja opterećenja.

Izmjerena sila iznosi do 1000 kN i kontrolna jedinica preše korištene su za praćenje vrijednosti sile. Klizanje u posmičnom spoju mjereno je sa po dva LVDT senzora (s1 i s2) sa svake strane uzorka, (slika 7.). Odvajanje u posmičnoj vezi između betonske ploče i čeličnog profila kao i odvajanje betonskih ploča kontinuirano je praćeno u dvije točke pomoću LVDT senzora u1, u2 i u3. Slika 7. prikazuje uzorak spreman za ispitivanje posmičnog spoja.

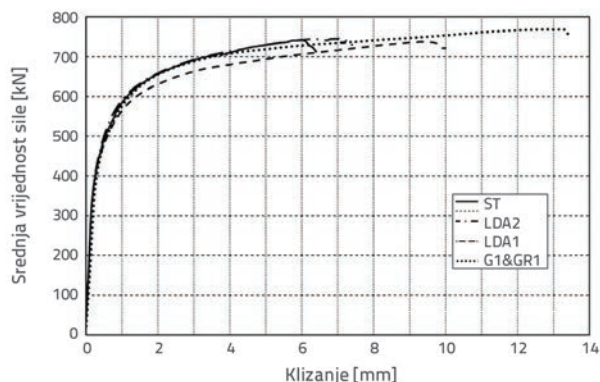


Slika 7. Ispitivanje uzorka

2.1. Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja uzoraka su detaljno prikazani u istraživanju koje su objavili Spremić i drugi [10]. Osnovni rezultati eksperimentalnog istraživanja su prikazani u ovom radu. Odnos srednja vrijednost sile i klizanja prikazan je na dijagramima na slici 8. Kod uzoraka G1 i GR1, koji su izvedeni s istim rasporedom moždanika, variran je tip predgotovljene ploče. Uzorci GR1

imaju armaturu neposredno ispred moždanika koja ujedno služi i za vezu betona predgotovljene ploče i betona za ostvarivanje posmičnog spoja, dok kod uzoraka G1 ta armatura ne postoji [10]. Za obje serije uzoraka G1 i GR1, dobiveni su isti rezultati krajnje posmične otpornosti i duktilnosti pri krajnjem opterećenju. Na ovaj način je potvrđeno da armatura neposredno ispred grupe moždanika ne utječe na posmičnu otpornost i duktilnost grupe. Isti rezultat zabilježen je u istraživanju [11].



Slika 8. Dijagrami sila-klizanje za grupe moždanika

Rezultati odnosa karakteristične vrijednosti posmične otpornosti $P_{Rk,Exp}$ ispitanih serija uzoraka i karakteristične posmične otpornosti $P_{Rk,EC4}$ izračunane prema Eurokodu 4 prikazani su u tablici 1. Za proračun karakteristične vrijednosti posmične otpornosti $P_{Rk,EC4}$ korištena su eksperimentalno dobivena mehanička svojstva materijala moždanika i betona i čije su vrijednosti također prikazane u tablici 1. Samo u slučaju serije uzoraka LDA1 dobiven je rezultat u kojem je karakteristična posmična otpornost za 6 % manja od karakteristične proračunske vrijednosti.

Tablica 1. Rezultati ispitivanja

Uzorak (razmak)	f_{ck} [MPa]	E_{cm} [MPa]	$P_{Rk,Exp} / P_{Rk,EC4}$
ST (6,25d)	34	36000	0,99
GR1 (2,8d)	32	34000	1,08
G1 (2,8d)	32	34000	1,08
LDA1 (3,1d)	34	36000	0,94
LDA2 (3,75d)	34	36000	1,03

Svi ispitani uzorci ponašali su se duktilno, jer su mjerene vrijednosti klizanja pri slomu bile veće od 6,0 mm, što je minimalno zahtijevana vrijednost za duktilnost spoja koja je propisana Eurokodom 4 (vidjeti dijagrame na slici 8.). Slom spoja pri krajnjem posmičnom opterećenju uzoraka nastupio je posmičnim otkazivanjem moždanika. Uzorke serija G1 i GR1 karakterizira mješoviti oblik sloma. U slučaju uzoraka G1 i GR1, vrijednosti su klizanja pri krajnjem opterećenju i do 80 % veće

od vrijednosti za normirani raspored moždanika u spoju (serija ST), na temelju čega se može zaključiti da je došlo do mješovitog oblika sloma.

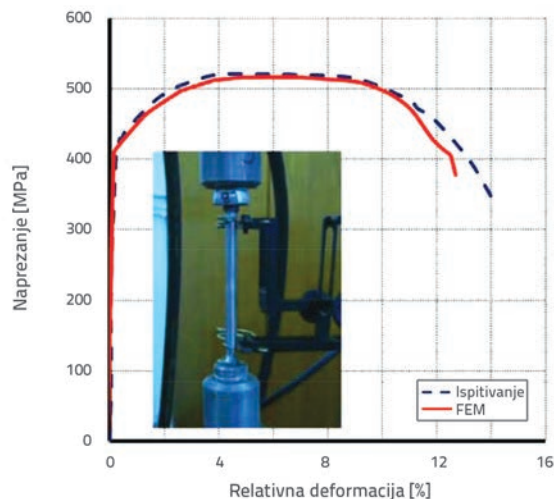
3. Numerička analiza

Za numeričku simulaciju i provjeru prikazanih rezultata ispitivanja provedene su analize metodom konačnih elemenata (eng. *finite element method* - FEM) provedene su pomoću programa ABAQUS-Explicit s opcijom *non-uniform mass scaling* tijekom proračuna (opcija nejednolikog skaliranja masa). Iskorištene su dvije ravnine simetrije uzorka, pa je modelirana samo jedna četvrtina uzorka. Za sve kontakte između elemenata numeričkog modela korištena je opcija opći kontakt, s definiranjem *hard contact* za ponašanje u smjeru normale na ravninu kontakta i *penalty's* koeficijentom trenja 0,24 za ponašanje u ravnini kontakta. Oslonac ab ploče u pravcu okomitom na ravninu ploče definiran je kao elastični oslonac. Krutost elastičnog oslonca je između 20000 N/mm i 24000 N/mm. Postupkom kalibracije numeričkog modela usvojena je vrijednost za krutost oslonca 21000 N/mm. Pri kalibraciji numeričkog modela korištene su krivulje opterećenje – klizanje dobivene eksperimentalnim ispitivanjem. Definirani modeli materijala korišteni u proračunu kalibrirani su s eksperimentalnim rezultatima ispitivanja svojstava materijala uzoraka: čelika, moždanika i betona. Za materijal moždanika korišteni su također i modeli za simulaciju oštećenja materijala *ductile damage* i *shear damage*. Vrijednost parametra oštećenja *damage variable* jednaka je 1,0 za vrijednost ekvivalentnog plastičnog pomaka od 0,204 mm. Vrijednost pomaka pri slomu od 0,4 mm usvojena je za posmično oštećenje *shear damage* materijala moždanika. Krivulje kojima je definiran odnos parametar oštećenja – ekvivalentni plastični pomak opisane su u istraživanjima [12, 7].

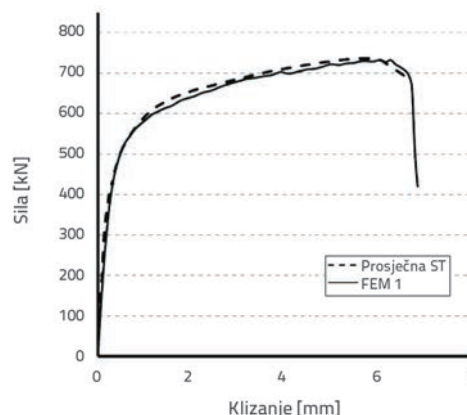
Dijagrami naprezanje-deformacija, definirani u Eurokodu 2, za beton C35/45 korišteni su za dio krivulje naprezanje-deformacija do vrijednosti deformacije $\epsilon_{cu1} = 3,5$. U području deformacija $\epsilon_c > 3,5$, krivulja naprezanje-deformacija je analitički opisana prema preporuci kineske norme GB50010-2002 [14] uz određene modifikacije prema [4, 13].

Pukotine i oštećenja u betonskom dijelu poprečnog presjeka određivane su primjenom modela *concrete damage plasticity*. Parametar oštećenja za tlak ima vrijednost jednaku nuli za vrijednosti neelastične deformacije betona do 0,0014 ‰. Nadalje, za neelastične deformacije u betonu od 0,1 ‰ parametar oštećenja ima vrijednost od 0,995. Vremenski ovisne karakteristike, skupljanje i puzanje betona, nisu uključene u model materijala. Prikladnim izborom mješavine betona koji je korišten za ostvarivanje posmičnog spoja pri eksperimentalnom ispitivanju, skupljanje betona je smanjeno. Trajanje eksperimentalnog ispitivanja uzoraka nema utjecaj na puzanje betona.

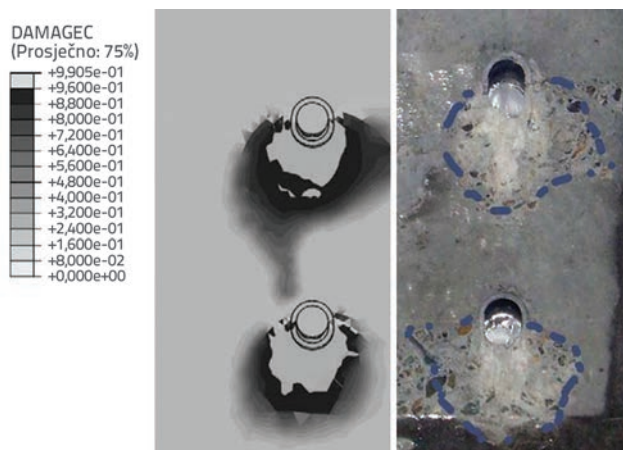
Modeli materijala su detaljno opisani u [13]. Na slici 9. prikazan je dijagram naprezanje-deformacija za materijal moždanika dobiven eksperimentalnim putem i kalibriranim numeričkim modelom.



Slika 9. Dijagram naprezanje-relativna deformacija za moždanik (usporedba eksperimenta i proračuna)



Slika 10. Dijagram sila-klizanje (usporedba eksperimenta i proračuna)



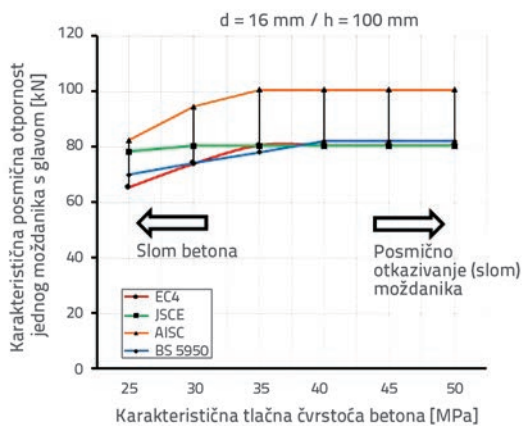
Slika 11. Zona oštećenja u betonu (usporedba proračuna i eksperimenta)

Rezultati u obliku dijagrama sila–klizanje kalibriranog numeričkog modela prikazani su na slici 10. zajedno s eksperimentalnim rezultatima. Prikazani dijagrami potvrđuju dobro poklapanje rezultata. Uz dijagrame, uspoređene su i zone oštećenja betona

neposredno ispred moždanika u ab ploči nakon ispitivanja i zone s maksimalnim vrijednostima parametra oštećenja iz FEM modela (slika 11.). Također su i u ovom slučaju dobivena dobra poklapanja površina oštećenja AB ploče.

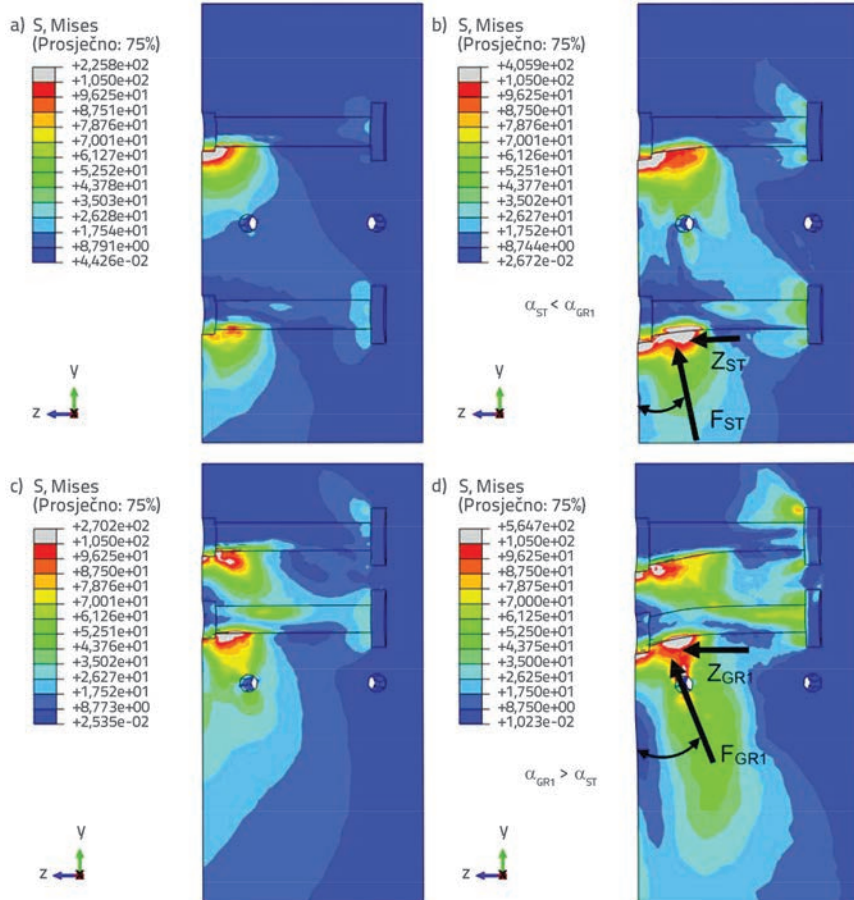
4. Ponašanje posmičnog spoja

Moždanici s glavom kao najčešće primjenjivano sredstvo za sprezanje, uključeni su sa svojim karakteristikama u danas prihvaćene norme u svijetu. Prema EN 1994, otpornost moždanika s glavom ovisi o promjeru moždanika, kvaliteti materijala moždanika i tlačnoj čvrstoći betona. Na slici 12. prikazani su dijagrami koji definiraju karakterističnu posmičnu otpornost moždanika promjera 16 mm u ovisnosti o karakterističnoj tlačnoj čvrstoći betona. Otpornosti su izračunane prema [8, 15-17]. Za vrijednost tlačne čvrstoće betona od približno 35 MPa, posmična otpornost moždanika prema kriteriju sloma betona i posmičnog otkazivanja moždanika su iste. Za niže vrijednosti čvrstoće betona mjerodavno je otkazivanje betona, a za veće vrijednosti mjerodavno je posmično otkazivanje moždanika (slika 12.).



Slika 12. Posmična otpornost moždanika s glavom $d = 16$ mm

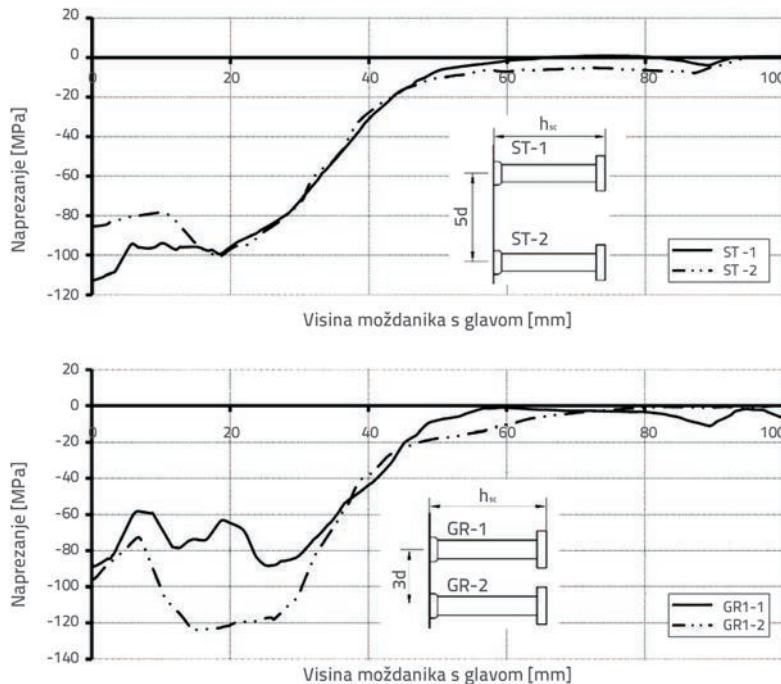
Grupiranjem moždanika i smanjenjem razmaka između njih, lokalna naprezanja u betonu imaju veće vrijednosti u usporedbi s naprezanjima u betonu kod normiranog rasporeda moždanika. Međutim, kako je pokazano na dijagramima (slika 12.), za veće vrijednosti tlačne čvrstoće betona radi ostvarivanja posmičnog spoja mjerodavan je kriterij posmično otkazivanje moždanika. Može se stoga zaključiti da će se upotrebom betona s većim vrijednostima tlačne čvrstoće moguće je reducirati



Slika 13. Naprezanja u betonskoj ploči: a) ST-SLS opterećenja; b) ST - 90 % ULS opterećenja; c) GR1 - SLS opterećenje; d) GR1 - 90 % ULS opterećenje

razmaci između moždanika. Uzimajući u obzir način izvođenja konstrukcije potpuno je opravdano i ekonomski prihvatljivo da se za ostvarivanje posmičnog spoja upotrebljavaju betoni s većim vrijednostima tlačne čvrstoće.

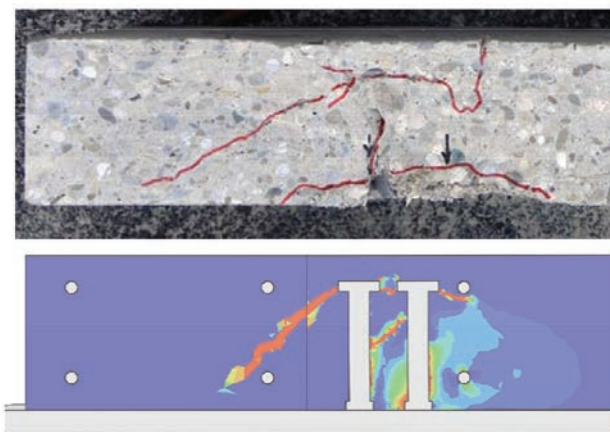
Na slici 13. je prikazano stanje naprezanja u betonu za normirani raspored moždanika ST i za grupu moždanika GR1. Prikazane su vrijednosti naprezanja za vrijednosti opterećenja koje odgovaraju граничном stanju uporabljivosti i vrijednostima koje iznose 90 % krajnje posmične otpornosti. Naprezanja u betonu su veća kod grupe GR1 u usporedbi s grupom ST, (slika 13.). Naprezanja u betonu ispred moždanika u grupi GR1 su 17 % veća od naprezanja u betonu ispred moždanika u grupi ST, pri vrijednostima posmične sile od 70 % krajnje posmične otpornosti, odnosno 36 % veća pri vrijednostima posmične sile od 90 % krajnje posmične otpornosti (slika 14.). Također, jasno se uočava da se u slučaju grupe moždanika GR1 aktiviraju viši slojevi betona, polazeći od kontaktne površine između čelika i betona. Ovo rezultira pomicanjem rezultante sila u kontaktnoj ravnini moždanika i betona od kontaktne površine, u slučaju grupe GR1 (slike 13. i 14.). Pri većim vrijednostima naprezanja dolazi do većih oštećenja betona uz korijen moždanika, što povećava kut između rezultante kontaktnih sila i kontaktne površine, $\alpha_{GR1} > \alpha_{ST}$. Uslijed promjene kuta rezultante sile javlja



Slika 14. Naprezanja u betonskoj ploči

se veća vrijednost vlačne sile u moždanicima (slika 13.). Takav zaključak se može izvesti i ako se usporede vrijednosti naprezanja u zoni betona oko glave moždanika (slika 13.).

Pri većoj vrijednosti vlačne sile dolazi do pojave karakteristične pukotine u AB ploči kod serije uzoraka GR1 (slika 15.). Grupu od četiri moždanika GR, kako je prethodno rečeno, karakterizira mješoviti oblik sloma koji uzrokuje inicijalnu pukotinu u betonu i posmično otkazivanje moždanika.



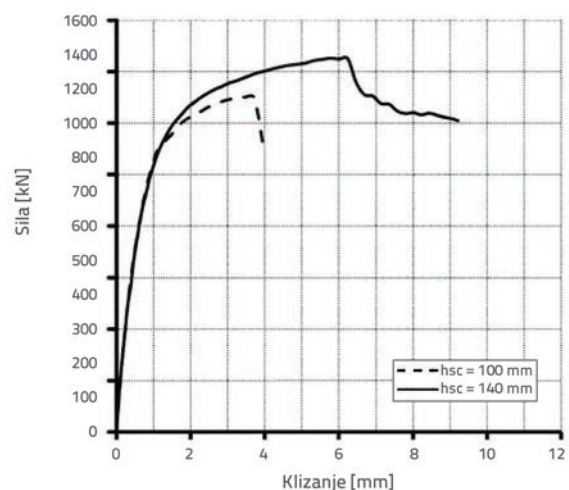
Slika 15. Inicijalna pukotina u betonskoj ploči

Vrijednosti naprezanja neposredno u kontaktu moždanika i betona višestruko su veće od vrijednosti tlačne čvrstoće betona. To je posljedica prostornog stanja naprezanja u zoni betona između korijena i glave moždanika [13, 18]. Da bi se prostorno stanje naprezanja održalo, nužno je da moždanik ima potrebnu

visinu kako bi se osiguralo dostatno sidrenje. Eurokod 4 propisuje minimalnu visinu moždanika od $4d$ da bi se ostvarila puna posmična otpornost. Ako je visina moždanika manja od $4d$ ali veća od $3d$, Eurokod 4 definira koeficijent redukcije kojim se umanjuje otpornost moždanika prema kriteriju sloma betona. Sve dok je prostorno stanje naprezanja moguće održati, posmična otpornost grupe moždanika može se odrediti kao zbroj otpornosti pojedinačnih moždanika u grupi. Prema prethodno prikazanim rezultatima, vlačna sila u spoju je veća kada su moždanici grupirani. Da bi se prostorno stanje održalo, u slučaju grupe moždanika, nužno je osigurati dostatno sidrenje koje se postiže usvajanjem moždanika veće visine. Visina moždanika u ispitanoj grupi GR1 je 100 mm odnosno $6,25d$, što je za 50 % više od normirane vrijednosti $4d$ za punu otpornost moždanika prema Eurokodu. Grupa GR1 je granični slučaj, jer se pukotina u

betonu otvara pri vrijednostima posmičnog opterećenja koje je blisko graničnim vrijednostima.

Da bi se opisano ponašanje potvrdilo, provedena je parametarska FEM analiza. Analizirana je grupa od devet moždanika promjera 16 mm u rasporedu 3×3 . Analizirana je grupa s moždanicima visine 100 mm ($6,25d$) i visine 140 mm ($8,75d$). Dobiveni rezultati su dijagramima prikazani na slici 16.

Slika 16. FEM dijagram sila-klizanje, rezultati za grupu moždanika 3×3

U slučaju grupe moždanika visine 100 mm dolazi do sloma betona. Krajnja posmična otpornost grupe moždanika je za 16 % manja od sume otpornosti pojedinačnih moždanika u grupi. Povećanjem visine moždanika na 140 mm ($8,75d$) postiže se puna posmična otpornost. U tom slučaju posmična otpornost

grupe moždanika jednaka je sumi otpornosti pojedinačnih moždanika u grupi. Povećanjem visine moždanika ostvarena je i potrebna duktilnost spoja, a klizanje pri graničnoj vrijednosti posmičnog opterećenja je veće od 6,0 mm.

Konstruktivno rješenje uzdužnog spoja s grupama moždanika podrazumijeva da se grupe moždanika ugrade na mjestima otvora u AB ploči. Da bi se predgotovljene ploče izvodile kao tipske, potrebno je grupe moždanika ugrađivati na međusobno jednakom razmaku. Duktilnost grupe moždanika dopušta preraspodjelu uzdužne posmične sile između grupa moždanika u posmičnom spoju. Upotreba duktilnih moždanika moguća je u spojevima pune otpornosti, kao i u spojevima s djelomičnom posmičnim djelovanjem. Eurokod 4 uvodi model djelomično posmičnog spoja u proračun, po kome se otpornost na savijanje nosača određuje iz posmične otpornosti uzdužnog posmičnog spoja. Prema Eurokodu 4, svi moždanici s glavom promjera od 16 do 25 mm, čija je visina veća od $4d$, svrstavaju se u duktilne moždanike. Pokazano je da se grupa od četiri moždanika, promjera 16 mm, može smatrati duktilnom ako je visina moždanika veća od $6,25d$. Parametarskom analizom je pokazano da se adekvatnom visinom moždanika može postići duktilno ponašanje spoja (slika 16). Nužno je ostvariti dostatno sidrenje moždanika u AB ploči usvajanjem veće visine moždanika kako bi se očuvalo prostorno

stanje naprezanja u betonu ispred grupe i između moždanika u grupi. U radu [7] detaljno su prikazani kriteriji kada se ponašanje grupe moždanika može smatrati duktilnim.

5. Zaključci

Na temelju rezultata eksperimentalnih i numeričkih analiza koje su provedene i prikazane u ovom radu, mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Grupiranjem moždanika ne narušava se duktilnost i otpornost posmičnog spoja ako su međusobni razmaci moždanika u grupi u skladu s odredbama Eurokoda 4.
- Ponašanje, duktilnost i otpornost posmičnog spoja, koji je ostvaren grupom moždanika s glavom, ovisi o visini moždanika. Pri projektiranju grupe moždanika treba koristiti moždanike veće visine.
- Kada su razmaci između moždanika manji od minimalno normiranog razmaka $5d$, usvajanjem visine moždanika veće od $4d$ moguće je postići punu posmičnu otpornost grupe moždanika.
- Kod grupa od četiri moždanika u rasporedu 2×2 , s međusobnim razmakom od $3d$ u smjeru sile, nije potrebna redukcija otpornosti ako je visina moždanika veća od $6.5d$.

LITERATURA

- [1] Okada, J., Yoda, T., Lebet, J.P.: The Study of the Grouped Arrangements of Stud Connectors on Shear Strength Behavior, *Structural Eng./Earthquake Eng. SCE*, 23 (2006) 1, pp. 75-89.
- [2] Shim, C.S., Lee, P.G., Kim, D.W., Chung, C.H.: 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.*, [https://doi.org/10.1061/41142\(396\)8](https://doi.org/10.1061/41142(396)8)
- [3] Dongyan, X., Yuqing, L., Zhen, Y., Jun, H.: Static behavior of multi-stud shear connectors for steel-concrete composite bridge, *Journal of Constructional Steel Research*, 74 (2012) pp. 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.09.017>
- [4] Guezouli, S., Lachal, A., Nguyen, Q.H.: Numerical investigation of internal force transfer mechanism in push-out tests, *Engineering Structures*, 52 (2013), pp. 140-152, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.021>
- [5] Chen, X., Kunitomo, S., Chong, W., Qingtian, S.: Parametrical static analysis on group studs with typical push-out tests, *Journal of Constructional Steel Research*, 72 (2012), pp. 84-96, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.10.029>
- [6] EN1994-2, Eurocode 4, "Design of Composite Steel and Concrete Structures. General Rules and Rules for Bridges", CEN (European Committee for Standardization), 2005.
- [7] Spremić, M.: The analysis of headed studs group behavior in composite steel-concrete beam, PhD thesis, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, 2013.
- [8] EN1994-1-1, Eurocode 4, "Design of Composite Steel and Concrete Structures. General Rules and Rules for Buildings", CEN (European Committee for Standardization), December 2004.
- [9] EN1992-1-1, Eurocode 2, "Design of Concrete Structures, General Rules and Rules for Buildings", CEN (European Committee for Standardization), 2004.
- [10] Spremić, M., Marković, Z., Veljković, M., Buđevac, D.: Push-out experiments of headed shear stud in group arrangement, *Advanced Steel Construction, International Journal*, 9 (2013) 2, pp. 170-191, <https://doi.org/10.18057/IJASC.2013.9.2.4>
- [11] Krister Cederwall, L.A.: Push-out Tests on Studs in High Strength and Normal Strength Concrete, *Journal of Constructional Steel Research*, 36 (1996) 1, pp. 15-29.
- [12] Spremić, M., Marković, Z., Veljković, M., Pavlović, M.: FE validation of equivalent diameter model for headed studs in group arrangement, *Steel and Composite Structures 2017, Review in progress*.
- [13] Pavlović, M., Marković, Z., Veljković, M., Buđevac, D.: Bolted Shear Connectors vs. Headed Studs Behaviour in Push-out Tests, *Journal of Constructional Steel Research*, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.05.003>
- [14] GB 50010-2002 Code for Design of Concrete Structures, National Standard of the People's Republic of China, China Architecture & Building Press, Beijing 2002.
- [15] ANSI/AISC 360-05, An American National Standard, Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago 2005.
- [16] BS 5950-3.1:1990, "Structural Use of Steelwork in Building. Part 3 Design in Composite Construction", UK British Standard Institution, 1990.
- [17] Standard Specifications for Steel and Composite Structures, Japan Society of Civil Engineers, December, 2009
- [18] Oehlers, D.J.: Stud shear connectors for composite beams, PhD Thesis, Department of Engineering University of Warwick, March 1980.