

OBNAŠANJE STIKA MED BETONOM IN ARMATURNIMI PALICAMI IZ BAZALTNIH VLAKEN

BOND BEHAVIOUR BETWEEN CONCRETE AND BASALT FIBRE REINFORCED POLYMER BARS

doc. dr. Drago Saje, univ. dipl. inž. grad.

drago.saje@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Jože Lopatič, univ. dipl. inž. grad.

joze.lopatic@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in
geodezijo,

Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 624.014.2:691.32

Povzetek | V članku obravnavamo obnašanje sidranja armaturnih palic iz bazaltnih vlaken v beton. Bazaltna armatura ima kot nekovinska armatura pred jekleno številne prednosti. Glavna prednost bazaltne armature je, da ta armatura ne korodira in je s tem primerna za uporabo v agresivnem okolju. Nekaj preostalih prednosti in pomanjkljivosti ter posebnosti na področju proizvodnje, regulative in uvajanja te armature v prakso podajamo v uvodnem razdelku.

Bazaltne armaturne palice so se med z vlakni ojačanimi polimernimi palicami, ki se že uporabljajo v praksi, pojavile kot zadnje, zato se pri njih še na številnih področjih kaže potreba po intenzivnem raziskovanju. Rezultati preiskav obnašanja stika med betonom in armaturo so podlaga za določanje potrebnih sidrnih in preklonnih dolžin armaturnih palic. Že pred leti (Saje, 2019) smo se lotili preiskovanja obnašanja stika med bazaltnimi armaturnimi palicami in betonom z izvlečnimi preizkusi. Med temi spremljamo sprijemno napetost in zdrs palice ter določamo sprijemno odpornost. V članku so predstavljeni rezultati lastnih preiskav obnašanja stika med bazaltnimi armaturnimi palicami premera 12 mm in dvema vrstama betona, betonom običajne in betonom visoke trdnosti. Preiskovane bazaltne armaturne palice so imele spiralni ovoj in peščeni posip. Za primerjavo za obe vrsti betona podajamo še rezultate izvedenih izvlečnih preiskav jeklene rebraste armature enakega premera. Ugotovili smo, da preizkušanci z bazaltno armaturo dosega-jo približno 70 % sprijemne trdnosti preizkušancev z jekleno armaturo. Tako pri preizku-šancih z bazaltno kakor tudi pri preizkušancih z jekleno armaturo pa se je pokazalo, da ima tlačna trdnost betona velik vpliv na sprijemno trdnost in potek zveze med sprijemno napetostjo in izmerjenim zdrsom.

Ključne besede: bazaltna armatura, jeklena armatura, izvlečni test, sprijemna trdnost, zdrs, beton visoke trdnosti

Summary | The article discusses the behaviour of anchorage of basalt fibre reinforcement bars in concrete. As a non-metallic reinforcement, basalt reinforcement has many advantages over steel. The main advantage of basalt reinforcement is that it does not corrode and is therefore suitable for use in aggressive environments. Some other advantages, disadvantages and peculiarities in fabrication, regulation and application of this reinforcement in practice are mentioned in the introductory section. Basalt reinforcement is one of the newest among fibre reinforced polymer reinforcements, which are already being used in practice and therefore still require intensive research in many areas. The

results of bond behaviour studies are the basis for determining the required anchorage and lap lengths of reinforcing bars. We started to investigate the bond behaviour between basalt rebars and concrete with pull-out tests years ago (Saje, 2019). In this process, we monitor the bond stress and slip of the bars and determine the bond strength. The article presents the results of the bond behaviour of basalt reinforcing bars with a diameter of 12 mm and two types of concrete, normal strength concrete and high strength concrete. The basalt reinforcement bars were helically wrapped and sand coated. For comparison, the results of pull-out tests with ribbed steel reinforcement of the same diameter in both types of concrete are also presented. It was found that the specimens with basalt reinforcement achieved about 70 % of the bond strength of specimens with steel reinforcement. However, it was also found that for both basalt and steel reinforced specimens, the compressive strength of the concrete has a great influence on the bond strength and on the relationship between the bond stress and the measured slip.

Key words: basalt rebars, steel rebars, pull-out test, bond strength, slip, high strength concrete

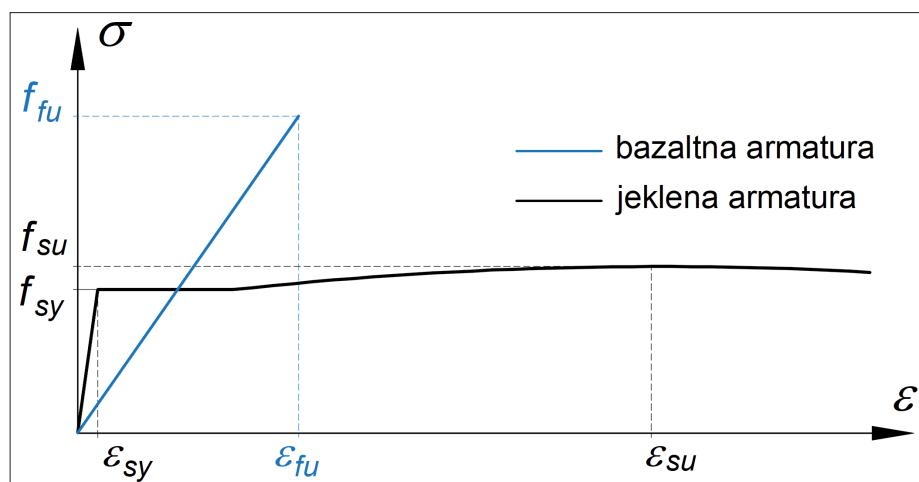
1 • UVOD

Agresivno okolje v splošnem predstavlja nevarnost za klasično armiranobetonske konstrukcije. V takem okolju sta zaradi večje možnosti pojava korozije jeklene armature lahko ogroženi tako trajnost kakor tudi nosilnost konstrukcij. V skrajnem primeru lahko to privede do odpadanja krovnega sloja betona in celo do popolne izgube nosilnosti elementa. V zadnjih desetletjih se raziskovalci po celem svetu precej ukvarjajo z alternativnimi vrstami nekovinske armature, ki ne korodira ((Cosenza, 2002), (Mazaheripour, 2013), (Yang, 2017), (Abedini, 2017), (Jabbar, 2018), (Kabashi, 2020), (Tarawneh, 2020), (Imjai, 2020)). Najpogostejše se za izdelavo korozijsko neobčutljivih armaturnih palic uporabljajo z različnimi vlakni ojačani polimeri (Fiber Reinforced Polymers – FRP). Zaradi časovnega sosledja razvoja materialov so bolj uveljavljene palice iz steklenih, karbonskih in aramidnih vlaken, palice iz bazaltnih vlaken pa so med novjšimi. Lastnosti teh palic in obnašanje z njimi armiranih nosilnih elementov so posledično manj raziskane. To se odraža tudi v podrobnejših priporočilih za projektiranje betonskih konstrukcij z vgrajeno nekovinsko armaturo ((ACI, 2015), (JSCE, 1997), (fib, 2013) ...), kjer v nasprotju z armaturo iz steklenih, karbonskih in aramidnih vlaken za armaturo iz bazaltnih vlaken konkretnih vrednosti parametrov, potrebnih za projektiranje, ni podanih. V splošnih modelnih predpisih fib MC 2010 za betonske konstrukcije (fib, 2013) je vsa armatura iz z vlakni ojačanih polimerov obravnavana kot nekovinska armatura v posebnem razdelku.

Poleg tega da bazaltna armatura ne korodira, ima še vrsto drugih ugodnih lastno-

sti: razmeroma dobro toplotno in požarno odpornost, elektromagnetno nevtralnost, ni nevarna za zdravje ljudi, ne absorbira jedrskega sevanja, ne vpija vode, je trajnostni material, prijazen do okolja in primeren za reciklažo. Ob tem so palice iz bazalta lahke in imajo visoko natezno trdnost, ki je odvisna od proizvodnega procesa, od vrste veziva, od deleža vlaken v palici, za razliko od jeklenih pa tudi od premera palice. Za palice različnih proizvajalcev so v literaturi navedene okvirne vrednosti natezne trdnosti med 900 MPa in 1400 MPa. Vrsta veziva in delež vlaken, ki sta spremenljiva parametra proizvodnje, ključno vplivata tudi na temperaturna razteznostna koeficienta bazaltne armature. Ta se, drugače kot pri jekleni armaturi, močno razlikujeta v vzdolžni in prečni smeri (ACI, 2015) pa tudi med

proizvodi. Na temperaturni razteznostni koeficient v vzdolžni smeri imajo prevladujoč vpliv lastnosti vlaken, v prečni smeri pa lastnosti veziva. Okvirne vrednosti temperaturnih razteznostnih koeficientov bazaltnih palic iz literature (Aydin, 2018) znašajo za vzdolžno smer $\alpha_{T,l} = 2 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ do $4 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ in $\alpha_{T,t} = 18 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ do $26 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ za prečno smer. Z vidika dimenzioniranja konstrukcij je pri uporabi bazaltnih palic tako kot tudi pri uporabi palic iz vseh ostalih z vlakni ojačanih polimerov treba nameniti povečano pozornost mejnim stanjem uporabnosti, saj ima takšna armatura v primerjavi z jekleno relativno nizek elastični modul (slika 1). Neustrezno dimenzionirani armiranobetonski elementi, s poudarkom le na mejnih stanjih nosilnosti, imajo posledično bistveno manjšo togost in s tem večje povese, večje pa so tudi širine razpok. Tako kot na natezno trdnost ima tudi na modul elastičnosti bazaltne armature ključen vpliv delež vlaken v palici, v literaturi pa je za modul elastičnosti



Slika 1 • Značilna delovna diagrama jeklene armature in armature iz bazaltnih vlaken.

mogoče najti vrednosti vse od 40 GPa do 70 GPa. Bazaltna armatura je v osnovi krhek material, saj se vse do porušitve obnaša linearno elastično (slika 1), kar je neugodno za projektiranje z njo armiranih betonskih konstrukcij na potresnih območjih. Se pa v zadnjem času že pojavljajo hibridne arma-

turne palice, ki naj bi združevale dobre lastnosti bazalta in jekla, visoko natežno trdnost bazalta in duktilnost jekla (Xiao, 2018). Poleg tega ciklične preiskave stičnega območja obnašanja z vlakni ojačanih polimernih palic in betona (Shen, 2020) kažejo precej boljše možnosti sipanja energije kot podobne

preiskave sidrnega območja jeklenih palic (Atavi-Fard, 2002). Predmet raziskav so tudi hibridne armaturne palice povsem brez jekla, ki v tlaku izkazujejo elastoplastični odziv (Teng, 2018). Nekovinska armatura se na podlagi dodatnih raziskav počasi širi tudi na konstrukcije na potresni območjih.

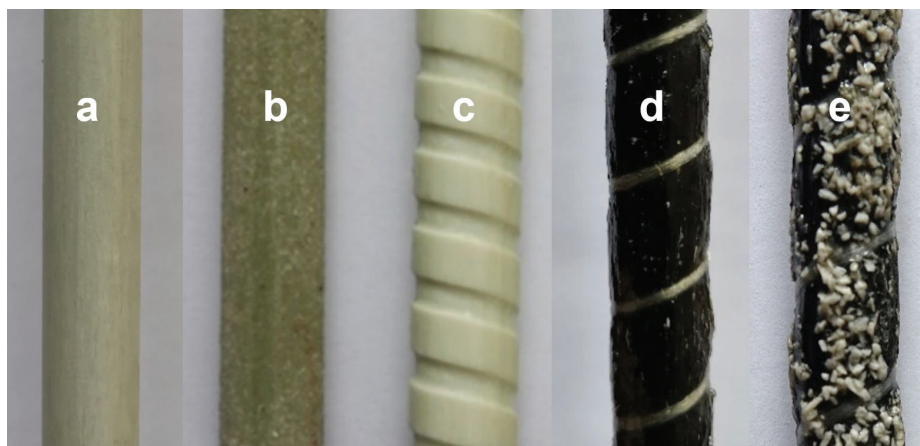
2 • MEHANIZEM SPRIJEMNOSTI

Za zagotavljanje ustrezne nosilnosti armirano-betonskih elementov v natežno obremenjena območja vstavljamo armaturne palice, saj beton slabo prenaša natege. Da pri tem dosežemo privzeto sodelovanje obeh materialov, morajo biti armaturne palice v betonu ustrezno zasidrane. Le tako se lahko prenašajo sile iz armature v beton in obratno, kar je predpogoj za formiranje ustreznih nosilnih mehanizmov.

Med dejavniki, ki pomembno vplivajo na sprijemno trdnost med armaturno palico in betonom, je površinska obdelava palice. To velja tako za kovinske kakor tudi nekovinske armaturne palice. Pri kovinskih palicah se zaradi boljše sprijemnosti uporablja le rebrosta armatura, gladka armatura pa se v skladu z veljavnimi predpisi lahko vgradi le kot konstruktivna oz. nenosilna.

Pri nekovinski armaturi iz z vlakni ojačanih polimerov proizvajalci ponujajo palice z različnimi oblikami prečnega prereza in različnimi obdelavami površin. Glede oblike prečnega prereza se na tržišču pojavljajo palice krožnega, ovalnega in kvadratnega prereza, vse v polni ali votli izvedbi, ter palice Y-prereza, daleč najpogostejše, pri bazaltnih palicah pa tudi edine so polne palice krožnega prereza (Emparanza, 2017). Poleg tega da so palice lahko gladke ali rebroste, so lahko ali pa ne v obeh primerih obdelane še s peščenim posipom za izboljšanje sprijemnosti. Med rebroste uvrščamo tiste površine palic, ki jim v končni strjeni obliki mehansko vrežejo ali vtisnejo spiralne uture in imajo s tem res izrazita rebra, do manj izrazitih rebrostatih površin pa lahko pridemo tudi s sprotnim spiralnim ovijanjem snopa vzdolžnih vlaken in polimernega vezi-va med formiranjem palice. Prevladujoče so palice s spiralnim ovojem in peščenim posipom, ki naj bi nudile največjo sprijemnost z betonom (Emparanza, 2017). Nekaj primerov izgleda površine nekovinskih armaturnih palic prikazuje slika 2.

Za razliko od jeklene armature je v splošnem nekovinska armatura tako glede standardi-



Slika 2 • Primeri površinske obdelave palic iz z vlakni ojačanih polimeri: gladka (a), gladka s posipom (b), z vrezanimi rebri (c), s spiralnim ovojem (d), s spiralnim ovojem in peščenim posipom (e). Fotografiji (b) in (c) sta iz vira (Mazaheripour, 2013).

zacije proizvodnje kot tudi glede zahtevanih lastnosti palic za uporabo v konstruktivne namene še zelo slabo regulirana ((Kampmann, 2019), (Emparanza, 2017)). Če pa je kakšen primeren dokument na voljo, npr. standard ACI 440.6M-08(17) (ACI, 2017), pa v njem praviloma ne najdemo konkretnih podrobnejših specifikacij za bazaltno armaturo, ki je, kot smo že zapisali, med armaturo iz z vlakni ojačanih polimeri ena najnovejših.

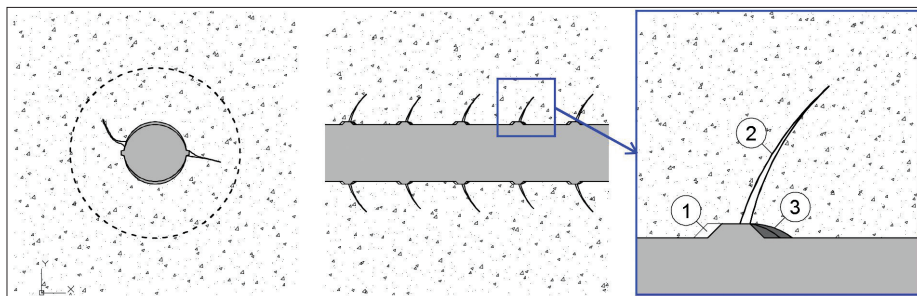
Pri poskusu izvleka rebroste armaturne palice iz betona se v sidrnem področju aktivirajo trije mehanizmi sprijemnosti: adhezija, trenje in zaklinjanje reber palice v okoliški beton. Adhezija se pojavi na začetku, ko je raven obremenitve še nizka. Po prvem zdrsu palice je adhezija premagana. Takoj za tem se akti-

se pri rebrosti jekleni armaturni palici v beton prenese največji del sile. V nasprotju s tem je ta delež pri spiralno oviti bazaltni rebrosti armaturi po pričakovanju manjši, saj so rebra manj izrazita (slika 3). Rebna »sodčkaste« oblike zasedajo praktično celotno dolžino palic, beton pa zapolni le blago nakazane spiralne uture.

Po začetnem zdrsu se začnejo v betonu postopoma pojavljati poškodbe. Rebna armaturne palice se naslonijo na beton. Zaradi obremenitve se v betonu ob koncih reber zlasti pri jekleni armaturi lahko pojavijo prečne mikrorazpoke. Zdrsi palice se povečujejo. Z nadaljnjim povečevanjem obremenitve se tlačna nosilnost betona na stiku z rebri izčrpa. Ob tem pride do drobljenja betona in



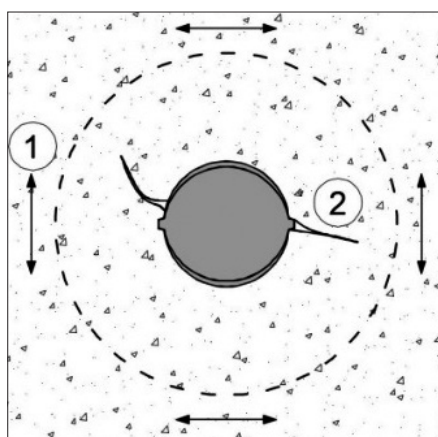
Slika 3 • Primerjava videza površine jeklene rebroste armature (levo) in armature iz bazaltnih vlaken s spiralnim ovojem in peščenim posipom (desno).



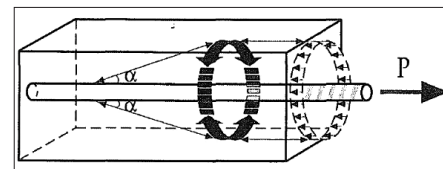
Slika 4 • Shematični prikaz možnega rušenja stika med rebrasto armaturno palico in betonom (1 – zdrav, 2 – mikrorazpoka, 3 – območje zdrobljenega betona).

zaklinjanja palice v okoliški beton (slika 4), kar povzroči povečanje tlačnih napetosti v razporah pod kotom α (slika 5), ki se uravnotežijo z obročnimi nateznimi napetostmi in vzdolžnimi tlačnimi napetostmi v betonu (slika 5). Pri tem se od plašča armaturnih palic navzven lahko pojavijo radialne vzdolžne cepilne razpoke (sliki 5 in 6). V tej fazi je sidranje zagotovljeno preko mehanizma tlačnih razpor, ki jih podpira intakten zunanji betonski obroč. V splošnem se sidranje lahko poruši z napredovanjem cepljenja betona proti zunanosti ali s popolnim izvlekom palice. V primeru cepilne porušitve so praviloma dosežene manjše sidrne nosilnosti kot v primeru porušitev z izvlekom (Tepfers, 1973). Do cepilnih porušitev stika lahko pride tako pri jeklenih kakor tudi pri rebrastih palicah iz z vlakni ojačanimi polimeri. Pri izvlečnih preizkušanjih je tak način porušitve pričakovan pri palicah večjih

premerov, kjer imamo opravka z razmeroma velikimi silami glede na dimenzije betonskega dela preizkušanca. V primeru pojava cepilne



Slika 6 • Nastanek prvih razpok (2) zaradi obročnih nateznih napetosti (1).



Slika 5 • Razporeditev sil, ki jih obremenjena armaturna palica prenaša na beton (Tepfers, 1973).

odpovedi preizkušancev se rezultati praviloma zavržejo, preiščejo pa se dodatni preizkušanci s povečanimi dimenzijami betonskega dela preizkušanca (ACI, 2012). Standard ISO 10406-1 pa podaja preizkušane, pri katerem je za preprečitev cepilne porušitve v razmeroma majhno kocko vgrajena še spiralna armatura (ISO, 2015).

Kot smo že omenili, je za gladke palice značilna slabša sprijemnost z betonom, saj se sile v beton prenašajo le preko adhezije in trenja med armaturno palico in okoliškim betonom. Oba mehanizma izkazujeta relativno majhno odpornost proti izvleku, zato se gladka armatura za zagotavljanje odpornosti nosilnih elementov dandanes ne uporablja. Pri jekleni armaturi je takšna uporaba gladkih palic formalno preprečena z določili standardov za projektiranje betonskih konstrukcij iz družine Evrokod 2, pri nekovinskih palicah pa uporabo gladkih palic preprečujejo npr. določila sicer redkih obstoječih standardov za proizvode, kot je standard ACI 440.6M-08(17) (ACI, 2017).

3 • EKSPERIMENTALNE PREISKAVE

3.1 Lastnosti uporabljenih materialov in sestava betonskih mešanic

V okviru raziskovalnega dela smo pripravili dve recepturi mešanic betona: recepturo betona običajne trdnosti z oznako NSC-1630 in recepturo betona visoke trdnosti z oznako HSC-1600. Zrnavostno strukturo agregata smo pri obeh mešanicah ohranjali enako (preglednica 1). Uporabili smo prani drobljeni apnenčev agregat z maksimalnim zrnem 16 mm iz Kresnic in mivko iz Moravč. Za doseganje višje trdnosti smo zmanjšali vodocementno razmerje, za doseganje ustrezne konsistence svežega betona (razlez razreda F2) pa smo dodali superplastifikator naftalenskega tipa. Poleg tega smo del cementa pri betonu visoke trdnosti nadomestili z mikrosilikom.

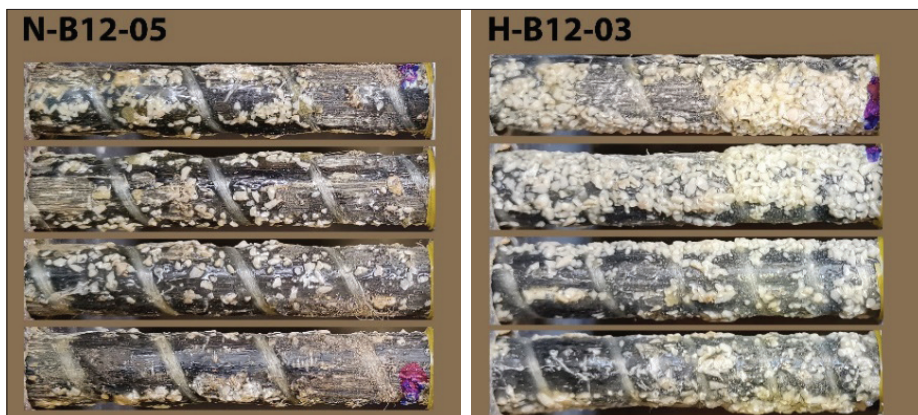
Pri izvlečnem testu smo uporabili 100 cm dolge armaturne palice iz bazaltnih vlaken

in polimernega veziva proizvajalca Deutsche Basalt Faser (DBF). Palice krožnega prečnega prereza so imele nazivni premer 12 mm, zanje pa proizvajalec navaja natezno trdnost 1000

MPa in modul elastičnosti 62 GPa. Iz podatkov proizvajalca palic izhaja še volumski delež bazaltnih vlaken v palici, ki je znašal 77%. Površina palic je bila spiralno ovita, ob tem pa je bil nanesen še peščen posip. Intenzivnost posipa se je med posameznimi preizkušanji precej razlikovala, poleg tega pa je bila tudi geometrija palic zaradi spiralnega ovitja, ki

Oznaka betonske mešanice		NSC 1630	HSC 1600
Agregat (kg/m ³)	0/2 (mivka)	264	285
	0/4	790	853
	4/8	263	284
	8/16	439	474
Cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (kg/m ³)		400	360
Mikrosilika (kg/m ³)		0	40
Vodovezivno razmerje		0,52	0,36
Prostorninska masa (kg/m ³) *		2364	2449

Opomba: * Srednja vrednost izmerjenih prostorninskih mas preizkušancev za določitev tlačne trdnosti betona. Preglednica 1 • Sestava betonskih mešanic.



Slika 7 • Primeri skrajnih količin nanosov peščenega posipa in spremenljive geometrije palice v območju vzpostavitve stika. Preizkušane N-B12-05 (levo) in H-B12-03 (desno).

povzroča blage žlebove, precej različna vzdolž njihove dolžine. Slika 7 prikazuje dva skrajna primera količine peščenega posipa na območju vzpostavitve stika z betonom. Pri tem so za vsak preizkušane združene po štiri fotografije površin, ki so posnete pri zaporednih zasukih preizkušanca za 90°. Da smo dobili možnost primerjave rezultatov, smo izvlečne teste opravljali tudi na enakih preizkušancih z vgrajenimi jeklenimi rebrastimi armaturnimi palicami enakega premera (12 mm) in z nazivno mejo elastičnosti 500 MPa. Glede na uporabljeni dve različni mešanici betona (beton običajne in beton visoke trdnosti) in dve vrsti armature (bazaltne in jeklene) smo torej imeli štiri serije preizkušancev z enakimi parametri. Oznake preizkušancev vsebujejo podatek o vrsti betonske mešanice (N – beton običajne trdnosti, H – beton visoke trdnosti), vrsti armature (S – jeklo, B – bazalt) in nazivnem premeru palice v mm, na koncu pa še zaporedno številko preizkušanca v seriji.

3.2 Priprava preizkušancev

Preizkušane za izvlečni test je sestavljen iz betonske kocke z robom 200 mm in armaturne palice, ki kocko prebada v sredini (sliki 8 in 9). Uporabili smo večcelični leseni kalup (slika 8), v katerega smo s strani vstavili horizontalne armaturne palice in z vrhne strani naknadno vgradili beton, kar pomeni, da so bile armaturne palice orientirane pravokotno na smer betoniranja. Za zgostitev betona smo uporabili vibracijsko iglo. Za vsako mešanico betona smo pripravili po pet izvlečnih preizkušancev z bazaltno armaturo in štiri izvlečne preizkušance z jekleno armaturo. Dodatno smo za preizkus tlačne trdnosti betona izdelali še kocke z robom 150 mm, in sicer 6 iz betona običajne trdnosti ter 4 iz betona visoke trdnosti. Vse preizkušance smo po enem dnevu

razkalupili in jih do starosti 28 dni, ko smo opravljali izvlečne in tlačne preizkuse, negovali v vodi pri temperaturi $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$.

Zaradi majhne odpornosti bazaltne armature proti pritisku v smeri prečno na vlakna smo za zagotovitev ustreznega vpetja palice v čeljust

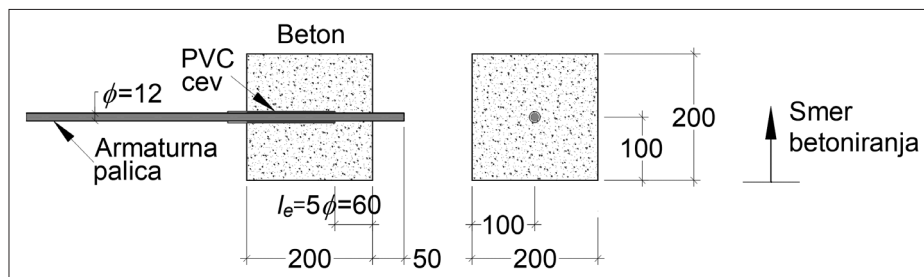
preizkuševalnega stroja palico na mesu vpetja ustrezno obdali z jekleno cevjo, vmesni prostor pa zalili z epoksidnim lepilom Sikadur-52 Injektion Tip N. Jeklena cev z zunanjim premerom 18 mm in debelino stene 2 mm je bila pri tem dolga 50φ oziroma 600 mm.

3.3 Izvedba preiskav

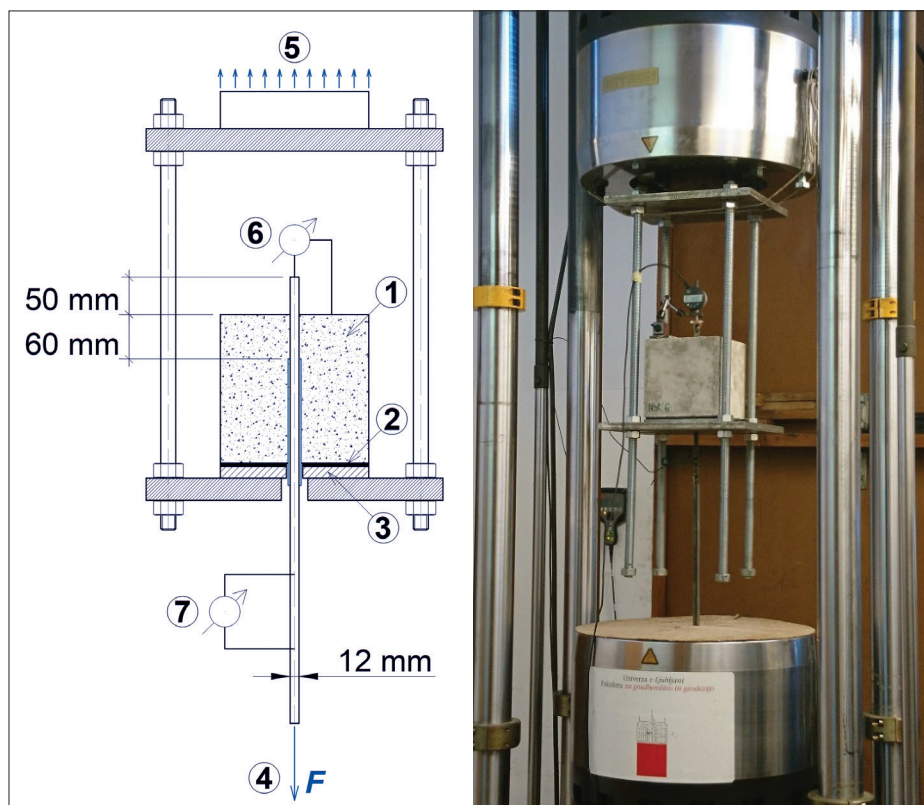
Izvedbo preizkusov smo opravili s pomočjo elektrohidravlične preizkuševalne naprave Instron 1345 kapacitete ± 1000 kN, preizkušanci pa so bili skladni s standardom SIST EN 10080 (SIST, 2005), ki v osnovi obravnava jekleno armaturo, konkretno uporabljene dimenzije pri tem veljajo za palice premera do 20 mm. Takšno obliko preizkušancev (kocka z robom 200 mm in objeto dolžino palice $l_e = 5\phi$) je smiselno obdržati tudi zaradi primerjave med rezultati jeklene in rezultati armature iz z vlakni ojačanimi polimeri. V literaturi je mogoče pogosto zaslediti rezultate preiskav stičnega območja na takšnih ali vsaj približno takšnih preizkušancih ((Baena, 2009), (Wang, 2019),



Slika 8 • Večcelični kalup, pripravljen za vgradnjo betona (levo), preprečitev sprjemnosti na delu bazaltne palice (desno zgoraj) in jeklene palice (desno spodaj).



Slika 9 • Dimenzije preizkušancev (mm) za izvlečne preiskave.



Slika 10 • Shematični prikaz izvlečnega testa (levo), izvedba preizkusa (desno).

(Solyom, 2020)), saj ti v grobem ustrezajo tudi osnovni različici izvlečnega preizkušanca po standardu ACI-440.3R-12 (ACI, 2012). Največji standard ISO 10406-1:2015 (ISO, 2015) za preiskave izvleka nekovinske armature navaja preizkušance v obliki kocke z robom 100 mm za palice premera do 17 mm oziroma z robom 150 mm pri večjih premerih palice, objeta dolžina palice z betonom l_e pa je 4ϕ . Okoli osnovne palice je treba namestiti spiralno armaturo, ki prepreči morebitno cepilno porušitev razmeroma majhne kocke. Morda je tudi to razlog, da v literaturi redko najdemo rezultate preiskav na takšnih preizkušancih.

Na sliki 9 so prikazane dimenzije preizkušanca za izvlečni test za armaturno palico premera 12 mm. Objetje z betonom je zagotovljeno le na dolžini $l_e = 5\phi$ na strani neobremenjenega konca palice, kar v danem

primeru znaša 6 cm. Na preostalih 14 cm je prijemnost palice z betonom preprečena, kar smo dosegli s PVC-cevko.

Slika 10 prikazuje preizkušane (1) med preiskavo. Podprt je z gumeno podlago (2), ki stoji na dodatni jekleni plošči (3). Armaturna palica je vpet v spodnjo čeljust (4) preizkuševalnega stroja, podpora jeklena kletka pa je vpet v zgornjo čeljust (5). Spodnja in zgornja plošča kletke sta povezani s štirimi navojnimi palicami. Na zgornjem koncu armaturne palice smo z merilno urico z ločljivostjo 0,001 mm (6) merili zdrs oziroma uvlek armature, tj. relativni pomik neobremenjenega konca palice glede na zgornjo ploskev betonskega preizkušanca. Na armaturno palico smo namestili ekstenzometer (7), s katerim smo spremljali njeno specifično deformacijo. Spodnji bat preizkuševalnega stroja, v

katerega je bila vpeta armaturna palica, je imel nastavljen hod 50 mm. Preizkus poteka z enakomernim spuščanjem spodnjega bata s hitrostjo 0,01 mm/s, s čimer natežno obremenjujemo palico. Vodenje eksperimenta preko pomika nam je omogočalo spremljanje obnašanja stika tudi po doseženi največji sili. Preizkuse smo izvajali vse do izmerjenega uvleka palice na zgornji strani kocke v vrednosti približno 25 mm, razen v dveh primerih, ko je pri jeklenih palicah še pred izčrpanjem strižne odpornosti prišlo do natezne porušitve armaturne palice.

3.4 Eksperimentalni rezultati

S pomočjo preizkuševalnega stroja, ustrezne merilne opreme in programske opreme za zajem podatkov smo s hitrostjo dveh odčitkov na sekundo spremljali vrednost nanosene sile F , specifične deformacije palice in relativni pomik oziroma zdrs prostega konca armaturne palice glede na zgornjo konturno ploskev betona s.

Pri določitvi prijemne napetosti smo upoštevali predpostavko o enakomerni porazdelitvi napetosti vzdolž sidrne dolžine. S tem je prijemna napetost τ definirana kot količnik med silo F in nazivno ploščino plašča palice na sidrni dolžini l_e :

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot \phi \cdot l_e}, \quad (1)$$

srijemna trdnost $\tau_{\max}$ pa je določena kot napetost pri največji doseženi sili $F_{\max}$ med preiskavo posameznega preizkušanca:

$$\tau_{\max} = \frac{F_{\max}}{\pi \cdot \phi \cdot l_e}. \quad (2)$$

Pri tem je ϕ nazivni premer palice, ki v primeru obravnavanih palic znaša 12 mm.

V preglednici 2 za posamezne preizkušance podajamo vrednosti izmerjenih srijemnih trdnosti $\tau_{\max}$ njim pripadajočih zdrsov na prostem koncu palice $s(\tau_{\max})$ in srijemne napetosti τ_0 , izračunane po izrazu (1), pri zadnji sili pred prvim zabeleženim zdrsom ($s > 0$) na prostem koncu palice. Poleg tega sta za vsako serijo preizkušancev z enako vrsto armature in enako betonsko mešanico podana srednja vrednost srijemne trdnosti $\bar{\tau}_{\max}$ in pripadajoči koeficient variacije srijemne trdnosti $KV_{\tau_{\max}}$. Za obe vrsti betonov pa sta podani še srednji vrednosti njihovih tlačnih trdnosti $\bar{f}_c$, določeni na kockah z robom 15 cm, na dan izvlečnih preiskav, tj. pri starosti betona 28 dni.

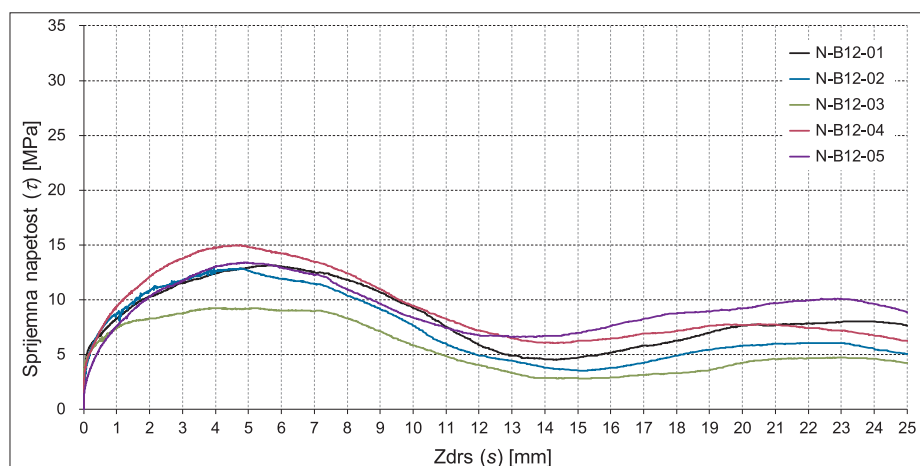
Na slikah 11 do 14 so prikazane izmerjene zveze med srijemno napetostjo in zdrsom na prostem koncu armaturne palice, ki so na posamezni sliki zbrane za serije preizkušanc

Mešanica betona	$\bar{f}_c$ (MPa)	Preizkušanci z jekleno armaturo						Preizkušanci z bazaltno armaturo					
		Oznaka	$\tau_{\max}$ (MPa)	$s(\tau_{\max})$ (mm)	$\bar{\tau}_{\max}$ (MPa)	$KV_{\tau_{\max}}$ (%)	$\bar{s}(\tau_{\max})$ (mm)	Oznaka	$\tau_{\max}$ (MPa)	$s(\tau_{\max})$ (mm)	$\bar{\tau}_{\max}$ (MPa)	$KV_{\tau_{\max}}$ (%)	$\bar{s}(\tau_{\max})$ (mm)
NSC1630	60,9	N-S12-01	22,6	0,80				N-B12-01	13,1	5,43			
		N-S12-02	19,1	0,82				N-B12-02	12,8	4,73			
		N-S12-03	16,8	0,84	18,7	15,0	0,77	N-B12-03	9,2	3,95	12,7	16,6	4,72
		N-S12-04	16,4	0,62				N-B12-04	15,0	4,62			
								N-B12-05	13,4	4,86			
HSC1600	80,1	H-S12-01	31,1	1,03				H-B12-01	21,8	1,56			
		H-S12-02	32,2*	0,47*				H-B12-02	25,7	1,66			
		H-S12-03	31,3	1,07	31,2**	2,2	1,05**	H-B12-03	24,5	1,70	23,3	8,5	2,40
		H-S12-04	32,6*	0,63*				H-B12-04	23,5	3,06			
								H-B12-05	20,8	4,03			

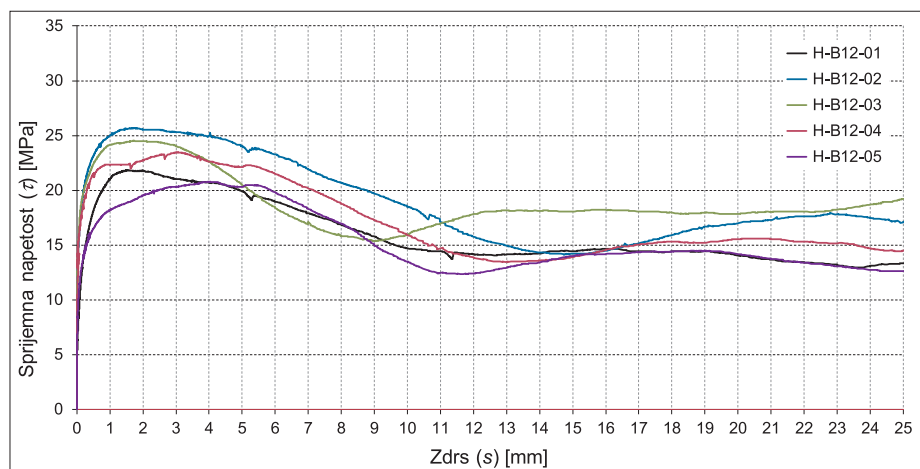
Opomba: * Pred izčrpanjem strižne odpornosti je prišlo do natezne porušitve armaturne palice.

** Srednja vrednost sprijemne trdnosti in zdrsa, izračunana na podlagi vrednosti za preizkušanca H-S12-01 in H-S12-3.

Preglednica 2 • Izvleček rezultatov eksperimentalnih preiskav.



Slika 11 • Sprijemna napetost v odvisnosti od zdrsa za preizkušance serije N-B iz betona običajne trdnosti (mešanica NSC 1630) in bazalne armature.



Slika 12 • Sprijemna napetost v odvisnosti od zdrsa za preizkušance serije H-B iz betona visoke trdnosti (mešanica HSC 1600) in bazalne armature.

cev iz betona enake trdnosti in enake vrste armature. Na sliki 15 so prikazane zveze med srednjo vrednostjo sprijemne napetosti preizkušancev posamezne serije in zdrsom na prostem koncu palice za vse štiri serije preizkušancev z enakimi parametri. Srednje vrednosti sprijemne napetosti so pri tem določene z upoštevanjem interpoliranih vrednosti sprijemne napetosti posameznih preizkušancev pri vnaprej izbranih vrednostih zdrsa.

3.5 Analiza rezultatov

Iz podatkov v preglednici 2 je razvidno, da znaša srednja vrednost sprijemne trdnosti med bazaltno armaturo in betonom približno 68 % sprijemne trdnosti med jekleno armaturo in primerljivim betonom pri betonih običajne trdnosti. Pri betonih visoke trdnosti pa je ta delež približno 73 %. Opazimo lahko izrazit vpliv tlačne trdnosti betona na sprijemno trdnost. Preizkušanci iz betona visoke trdnosti in jeklene armature (serija H-S) so dosegli 1,7-krat tolikšno srednjo vrednost sprijemne trdnosti kot preizkušanci iz betona običajne trdnosti z enako vrsto armature (serija N-S). Še večja razlika v sprijemnih trdnostih pa je v primeru uporabe bazaltne armature, kjer so preizkušanci iz betona visoke trdnosti (serija H-B) dosegli približno 1,8-krat tolikšno srednjo vrednost sprijemne trdnosti kot preizkušanci iz betona običajne trdnosti z enako vrsto armature (serija N-B). Srednja tlačna trdnost betona visoke trdnosti pa je bila pri tem le približno 1,3-krat tolikšna kot srednja tlačna trdnost običajnega betona.

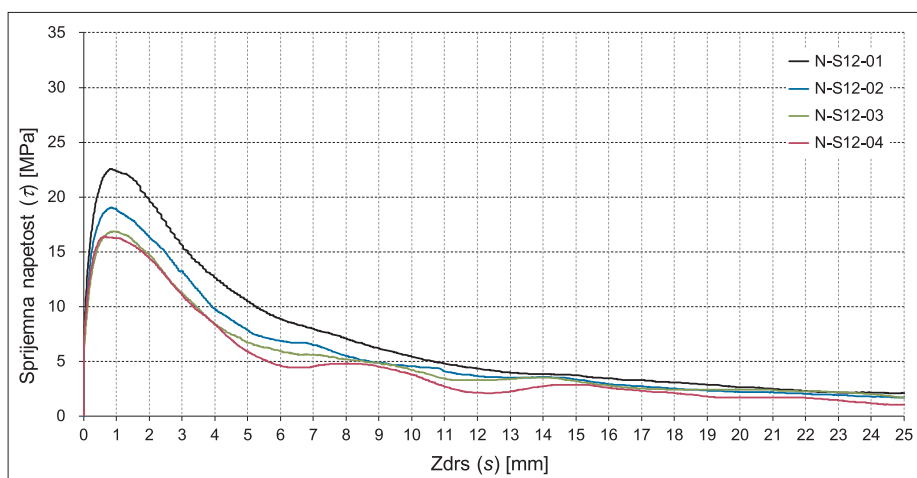
V preglednici 2 podani koeficienti variacije $KV_{\tau_{\max}}$ sprijemnih trdnosti za posamezne serije pri obeh vrstah armature v primeru betona običajne trdnosti kažejo na bistveno večjo razpršenost sprijemnih trdnosti kot v primeru betona visoke trdnosti. Poleg tega pa lahko ugotovimo, da je pri bazaltni armaturi tako v primeru betona običajne kakor tudi v primeru betona visoke trdnosti opazna večja razpršenost rezultatov sprijemnih trdnosti kot pri jekleni armaturi. Domnevamo, da je neenakomeren peščeni posip po plašču armature palice (slika 7) eden od možnih razlogov za to. Poleg tega pa se tudi osnovna geometrija blago rebraste površine preiskanih bazaltnih palic med posameznimi spiralnimi ovoji vzdolž njihove dolžine opazno spreminja. Vpliv osnovne geometrije površine palic je do neke mere možno zajeti z ustreznimi parametri, kot sta razdalja med rebri oziroma spiralnimi ovoji in relativna ploščina rebra ((Baena, 2009), (Solyom, 2020)). Odstopanje dejanske geometrije in učinkovitost peščenega posipa pa sta manj raziskana vpliva in za zdaj v literaturi še ni zaslediti ustreznih postopkov za njuno ovrednotenje (Osama, 2021). Vplivu spremenljive geometrije površine in intenzivnosti posipa nameravamo posvetiti večjo pozornost v nadaljnjih raziskavah.

Tudi groba vizualna primerjava izmerjenih zvez med sprijemno napetostjo in zdrsom na prostem koncu palice, združenih po serijah na slikah 11 do 14, kaže pri bazaltni armaturi v nasprotju z jekleno na večji raztros vseh merodajnih parametrov obnašanja stika, od začetne sprijemne napetosti na račun adhezije, sprijemne trdnosti in njej pripadajočega zdrsa pa vse do same oblike izmerjenih zvez.

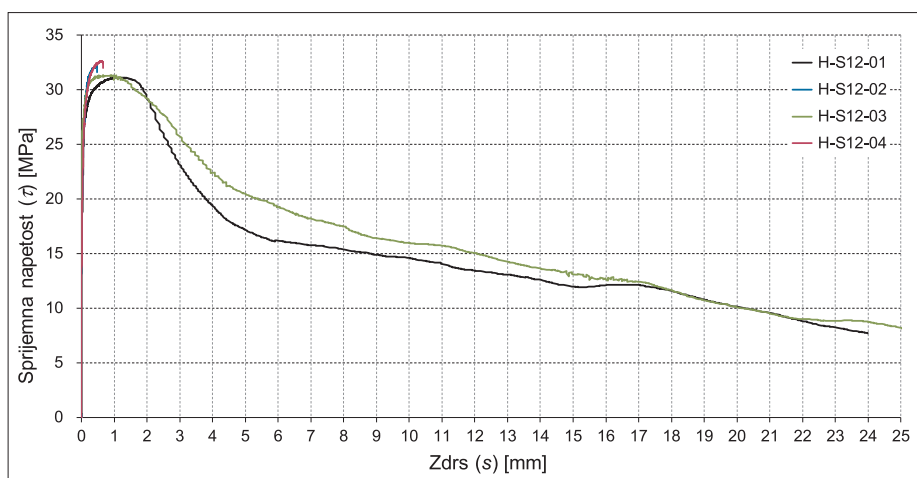
Srednjo vrednost zdrsa pri doseženi sprijemni trdnosti $\bar{s}(\tau_{\max})$ lahko skupaj s srednjo vrednostjo sprijemne trdnosti štejemo za merilo togosti stika med armaturno palico in betonom. V nadaljevanju so za primerjavo podane sekantne togosti ($K_r = \bar{\tau}_{\max} / \bar{s}(\tau_{\max})$) za posamezne serije preizkušancev z enako vrsto betona in armature:

- Serijs N-B: ($K_r = \bar{\tau}_{\max} / \bar{s}(\tau_{\max}) = 12,7 / 4,72 = 2,7$ MPa/mm,
- Serijs H-B: ($K_r = \bar{\tau}_{\max} / \bar{s}(\tau_{\max}) = 23,3 / 2,40 = 9,7$ MPa/mm,
- Serijs N-S: ($K_r = \bar{\tau}_{\max} / \bar{s}(\tau_{\max}) = 18,7 / 0,77 = 24,3$ MPa/mm,
- Serijs H-S: ($K_r = \bar{\tau}_{\max} / \bar{s}(\tau_{\max}) = 31,2 / 1,05 = 29,7$ MPa/mm.

Opazno je veliko zmanjšanje sekantne togosti stika pri preizkušancih z bazaltno armaturo v primerjavi s preizkušancem z jekleno arma-

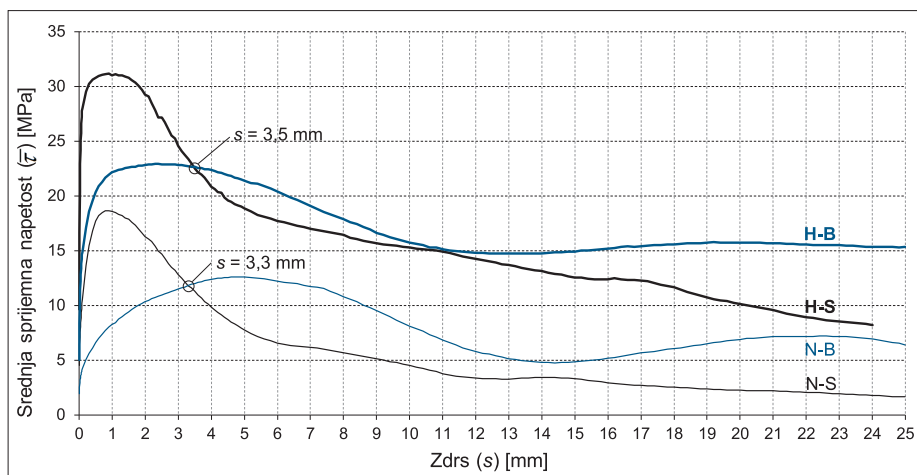


Slika 13 • Sprijemna napetost v odvisnosti od zdrsa za preizkušance serije N-S iz betona običajne trdnosti (mešanica NSC 1630) in jeklene armature.



Opomba: Pri preizkušancih H-S12-02 in H-S12-04 je prišlo do natezne porušitve palice zunaj območja sidranja pred doseženo strižno odpornostjo stika.

Slika 14 • Sprijemna napetost v odvisnosti od zdrsa za preizkušance serije H-S iz betona visoke trdnosti (mešanica HSC 1600) in jeklene armature.

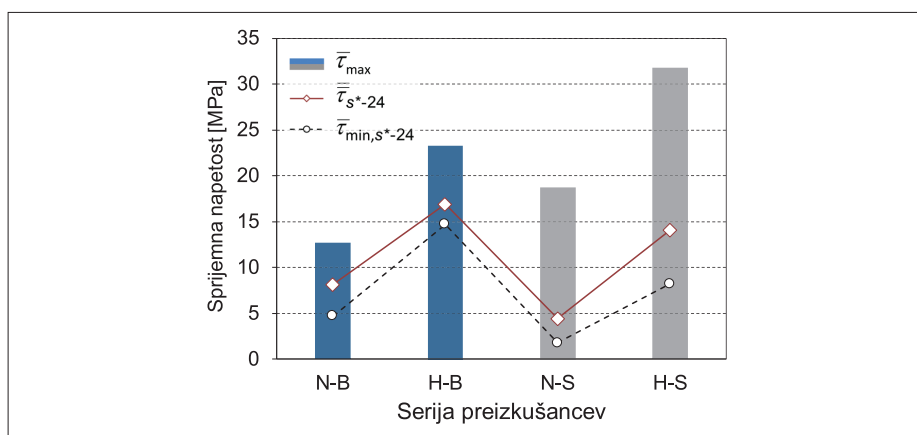


Opomba: Pri seriji H-S je krivulja določena le na podlagi vrednosti za preizkušance H-S12-01 in H-S12-03.

Slika 15 • Srednje vrednosti sprijemne napetosti za seriji po petih preizkušancih z bazaltno armaturo (B) in seriji po štirih preizkušancih z jekleno armaturo (S) v odvisnosti od zdrsa na prostem koncu palice za betona običajne (N) in visoke trdnosti (H).

turo pri enaki vrsti betona. Pri betonu običajne trdnosti je razmerje pripadajočih togosti $2,7/24,3=0,11$, pri betonu visoke trdnosti pa $9,7/29,7=0,33$. Tudi na sekantno togost stika pomembno vpliva tlačna trdnost, zlasti pri bazaltni armaturi. Pri betonu visoke trdnosti s približno 1,3-krat večjo srednjo vrednostjo tlačne trdnosti kot pri betonu običajne trdnosti smo pri jekleni armaturi dobili 1,25-krat večjo sekantno togost, pri bazaltni armaturi pa kar 3,6-krat večjo sekantno togost kot pri betonu običajne trdnosti. Globalno obnašanje stika posamezne serije preizkušancev je z zvezami med njihovimi srednjimi vrednostmi sprijemne napetosti in zdrsom prikazano na sliki 15. S slike je razvidno, da je v območju velikih zdrsov pri preizkušanjih z bazaltnimi palicami delež preostale sprijemne napetosti v primerjavi s sprijemnimi trdnostmi pri obeh vrstah betona precej večji kot pri preizkušanjih z jekleno armaturo. Pri preizkušanjih z jekleno armaturo sprijemna napetost po doseženi sprijemni trdnosti v grobem monotono pada, pri preizkušanjih z bazaltno armaturo pa se izmenjujejo lokalni ekstremi. Od zdrsa, pri katerem pade srednja vrednost sprijemne napetosti serije preizkušancev z jekleno armaturo pod srednjo vrednost sprijemne napetosti preizkušancev z bazaltno armaturo, za betone običajne trdnosti je to pri $s^*=3,3$ mm, za betone visoke trdnosti pa pri $s^*=3,5$ mm, do zdrsa 24 mm znašajo srednje vrednosti srednjih sprijemnih napetosti preizkušancev serije $\bar{\tau}_{s^*,24}$:

- Serija N-B: $\bar{\tau}_{s^*,24}=8,1$ MPa, kar je 64 % pripadajoče sprijemne trdnosti,
- Serija H-B: $\bar{\tau}_{s^*,24}=16,9$ MPa, kar je 73 % pripadajoče sprijemne trdnosti,



Slika 16 • Značilne vrednosti sprijemnih napetosti po serijah preizkušancev z enakimi parametri.

- Serija N-S: $\bar{\tau}_{s^*,24}=4,4$ MPa, kar je 24 % pripadajoče sprijemne trdnosti,
- Serija H-S: $\bar{\tau}_{s^*,24}=14,1$ MPa, kar je 44 % pripadajoče sprijemne trdnosti.

Za ista območja zdrsa (od $s = s^*$ do $s = 24$ mm) so določene minimalne vrednosti srednjih sprijemnih napetosti serije preizkušancev $\bar{\tau}_{min,s^*,24}$ naslednje:

- Serija N-B: $\bar{\tau}_{min,s^*,24}=4,7$ MPa, kar je 37 % pripadajoče sprijemne trdnosti,
- Serija H-B: $\bar{\tau}_{min,s^*,24}=14,7$ MPa, kar je 63 % pripadajoče sprijemne trdnosti,
- Serija N-S: $\bar{\tau}_{min,s^*,24}=1,8$ MPa, kar je 10 % pripadajoče sprijemne trdnosti,
- Serija H-S: $\bar{\tau}_{min,s^*,24}=8,2$ MPa, kar je 26 % pripadajoče sprijemne trdnosti.

Na sliki 16 so za serije preizkušancev z enakimi parametri zbrane značilne vrednosti sprijemnih napetosti. Podane so srednje vrednosti sprijemnih trdnosti $\bar{\tau}_{max}$, srednja vrednost sred-

njih trdnosti preizkušancev posamezne serije $\bar{\tau}_{s^*,24}$, določena na podlagi srednjih vrednosti sprijemnih napetosti serije preizkušancev za ekvidistantne točke zdrsa ($\Delta s=0,1$ mm) med $s = s^*$ in $s = 24$ mm in za to isto območje še najmanjša srednja sprijemna napetost serije $\bar{\tau}_{min,s^*,24}$. Kot že omenjeno, smo s s^* označili zdrs, pri katerem srednja vrednost sprijemne napetosti preizkušancev serije z jekleno armaturo pade pod srednjo trdnost serije preizkušancev z bazaltno armaturo in enakim betonom.

Razen pri dveh preizkušanjih iz betona visoke trdnosti in jeklene armature, H-S12-02 in H-S12-04, kjer je pred odpovedjo stika prišlo do natezne porušitve palice zunaj območja betona, je pri vseh ostalih preizkušanjih ne glede na vrsto armature in trdnost betona prišlo do identičnega načina porušitve stika, in sicer v obliki neposrednega izvleka palice.

in 1,8-krat tolikšne pri uporabi bazaltne armature.

- Preizkušanci iz obeh vrst betona in bazaltne armature dosegajo manjšo sprijemno trdnost kot preizkušanci iz enakega betona in jekleno armaturo. Tako pri preizkušanjih iz betona običajne kakor tudi iz betona visoke trdnosti ter bazaltno armaturo je znašala srednja vrednost sprijemne trdnosti približno 70 % srednje vrednosti sprijemne trdnosti primerljivih preizkušancev z jekleno armaturo.
- Pri bazaltni armaturi smo tako v primeru betona običajne kakor tudi v primeru betona visoke trdnosti zabeležili večji raztros rezultatov sprijemnih trdnosti kot pri jekleni armaturi. Na sprijemno trdnost med armaturno palico in betonom močno vpliva površinska obdelava palice. Površinska

4 • SKLEP

Za spremljanje obnašanja stika med armaturo in betonom smo izvajali izvlečne preiskave. Te so zaradi svoje preprostosti in hkratne učinkovitosti mnogokrat uporabljene pri številnih raziskovalcih. Osnovne izvlečne preiskave so, kljub temu da napetostno stanje v preizkušanjih odstopa od stanja v realnih konstrukcijskih elementih, primerne za ugotavljanje vpliva različnih parametrov na karakteristike stika, kot sta sprijemna trdnost in zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom. V našem primeru sta bila ta parametra tlačna trdnost betona in vrsta uporabljene armature. Na podlagi rezultatov preizkušanja stika med bazaltno armaturo s spiralnim ovojem in peščenim posipom

oziroma rebrasto jekleno armaturo in betonom običajne oziroma visoke trdnosti lahko podamo naslednje zaključke:

- Tako pri preizkušanjih z jekleno kakor tudi pri preizkušanjih z bazaltno armaturo premera 12 mm ima tlačna trdnost betona pomemben vpliv na sprijemno trdnost med betonom in armaturo. Z razmeroma majhnim dvigom tlačne trdnosti, za faktor 1,3, se je sprijemnost med betonom in armaturo občutno izboljšala. Vrednosti sprijemne trdnosti preizkušancev iz betona visoke trdnosti so bile pri uporabi jeklene armature v povprečju približno 1,7-krat tolikšne kot pri preizkušanjih iz običajnega betona

obdelava relativno novih bazaltnih palic pa tudi ostalih armaturnih palic iz z vlakni ojačanih polimerov za razliko od že dolgo uveljavljenih jeklenih še ni ustrezno regulirana s standardi. V našem primeru so imele uporabljene palice precej spremenljivo geometrijo sodčkastih reber in dokaj neenakomeren peščen posip. Menimo, da je tudi to lahko eden izmed razlogov za večjo razpršenost vrednosti prijemnih trdnosti pri preizkušanjih z bazaltno armaturo glede na primerljive preizkušance z jekleno armaturo.

- Pri vseh preizkušanjih z vgrajenimi palicami premera 12 mm, pri katerih smo dosegli porušitev stika med betonom in armaturo, smo zabeležili identičen način odpovedi, in sicer je šlo za osnovni izvelek palice iz betona. Ker so za porušitev stika pri bazaltni armaturi potrebne relativno majhne sile v primerjavi s potrebnimi silami pri jekleni armaturi, lahko

tudi v splošnem pri izvlečnih preizkušanjih z bazaltno armaturo pričakujemo zgolj izvelek in ne razcepa okoliškega betona.

- Pri dveh preizkušanjih iz betona visoke trdnosti z jekleno armaturo (serija H-S) je ob obremenjevanju prišlo do natezne porušitve armaturne palice zunaj območja betona, pred izčrpanjem prijemne odpornosti stika. Ob natezni porušitvi sta preizkušanca dosegla prijemno napetost, ki je bila večja od prijemne trdnosti ostalih preizkušancev serije. Rezultati natezne porušene preizkušancev so prikazani le v zvezah med prijemno napetostjo in zdrsom na prostem koncu, v povprečnih vrednostih te serije pa jih nismo upoštevali.
- Bazaltna armatura ima praviloma precej večjo natezno trdnost od jeklene, a je zaradi svojega linearno elastičnega obnašanja vse do porušitve tudi bolj krhka, kar je pri gradnji armiranobetonskih konstrukcij z

bazaltno armaturo, predvsem na potresnih območjih, neugodna lastnost. Tako kot številne tuje so tudi naše eksperimentalne preiskave pokazale, da bazaltna armatura za razliko od jeklene tudi po razmeroma velikem zdrsni še vedno zagotavlja relativno velik delež prijemne trdnosti. Tu se morda kažejo možnosti za zagotavljanje globalne duktilnosti konstrukcij, armiranih z bazaltno armaturo.

Krhka in trdnjša bazaltna ter duktilna in šibkejša jeklena armatura se v mnogih pogledih lahko dopolnjujeta. Kombinacija obeh materialov, v smislu hibridne palice ali na način »bazaltna – vzdolžna, jeklena – stremenska«, bo predvidoma v prihodnosti tema številnih raziskav. Vsekakor pa bo imela armatura iz bazalta kot tudi vsa ostala armatura iz z vlakni ojačanih polimerov pomembnejšo vlogo pri novogradnjah in sanacijah objektov na območjih z agresivnim okoljem.

5 • LITERATURA

- Abedini M., Akhlaghi E., Mehrmashhadi J., Mussa M. H., Ansari M., Momeni T., Evaluation of Concrete Structures Reinforced with Fiber Reinforced Polymers Bars: A Review, *Journal of Asian Scientific Research*, letnik 7, zvezek 5, strani 165-175, 2017.
- Atavi-Fard M., Marzouk H., Bond behavior of high strength concrete under reversed pull-out cyclic loading, *Canadian Journal of Civil Engineering*, številka 29, strani 191-200, 2002.
- ACI, ACI Committee 440, Guide Test Methods for Fiber - Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures, ACI-440.3R-12, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2012.
- ACI, ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, ACI-440.1R-15, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2015.
- ACI, ACI Committee 440, Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement, ACI-440.6M-08(17), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2017.
- Aydin F., Experimental investigation of thermal expansion and concrete strength effects on FRP bars behavior embedded in concrete, *Construction and Building Materials*, številka 163, strani 1- 8, 2018.
- Baena M., Torres L., Turon A., Barris C., Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test, *Composites: Part B*, številka 40, strani 784-797, 2009.
- Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R., Development length of FRP straight rebars, *Composites Part B: Engineering*, letnik 33, zvezek 7, strani 493-504, ISSN 1359-8368, 2002.
- Emparanza A.R., Kampmann R., De Caso y Basalo F., State-of-the-Practice of Global Manufacturing of FRP Rebar and Specifications, CAMX 2017 Proceedings, American Composites Manufacturers Association (ACMA) and Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), 2017.
- fib, fib Model Code for Concrete Structures 2010, 2013.
- Imjai T., Garcia R., Guadagnini M., Pilakoutas K., Strength Degradation in Curved Fiber-reinforced Polymer (FRP) Bars Used as Concrete Reinforcement, *Polymers*, številka 1653, 2020.
- ISO, Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete — Test methods — Part 1: FRP bars and grids, ISO 10406-1:2015, 2015.
- Jabbar S. A. A., Farid S. B. H., Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures, *Karbala International Journal of Modern Science*, letnik 4, strani 216-227, 2018.
- JSCE, Japan Society of Civil Engineers, Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, *Concrete Engineering Series* št. 23, 1997.

- Kabashi N., Avdyli B., Krasniqi E., Këpuska A., Comparative Approach to Flexural Behavior of Reinforced Beams with GFRP, CFRP, and Steel Bars, *Civil Engineering Journal*, letnik 6, zvezek 1, strani 50-59, 2020.
- Kampmann R., Rambo-Roddenberry M., Telikapalli S., Performance Evaluation, Material and Specification Development for Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) Reinforcing Bars Embedded in Concrete, Final report, naročnik Florida Department of Transportation (FDOT), oznaka pogodbe BDV30 TWO 986-01, 2019.
- Mazaheripour H., Barros J.A.O., Sena-Cruz J.M., Pepe M., Martinelli E., Experimental study on bond performance of GFRP bars in self-compacting steel fiber reinforced concrete, *Composite Structures*, številka 95, strani 202-212, 2013.
- Osama A. M., Waddah A. H., Mohammad K., Durability and Mechanical Properties of Concrete Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer (BFRP) Bars: Towards Sustainable Infrastructure, *Polymers*, letnik 13, 2021.
- Saje D., Lopatič J., Sidranje armature iz bazaltnih vlaken, Zbornik 41. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, SDGK, Bled, 7.- 8. 11. 2019, strani 159-166, 2019.
- Shen D., Wen C., Zhu P., Li M., Ojha B., Li C., Bond behavior between basalt fiber-reinforced polymer bars and concrete under cyclic loading, *Construction and Building Materials*. 258 (2020)119518, 2020.
- SIST EN 10080, Jeklo za armiranje betona – Varivo armaturno jeklo – Splošno, 2005.
- Solyom S., Balázs G. L., Bond of FRP bars with different surface characteristics, *Construction and Building Materials*, številka 264, 2020.
- Tarawneh A., Majdalaweyh S., Design and reliability analysis of FRP-reinforced concrete columns, *Structures*, številka 28, strani 1580-1588, 2020.
- Teng J. G., Zhang B., Zhang S., Fu B., Steel-free hybrid reinforcing bars for concrete structures. *Advances in Structural Engineering*, letnik 21, zvezek 16, strani 2617-2622, 2018.
- Tepfers, R. A., Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars. PhD-Thesis. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden, 1973.
- Wang L., Song Z., Yi J., Li J., Fu F., Qian K., Experimental Studies on Bond Performance of BFRP Bars Reinforced Coral Aggregate Concrete, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10 strani, 2019.
- Xiao T. L., Qiu H. X., Li J. L., Seismic Behaviors of Concrete Beams Reinforced with Steel-FRP Composite Bars under Quasi-Static Loading. *Applied Sciences*, letnik 8, 2018.
- Yang Y., Li Z., Zhang T., Wei J., Yu Q., Bond-Slip Behavior of Basalt Fiber Reinforced Polymer Bar in Concrete Subjected to Simulated Marine Environment: Effects of BFRP Bar Size, Corrosion Age, and Concrete Strength. *International Journal of Polymer Science*, 2017.