

# EKSPERIMENTALNA IN NUMERIČNA ANALIZA NASTANKA IN ŠIRJENJA RAZPOK PRI NATEZNO OBREMENJENEM ARMIRANOBETONSKEM ELEMENTU Z RAZLIČNO RAZPOREDITVIJO VZDOLŽNE ARMATURE

## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF CRACK FORMATION AND PROPAGATION ALONG TENSILE LOADED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH DIFFERENT ARRANGEMENT OF LONGITUDINAL REINFORCEMENT

**Urban Kralj, mag. inž. grad.**

urbankralj92@gmail.com

Mlinše 30, Izlake

**izr. prof. dr. Sebastjan Bratina, univ. dipl. inž. grad.**

sebastjan.bratina@fgg.uni-lj.si

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

drago.saje@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo

in geodezijo,

Jamova 2, Ljubljana

**Znanstveni članek**

UDK 001.891:624.014.2(497.4)

**Povzetek** | V članku se ukvarjamo z analizo nastanka in širjenja razpok pri armiranobetonskem elementu, ki je izpostavljen delovanju kratkotrajne natezne obremenitve. V ta namen smo zasnovali in izdelali tri preizkušance pravokotnega prečnega prereza 10,8/7,2 cm in dolžine 80 cm, pri čemer smo pri enem vzdolžno armaturo vodili kontinuirno, pri drugih dveh pa smo izvedli stikovanje armature s prekrivanjem na različnih dolžinah. V vse preizkušance smo dodatno vgradili tudi stremensko armaturo z namenom preprečitve pojava razcepljanja betonskega ovoja. Po opravljenih nateznih preizkusih smo z numeričnim modelom, ki je bil razvit v okviru raziskovalnega dela na UL FGG, za obravnavane preizkušance simulirali pojavljanje razpok in rezultate primerjali z eksperimentalnimi opažanji. Ugotovili smo, da lahko z uporabljenim numeričnim modelom dovolj natančno simuliramo nastajanje in širjenje prečnih razpok, ne moremo pa simulirati pojava cepilnih razpok in njihovega vpliva na natezno nosilnost elementa. Lahko jih upoštevamo posredno, in sicer z ustreznim konstitucijskim zakonom stika med armaturo in betonskim ovojem na območju preklopa. Dodatno smo ugotovili, da lahko z ustreznim številom vgrajenih stremen preprečimo pojav razcepljanja betonskega ovoja v območju preklopa vzdolžne armature.

Ključne besede: armiranobetonski element, natezna obremenitev, razpokanost, stikovanje s prekrivanjem, stremenska armatura, numerični model

**Summary** | The article deals with the analysis of the formation and propagation of cracks in a reinforced concrete element exposed to short-term tensile loading. For this purpose, we manufactured and tested three reinforced concrete elements with a rectangular cross-section of 10.8/7.2 cm and a length of 80 cm. In one element, the longitudinal reinforcement was continuously placed, while in the other two elements, we carried out the lap splice of different lengths. In addition, we installed stirrups in all tested specimens to prevent the occurrence of splitting cracks in the concrete cover. After conducting tensile tests, a numerical model developed in research work at UL FGG was used to simulate the cracking of the specimens. Then we compared the results with the experimental observations. We found that the numerical model enables us to simulate the formation and propagation of transverse cracks with sufficient accuracy, but we cannot simulate the occurrence of splitting cracks and their effect on the tensile strength. They can be taken into account indirectly by means of a suitable bond stress – slip relationship between the reinforcement and the concrete in the lap splice area. Furthermore, we found that with confinement the splitting of the concrete cover in the lap splice area of the longitudinal reinforcement can be prevented.

**Key words:** reinforced concrete element, tensile load, cracking, lap splice, stirrups, numerical model

## 1 • UVOD

Vse večji poudarek v sodobnem gradbeništvu ima trajnost gradbenih konstrukcij. Armirani beton je kot kompoziten material v gradbenih konstrukcijah zelo občutljiv za destruktivne dejavnike okolja, ki mu je armiranobetonski element oziroma konstrukcija izpostavljena. S pojavom razpok v betonskem ovoju je neposredno ogrožena trajnost armiranobetonske konstrukcije, ki jo v praksi zagotovimo z ustrezno krovno plastjo betona. Zaradi velikega vpliva razpok na obstojnost konstrukcije moramo v armiranobetonskih konstrukcijah preprečiti oziroma omejiti nastanek razpok in njihovo širino. Vzrok za nastanek razpok in razvoju razpok v armiranobetonskih konstrukcijah je težko natančno napovedati, saj je le ta odvisen od mehanskih karakteristik betona in jekla za armiranje, količine in razporeditve vgrajene armature, debeline krovnega sloja betona, interakcije med betonom in armaturo na medsebojnem stiku, obtežbe itd. Nastanek in razvoj razpok v armiranobetonskih konstruk-

cijah je torej fizikalno zahteven pojav, ki ga matematično zelo težko natančno opišemo. Najlažje ga preučujemo na primeru centrično natezno obremenjenega armiranobetonskega elementa. V gradbenih konstrukcijah takšnega ojačenega betonskega elementa, z redkimi izjemami, praktično ne najdemo (glej primera na sliki 1), saj sta poleg osne obremenitve skoraj vedno prisotni še upogibna in strižna obremenitve.

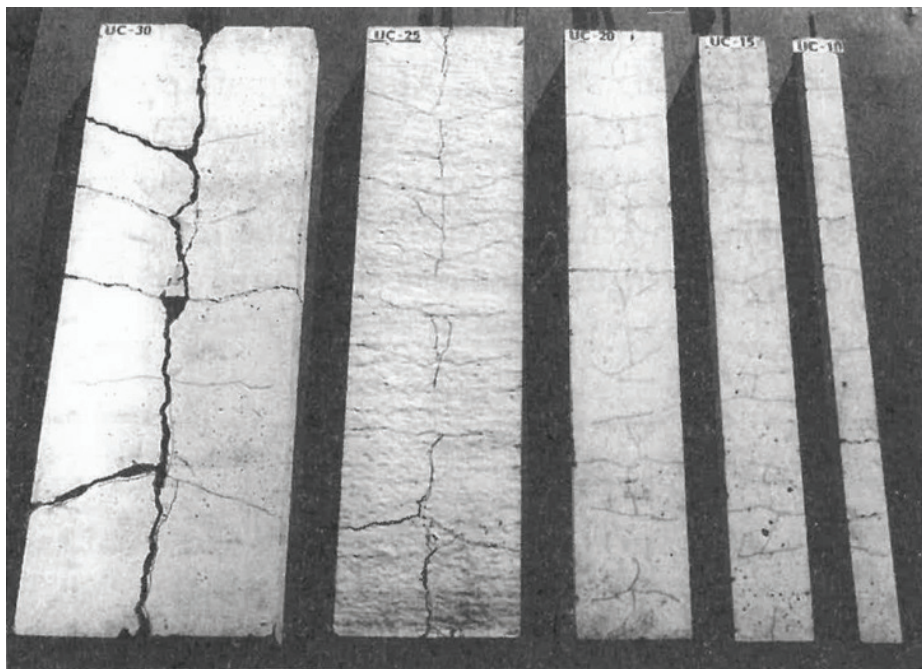
Za proučevanje nastanka in širjenja razpok pri natezno obremenjenem armiranobetonskem preizkušancu moramo izbrati takšne dimenzije prečnega prereza, da pri monotonem naraščanju obremenitve betonski ovoj razpoka bistveno prej, preden pride do plastifikacije vzdolžne armaturne palice. Torej zadostiti moramo pogoju  $f_{ctm} \cdot A_c < f_{yk} \cdot A_{sr}$ , pri čemer

moramo pogoju  $f_{ctm} \cdot A_c < f_{yk} \cdot A_{sr}$ , pri čemer

moramo pogoju  $f_{ctm} \cdot A_c < f_{yk} \cdot A_{sr}$ , pri čemer



Slika 1 • Natezno obremenjene armiranobetonske vešalke na mostu čez Savo Dolinko v Kranjski Gori (Martuljski slapovi, 2018) (levo) in prednapete betonske vešalke na starem mostu Ponte Morandi v Italiji (Ponte Morandi, 2020) (desno).

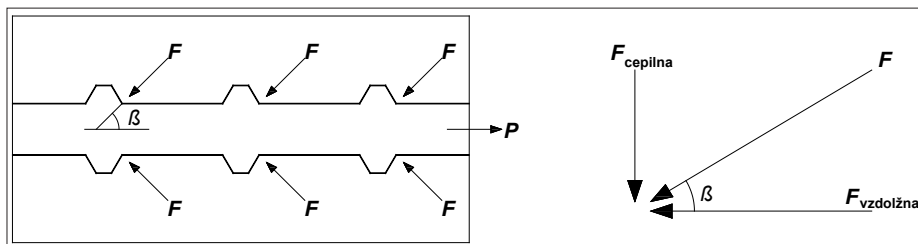


Slika 2 • Primer vzdolžno razcepljenega betonskega ovoja zaradi velikih cepilnih napetosti (Abrishami, 1996).

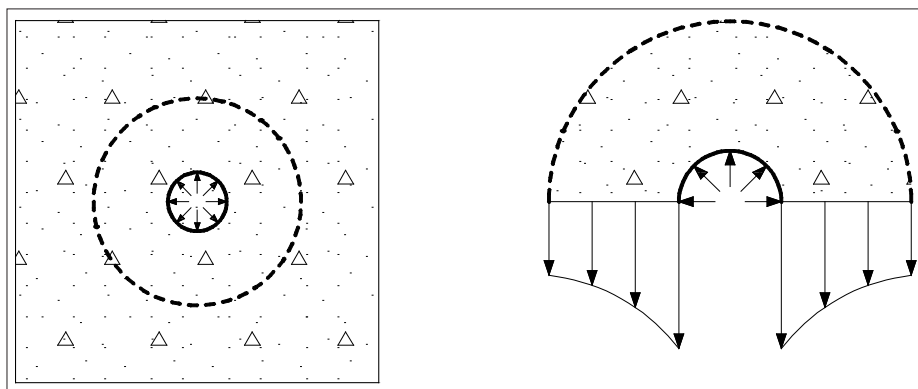
sta  $f_{ctm}$  in  $f_{yk}$  srednja vrednost osne natezne trdnosti betona oziroma karakteristična meja elastičnosti armature,  $A_c$  in  $A_s$  pa prečni prerez betonskega ovoja oziroma armaturne palice. V ta namen morajo biti dimenzije prečnega prereza betonskega ovoja preizkušanca relativno majhne ((Abrishami, 1996), (Chan, 1992), (Wollrab, 1996), (Wu, 2008)).

Raziskovalci dodatno ugotavljajo, da lahko pride pri analiziranih elementih zaradi premajhne debeline krovnega sloja betona oziroma neustreznega objeta do pojava razcepljanja betonskega ovoja. Primer takšnih poškodb prikazujemo na sliki 2.

Raziskovalci v svojih študijah poročajo, da se cepilne napetosti pojavijo zaradi prisotnosti



Slika 3 • Cepilne napetosti (Canbay, 2005).



Slika 4 • Radialni pritiski vzdolžne armature na okoliški beton in pojav nateznih napetosti v debelostenskem betonskem »cilindru« (Canbay, 2005).

reber na armaturni palici. Ko je armaturna palica natezno obremenjena, rebra pritiskajo na okoliški beton s silo  $F$  pod kotom  $\beta$ , kot to prikazujemo na sliki 3.

Medtem ko  $F_{vzdolžna}$  (vodoravna komponenta sile  $F$ ) povzroča strižno obremenitev betona med rebri,  $F_{cepilna}$  (prečna komponenta sile  $F$ ) povzroča radialne pritiske na okoliški beton. Ta se obnaša kot debelostenski »cilinder«, ki je izpostavljen notranjim pritiskom (glej sliko 4). Ti pritiski povzročijo v »cilindru« pojav nateznih obročnih napetosti. Ko te napetosti dosežejo natezno trdnost betona, nastopi porušitev v obliki razcepljanja okoliškega betona (Canbay, 2005).

Abrishami in Mitchell (Abrishami, 1996) v svojih raziskavah navajata, da je pojav vzdolžnih cepilnih razpok značilen pri preizkušancih, ki imajo razmerje med debelino krovne plasti betona in premerom armaturne palice, manjše od 2,5. Tudi v primeru stikovanja armature s prekrivanjem lahko pride zaradi nezadostne debeline krovnega sloja betona do razcepljanja betonskega ovoja. Številni raziskovalci ((Hassan, 2012), (Lagier, 2016), (Lee, 2016)) so v okviru svojih eksperimentalnih raziskav proučevali učinkovitost prenosa sil z ene armaturne palice na drugo v območju stikovanja s prekrivanjem. Ena izmed možnosti prevzemanja velikih cepilnih napetosti v območju stikovanja armature s prekrivanjem je uporaba jeklenih vlaken, ki izboljšajo mehanske lastnosti betona (Lagier, 2016). Če pa želimo zagotoviti ustrezno objetje betonskega ovoja in s tem preprečiti pojav razcepljanja betona, lahko uporabimo tudi armaturo v obliki stremen ((Canbay, 2005), (Fib, 2013)).

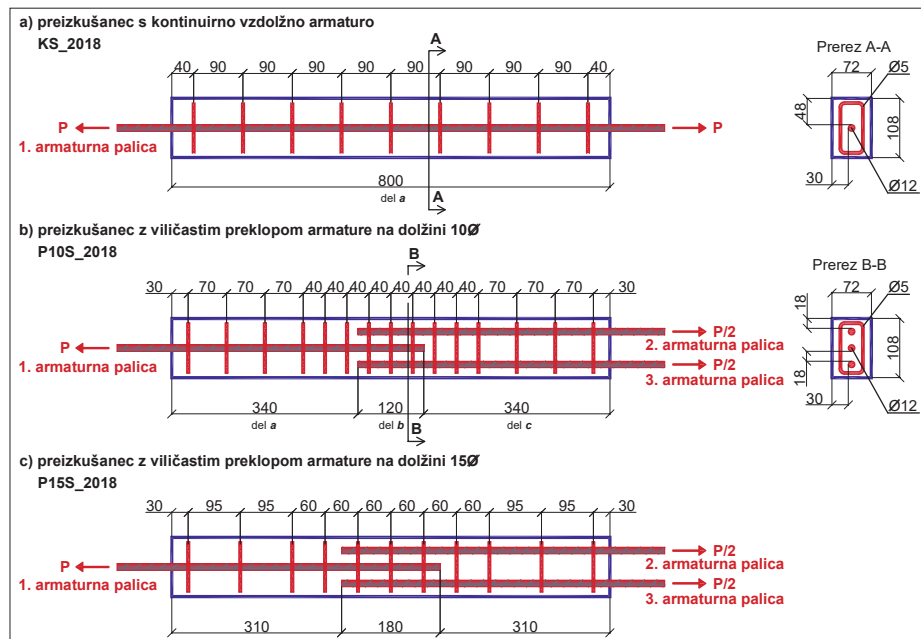
V članku smo nastanek in širjenje razpok proučevali na primeru izoliranih natezno obremenjenih armiranobetonskih elementov, ki smo jih izdelali v laboratoriju. Tako so v 2. poglavju podrobneje opisani preizkušanci, pri katerih smo spreminjali razporeditev vzdolžne in prečne armature. V 3. poglavju je na kratko predstavljen numerični model (Saje, 2017), s katerim smo opravili numerično analizo. Model temelji na uporabi metode končnih elementov, pri čemer razpokanost modeliramo z diskretnimi razpokami. V 4. poglavju je prikazana primerjava rezultatov eksperimentalnih meritev in rezultatov numeričnih analiz, sočasno so podane tudi ugotovitve. Na koncu sledijo zaključki in navedena je uporabljena literatura.



## 2 • EKSPERIMENTALNO DELO

Za proučevanje nastanka in širjenja razpok pri natezno obremenjenem armiranobetonskem elementu smo izbrali element dolžine 80 cm s pravokotnim prečnim prerezom relativno majhnih dimenzij, in sicer 10,8/7,2 cm. Armiran je bil z vzdolžno armaturno palico s premerom  $\phi=12$  mm, ki smo jo razporedili na tri različne načine. V prvem

ma omilili pojav razcepljanja betonskega ovoja zaradi nezadostne debeline krovne plasti. Za pomoč pri formulaciji numeričnega modela, ki sledi v nadaljevanju, smo element razdelili na tri dele. Del z oznako 'a' je del elementa z eno armaturno palico, del 'c' z dvema, del 'b' pa določa območje stikovanja armaturnih palic s prekrivanjem.



Slika 5 • Geometrijski podatki ter podatki o razporeditvi armature v treh različnih preizkušancih (dimenzije so v mm).

primeru smo armaturno palico vodili kontinuirno (glej sliko 5(a)), v drugih dveh primerih pa smo izvedli stikovanje armature s prekrivanjem. Pogosto se namreč zgodi, da zaradi konstrukcijskih razlogov (npr. prekratke palice, postopnost gradnje) armaturne palice vzdolž armiranobetonskega elementa niso kontinuirne. Zaradi zagotavljanja čim bolj simetričnega vnašanja natezne obremenitve v preizkušanec smo stikovanje izvedli v obliki t. i. viličastega preklopa, kot prikazujeta sliko 5(b) oziroma 5(c). Pri tako izvedenem prekrivanju se obremenitev prenaša z ene palice na drugi dve, to pomeni, da zadošča že polovična dolžina prekrivanja (ustrezna projektna dolžina prekrivanja  $l_0$  skladno s standardom SIST EN 1992-1-1:2005 (SIST, 2005) znaša okrog  $15\phi$ ). Izbrali smo dolžini prekrivanja  $10\phi$  (= 12 cm) oziroma  $15\phi$  (= 18 cm). V vse tri preizkušance smo poleg vzdolžne armature vgradili tudi stremensko armaturo z namenom, da bi preprečili oziro-

Opisano eksperimentalno delo, ki je bilo opravljeno v laboratoriju na UL FGG marca 2018, predstavlja nadaljevanje raziskovalnega dela

na temo analize pojava in širjenja razpok pri natezno obremenjenih armiranobetonskih elementih, ki poteka na Katedri za masivne in lesene konstrukcije na UL FGG. Del eksperimentalnih rezultatov je v okviru svoje diplomske naloge predstavil že Benjamin Cerar (Cerar, 2017). V nalogi je podrobneje prikazal rezultate nateznih preizkusov elementov, ki so imeli enake geometrijske in mehanske lastnosti kot zgoraj opisani, enaka je bila tudi razporeditev vzdolžne armature, niso pa imeli dodatne stremenske armature, ki bi preprečevala razcepljanje betonskega ovoja. V okviru snovanja preizkušancev smo potrebno količino stremenske armature določili skladno s priporočili iz literature (Fib, 2013). Pri nateznem preizkusu preizkušanca s kontinuirnim potekom armaturne palice glede na predhodne eksperimentalne rezultate (Cerar, 2017) nismo pričakovali pojava razcepljanja betonskega ovoja, zato smo vanj vgradili le konstruktivno stremensko armaturo, ki smo jo določili po lastni presoji. Pri preizkušancih s preklpom vzdolžne armature pa smo že pri predhodnih preizkusih opazili pojav razcepljanja betona v območju stikovanja armature s prekrivanjem (Cerar, 2017), zato smo v to območje vgradili 3 zaprta stremena  $\phi 5$ , zunaj območja prekrivanja pa smo prav tako vgradili stremena  $\phi 5$ , kot prikazujemo na slikah 5(b) in 5(c). Zaradi večje nazornosti obravnavanim preizkušancem, vključno s tistima, ki sta bila že predhodno testirana (Cerar, 2017) in sta bila tudi vključena v numerično analizo, v nadaljevanju pripišemo ustrezne oznake, kot prikazujemo v preglednici 1.

V nadaljevanju predstavimo podrobnosti poteka priprave preizkušancev z oznakami KS\_2018, P10S\_2018 in P15S\_2018.

razporeditev armature v preizkušancu	datum opravljene meritve		
	januar 2017 (Cerar, 2017)	marec 2017 (Cerar, 2017)	marec 2018
kontinuirna vzdolžna armatura $\phi 12$ , brez stremen	K_2017_1	K_2017_3	
kontinuirna vzdolžna armatura $\phi 12$ , dodana stremena $\phi 5$			KS_2018
izveden viličast preklop na dolžini $10\phi$ , dodana stremena $\phi 5$			P10S_2018
izveden viličast preklop na dolžini $15\phi$ , dodana stremena $\phi 5$			P15S_2018

Preglednica 1 • Označevanje preizkušancev.

## 2.1. Priprava vzorcev za preizkušanje

Najprej smo v namensko pripravljene lesene kalupe vgradili vzdolžne armaturne palice in zaprta stremena (glej sliko 6), kot prikazujemo na sliki 7.

Pri preizkušancu s kontinuirno vzdolžno armaturo (desni kalup na sliki 7) smo na sredini dolžine stranskih sten kalupa dodatno vgradili še dve navpični letvici debeline 5 mm in s tem oslabili prečni prerez elementa, tj. ravno tam, kjer smo pričakovali nastanek prve razpoke.

Vse tri preizkušance smo izdelali iz enake betonske mešanice z oznako NC-1630/22, ki je bila uporabljena že pri predhodnih preizkusih (Cerar, 2017). Zrnovostna sestava betonske mešanice je vsebovala agregat iz separacije Kresnice in mivko iz Moravč. Delež uporabljenih pranih frakcij predstavimo v preglednici 2.

Frakcija	Delež (%)
Mivka - Termit (0/1)	15
Kresnice 0/4	45
Kresnice 4/8	15
Kresnice 8/16	25

Preglednica 2 • Deleži frakcij v zrnovostni sestavi betonske mešanice NC-1630/22.

V zamešanih 35 litrih betona z vodo-cementnim faktorjem 0,52 je bil uporabljen cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R iz cementarne Salomit Anhovo. Uporabljen cement je hitro vezoč in vsebuje visoko količino cementnega klinkerja ter dodatka: granulirano žlindro in apnenec. Uporabljena rebasta armatura je bila kvalitete B500 - B (SIST, 2005). Lastnosti sveže betonske mešanice prikazujemo v preglednici 3.

		NC-1630/22
Posed (cm)	predvideno, konsistencna S3 (SIST, 2016)	10-15
	dejansko	14,5
Vsebnost por (%)	dejansko	1,3
Temperatura (°C)	beton	14,4
	prostor	15,2

Preglednica 3 • Lastnosti sveže betonske mešanice NC-1630/22.

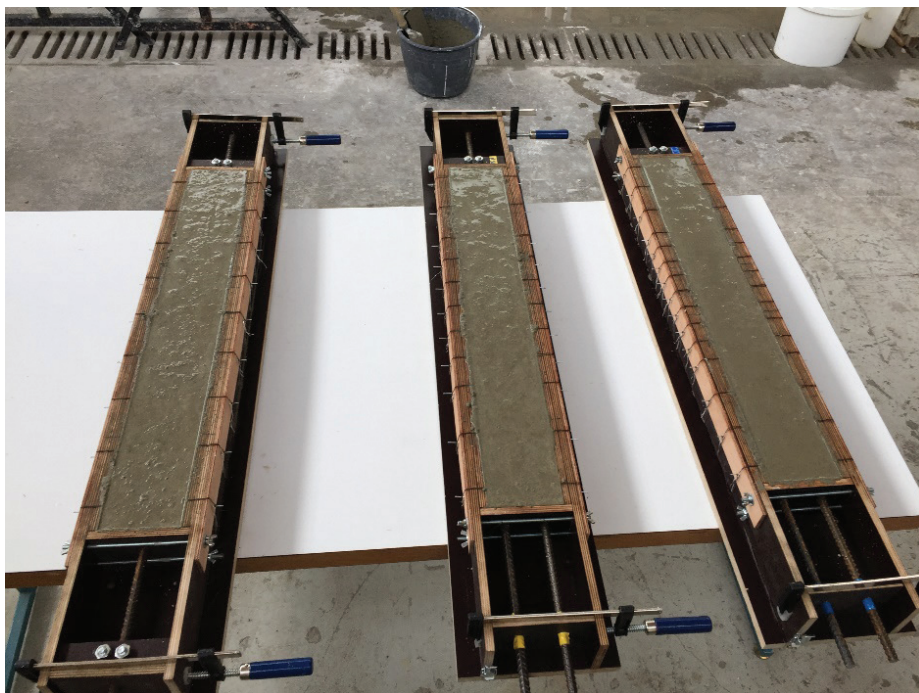


Slika 6 • Zaprto streme iz rebaste armature  $\phi 5$  mm.



Slika 7 • Leseni kalupi z vgrajeno vzdolžno in stremensko armaturo.





Slika 8 • Zabetonirani preizkušanci.

Zaradi lažjega razopaževanja je bilo treba lesene kalupe pred betoniranjem premazati z oljem. Na sliki 8 prikazujemo sveže zabetonirane preizkušance.

Po opravljenem betoniranju smo zgornjo betonsko ploskev prekrili s folijo. S tem smo preprečili krčenje betona zaradi sušenja v zgodnjih fazah pridobivanja trdnosti. Po

približno 24 urah od konca betoniranja smo vzorce razopažili in položili v vodno kopel, kjer so nato 31 dni pridobivali trdnost.

Poleg treh preizkušancev smo sočasno zabetonirali tudi štiri kocke z robom 15 cm, na katerih smo kasneje opravili tlačni preizkus. V preglednici 4 prikazujemo izmerjene tlačne

trdnosti betona sočasno z rezultati meritev iz leta 2017 (Cerar, 2017).

Srednja vrednost tlačne trdnosti devetih preizkušancev je tako znašala  $f_{cm,cube} = 51$  MPa, kar okvirno ustreza trdnostnemu razredu betona C35/45 ( $f_{cm} = 43$  MPa).

## 2.2. Izvedba preizkusa

Preiskave natezno obremenjenih preizkušancev smo opravljali na hidravličnem preizkuševalnem stroju Instron (glej sliko 9). Pomike in deformacije smo merili z različnimi deformetri in merilnimi lističi, ki so podrobneje predstavljeni v nadaljevanju. Silo, pomike in deformacije smo med preizkusom zajemali z merilno napravo Spider.

Preizkušance smo vpeli v čeljusti preizkuševalnega stroja Instron preko vzdolžnih armaturnih palic, ki so na obeh koncih segale iz preizkušancev. Zaradi stiska čeljusti in posledično plastične deformacije armaturne palice ob vpetju, se je v elementu pred pričetkom obremenjevanja pojavila tlačna sila velikosti približno 10 kN. Natezno obremenjevanje armiranobetonskih elementov je potekalo z vsiljevanjem pomika (1 mm v 500 s), in sicer vse do plastifikacije vzdolžne armature oziroma do porušitve preizkušanca.

Pri vseh preizkušancih smo merili spremembo dolžine celotnega elementa, spreminjanje širine izbrane razpoke ter vzdolžno deformacijo jeklene armaturne palice. Za slednje smo uporabili merilne lističe proizvajalca Sokki Kenkyujo tipa FLA-3-11-3L. Na ustrezno pripravljeno površino armaturne palice, ki je gledala iz preizkušanca, smo namestili dva merilna lističa (glej sliko 10). Spremembo dolžine armiranobetonskega elementa smo merili z dvema deformetroma z oznakama 15 in 18. Deformetra, ki sta ime-la bazo 75 cm, smo postavili vzdolž obeh širših stranic elementa, kot shematsko prikazujemo na sliki 10. Čeprav mesta nastanka razpok nismo mogli vnaprej predvideti, smo deformetra z oznakama 11 in 12 (z bazo 10 cm), s katerima smo merili spreminjanje širine izbrane razpoke, postavili na različna mesta, in sicer v odvisnosti od razporeditve vzdolžne armature v preizkušancu. Pri preizkušancu s kontinuirno armaturno palico smo ju postavili na sredino elementa, tj. nad mesto vstavljenih oslabitev, na obe ožji stranici elementa. Njun položaj shematsko prikazujemo na sliki 10.

	Preizkušanec	Tlačna trdnost preizkušanca $f_{c,cube}$ (MPa)	Srednja vrednost tlačne trdnosti preizkušanca $f_{cm,cube}$ (MPa)	Standardni odklon (MPa)
marec 2018	1	47	49	1
	2	49		
	3	50		
	4	50		
marec 2017	5	57	53	4
	6	56		
	7	49		
	8	56		
	9	46		
	<b>Skupaj</b>		<b>51</b>	<b>5</b>

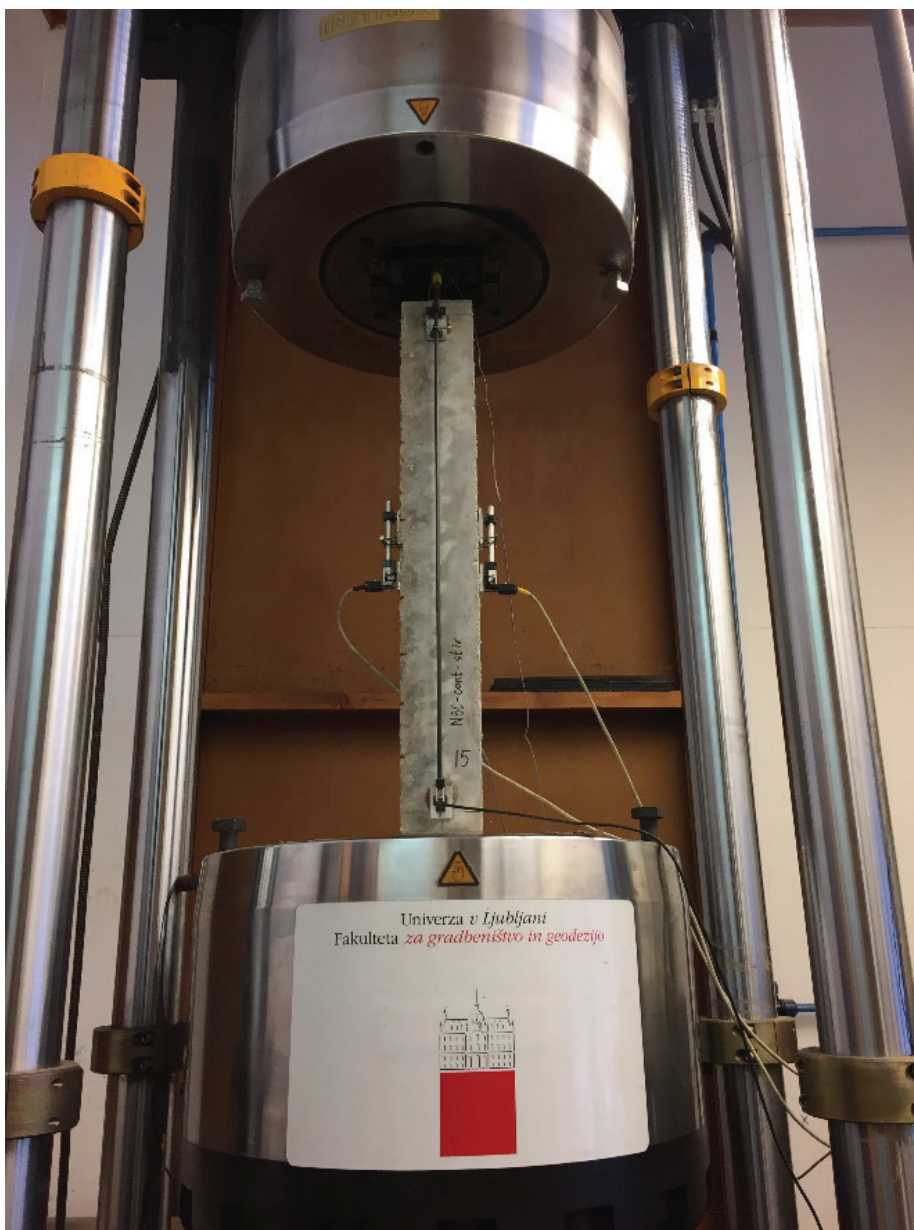
Preglednica 4 • Izmerjene tlačne trdnosti 31 dni starega betona, izdelanega iz betonske mešanice NC-1630/22.

Na sliki 11 na dveh fotografijah prikazujemo lego deformetra 12 z bazo 10 cm in lego deformetra 15 z bazo 75 cm pri preizkušancu s kontinuirno palico.

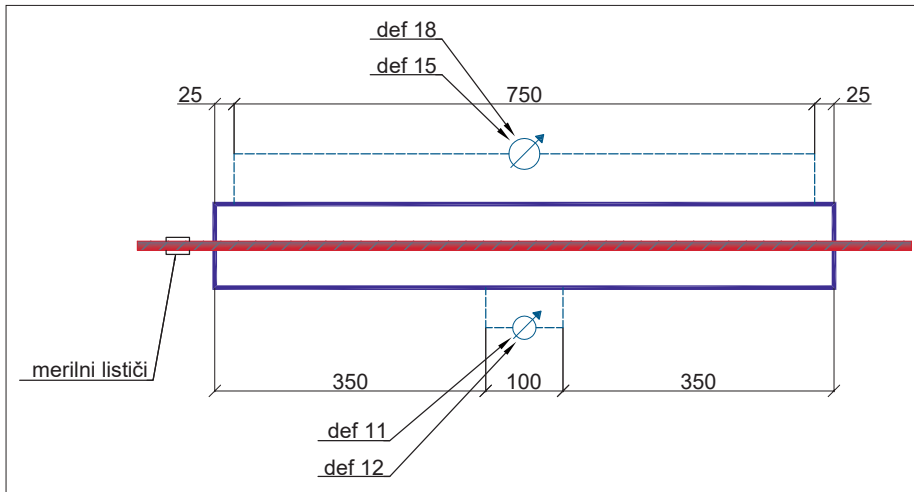
Pri preizkušancih s prekrivanjem vzdolžne armature v obliki vilic (f. i. viličasti preklap) pa

smo deformetra 11 in 12 postavili na mesto začetka viličastega preklapa, kot shematsko prikazujemo na sliki 12 oziroma 13. Na tem mestu je bil betonski del prečnega prereza preizkušanca namreč najbolj oslabljen (če zanemarimo prisotnost stremen), zato smo

tukaj pričakovali nastanek prve razpoke. Položaja drugih dveh deformetrov (15 in 18) ter položaja merilnih lističev na armaturi pa nismo spreminjali.



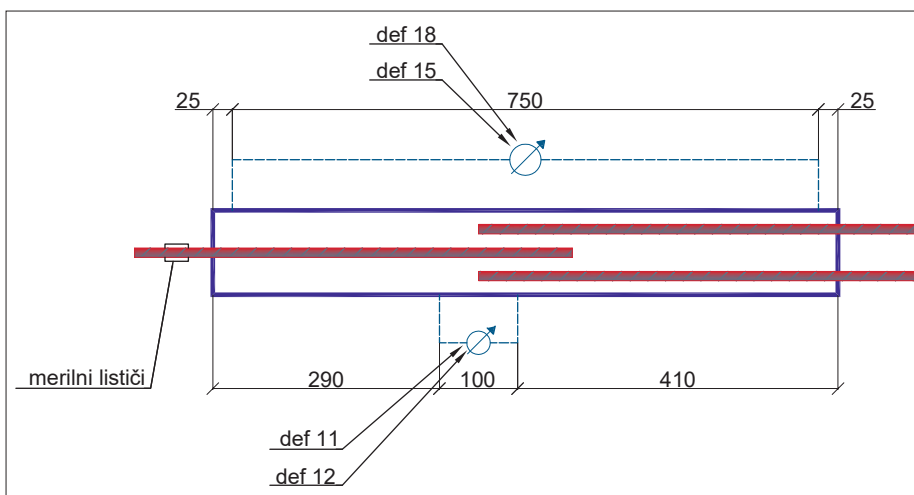
Slika 9 • Preizkuševalna naprava Instron 1345 kapacitete  $\pm 1000$  kN.



Slika 10 • Položaj merilnih lističev in deformetrov pri preizkušancu s kontinuirno armaturno palico (preizkušanec z oznako KS\_2018).

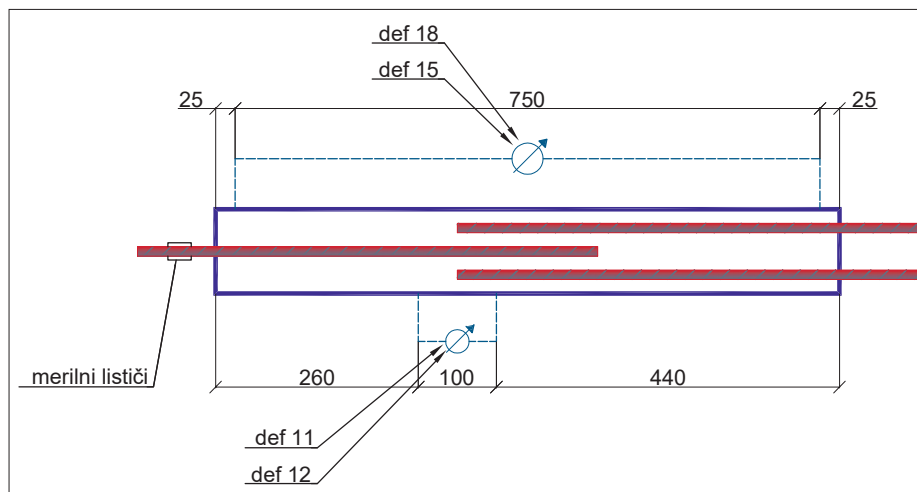


Slika 11 • Položaj deformetra 12 (leva slika) in 15 (desna slika) pri preizkušancu s kontinuirno palico.



Slika 12 • Položaj merilnih lističev in deformetrov pri preizkušancu z viličastim preklpom dolžine 10φ (preizkušanec z oznako P10S\_2018).





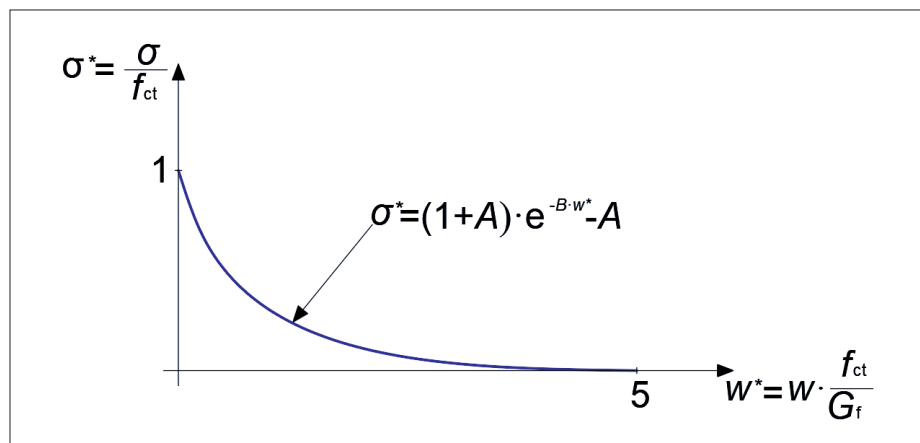
Slika 13 • Položaj merilnih lističev in deformetrov pri preizkušancu z viličastim preklpom dolžine 15φ (preizkušanec z oznako P15S\_2018).

### 3 • NUMERIČNI MODEL

Za matematično modeliranje nastanka in širjenja razpok pri obravnavanih armiranobetonskih elementih uporabimo numerični model, ki je bil podrobneje predstavljen že leta 2017 v Gradbenem vestniku (Saje, 2017). Na tem mestu se ne bomo spuščali v podrobnosti formulacije modela, navedli bomo zgolj njegove bistvene značilnosti.

V numeričnem modelu ločeno obravnavamo betonski ovoj in armaturno palico, ki je lahko tudi prekinjena in se stikuje s prekrivanjem. Armaturna palica in betonski ovoj se lahko na medsebojnem stiku zamakneta, ne moreta pa se razmakniti. V sklopu tega modela je predpostavljeno,

da betonski ovoj razpoka, ko normalna napetost doseže natezno trdnost betona. Po nastanku prečne razpoke sta nerazpokana dela betonskega ovoja med seboj povezana z armaturno palico in tudi z agregatnimi zrni, ki povezujejo dele betonskega ovoja ob razpoki (Cerioni, 2011). V tuji literaturi se za pojav delne povezanosti betonskih ovojev ob razpoki z agregatnimi zrni uporablja izraz »aggregate bridging«. V uporabljenem modelu je delna povezanost betonskih ovojev ob razpoki modelirana z nelinearno vzmetjo. Konstitucijski zakon vzmeti je podan v obliki sovisnosti med normalno napetostjo v razpoki  $\sigma_r$  in širino razpoke  $r$ , in sicer v obliki eksponentne funkcije, ki je povzeto po (Carpinteri, 1999).



Slika 14 • Konstitucijski zakon delne povezanosti betonskega ovoja ob razpoki z agregatnimi zrni v obliki eksponentne funkcije (Carpinteri, 1999).

Omenjeni zakon se je izkazal za računsko dovolj robustnega. Prikazujemo ga v brezdimenzijski obliki na sliki 14. Togost vzmeti je odvisna od natezne trdnosti betona  $f_{ct}$ , energije loma betona  $G_f$ , širine razpoke  $w$ , dodatno pa še od empiričnih konstant  $A$  in  $B$ .

Z nadaljnjim povečevanjem obremenitve se širina razpoke povečuje, nastanejo pa tudi nove prečne razpoke. To se dogaja vse do t. i. stabiliziranega stanja, ko je razdalja med sosednjima razpokama tako majhna, da normalne napetosti v nerazpokanem delu betonskega ovoja kljub povečevanju obremenitev ne dosežejo natezne trdnosti betona. To stanje je odvisno od kvalitete oziroma nosilnosti stika med betonom in armaturo, ki določa prenos natezne sile z armaturne palice na betonski ovoj. Raziskave kažejo, da moramo pri matematičnem modeliranju obnašanja stika upoštevati poleg mehanskih lastnosti betona in armature tudi dva različna geometrijsko in konstrukcijsko pogojena načina porušitve stika. Odvisna sta predvsem od debeline krovnega sloja betona in od morebitnega objetja betona. Ko ima element zadostno debelino krovnega sloja betona in ustrezno objetje betona s stremensko armaturo, nastopi porušitev stika z izvlekom armature, ki je pogojena s strižno porušitvijo betona med rebri armaturnih palic. Ko pa debelina krovnega sloja betona ni zadostna oziroma betonski ovoj ni objet ali pa je nezadostno objet, se stik poruši zaradi razcepljanja okoliškega betona (Saje, 2017).

## 4 • PRIMERJAVA EKSPERIMENTALNIH REZULTATOV Z REZULTATI NUMERIČNIH ANALIZ

V tem poglavju s primerjavo eksperimentalnih rezultatov in rezultatov numeričnih analiz preverimo primernost in učinkovitost razvitega numeričnega modela. Obravnavamo element s kontinuirnim potekom vzdolžne armature ter element s stikovanjem armature v obliki villičastega preklopa. Skladno z izvedenimi eksperimenti v numerični analizi upoštevamo, da imajo elementi vgrajeno tudi stremensko armaturo, ki zmanjšuje možnost pojava vzdolžnega razcepljanja betonskega ovoja, ki negativno vpliva na učinkovitost prenosa nateznih sil z ene palice na drugo. Prisotnost stremenske armature v predstavljenem numeričnem modelu upoštevamo zgolj

posredno, in sicer z reduciranim prečnim prerezom betonskega ovoja na mestu stremen ter z ustreznim konstitucijskim zakonom stika med armaturno palico in betonskim ovajem, ki upošteva tudi vpliv objetja ((Fib, 2013), (Kralj, 2018), (Saje 2017)). V preglednici 5 zberemo geometrijske in mehanske lastnosti analiziranih elementov.

### 4.1. Element s kontinuirno vzdolžno armaturno palico $\phi 12$ brez stremen (K\_2017\_1 in K\_2017\_3)

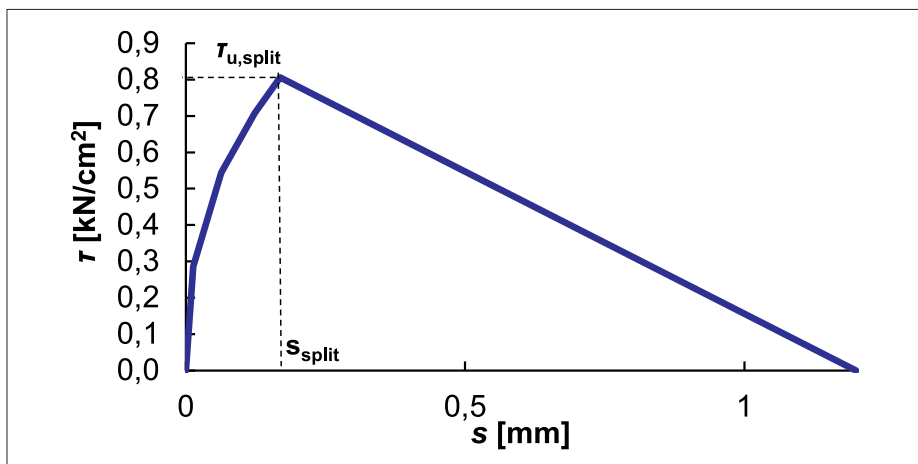
Najprej numerično analiziramo najenostavnejši element, tj. element s kontinuirno armaturno palico brez vgrajenih stremen. Re-

zultate eksperimentalnih meritev povzamemo po Benjaminu Cerarju (Cerar, 2017). Zaradi nezadostnega betonskega kritja ( $< 5\phi$  (Fib, 2013)) upoštevamo porušitev stika med armaturno palico in betonom z razcepljanjem betona ter dobre pogoje sidranja. Upoštevan konstitucijski zakon stika prikazujemo na sliki 15. Sprijemna trdnost stika znaša  $\tau_{u,split} = 0,806 \text{ kN/cm}^2$  (glej tudi preglednico 5), pripadajoči zamik pa  $s_{split} = 0,169 \text{ mm}$ . Vrednosti določimo s pomočjo izrazov iz (Fib, 2013).

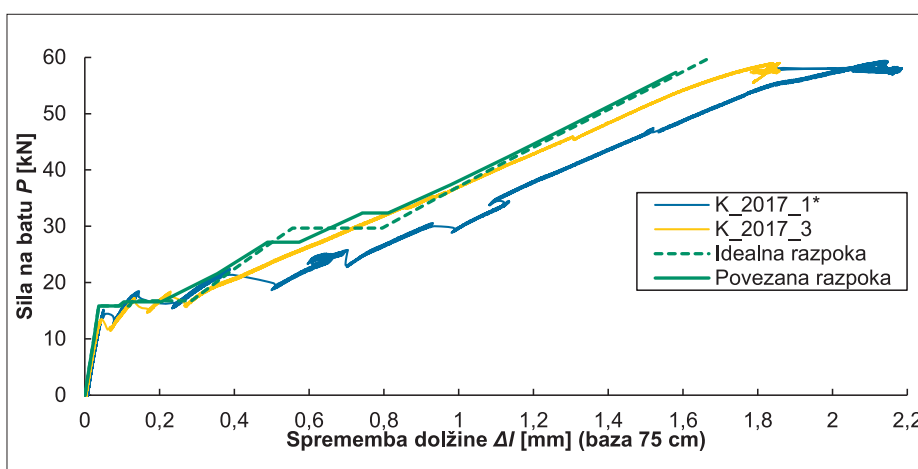
Numerično analizo najprej izvedemo brez upoštevanja delne povezanosti betonskega ovoja ob razpoki z agregatnimi zrni (»idealna razpoka«), drugič pa to povezavo upoštevamo z nelinearno vzmetjo (»povezana razpoka«), pri čemer upoštevamo konstitucijski zakon vzmeti v obliki eksponentne funkcije (glej

Lastnost:	Vrednost:	Opomba:
dolžina elementa $l$	80 cm	
širina/višina prereza $b/h$	10,8/7,2 cm	
površina prečnega prereza arm. palice $\phi 12$	1,13 cm <sup>2</sup>	
neto površina prečnega prereza $A_c$ $A_c = b \cdot h - n_p \cdot A_s$	76,63 (63,86) cm <sup>2</sup> 75,50 (62,73) cm <sup>2</sup> 74,37 (61,60) cm <sup>2</sup>	prerez z 1 arm. palico (na mestu stremenske armature) prerez z 2 arm. palicama (na mestu stremenske armature) prerez s 3 arm. palicami (na mestu stremenske armature)
srednja vrednost tlačne trdnosti betona $f_{cm}$	4,3 kN/cm <sup>2</sup>	določeno na podlagi meritev (glej preglednico 3)
srednja vrednost natezne trdnosti betona $f_{ctm}$	0,19 kN/cm <sup>2</sup>	ocenjeno na podlagi nastanka prve razpoke v preizkušancu
modul elastičnosti betona $E_{cm}$	3400 kN/cm <sup>2</sup>	(SIST, 2005)
energija loma $G_f$	83 Nm/m <sup>2</sup>	(CEB-FIP, 1993)
napetost jekla za armiranje na meji elastičnosti $f_{yk}$	50 kN/cm <sup>2</sup>	(SIST, 2005)
modul elastičnosti jekla za armiranje $E_s$	20000 kN/cm <sup>2</sup>	(SIST, 2005)
sprijemna trdnost stika $\tau_{u,split}$ za elemente brez stremenske armature	0,806 kN/cm <sup>2</sup>	del 'a' – 1 vzdolžna armaturna palica brez objetja s stremeni (Fib, 2013)
sprijemna trdnost stika $\tau_{u,split}$ za elemente s stremensko armaturo	1,182 (brez preklopa), 1,289 (preklop 10 $\phi$ ), 1,162 kN/cm <sup>2</sup> (15 $\phi$ ) 1,122 (10 $\phi$ ), 1,028 kN/cm <sup>2</sup> (15 $\phi$ ) 1,256 (10 $\phi$ ) 1,192 kN/cm <sup>2</sup> (15 $\phi$ )	del 'a' – 1 vzdolžna armaturna palica z objetjem s stremeni  del 'b' – 3 vzdolžne armaturne palice z objetjem  del 'c' – 2 vzdolžni armaturni palici z objetjem (Fib, 2013)
konstitucijski zakon vzmeti v obliki eksponentne funkcije	$A = 0,0082896$ $B = 0,96020$ $w_{crit} = 5G_f/f_{ct} = 0,0218 \text{ mm}$	delna povezanost betonskega ovoja ob razpoki z agregatnimi zrni – »povezana razpoka« (Carpinteri, 1999)

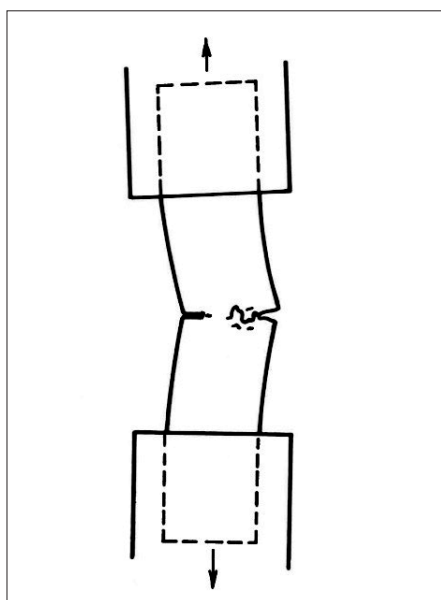
Preglednica 5 • Upoštevane geometrijske in mehanske lastnosti AB-elementov v okviru numerične analize.



Slika 15 • Konstitucijski zakon stika za element s kontinuirno armaturno palico brez stremen (Fib, 2013).

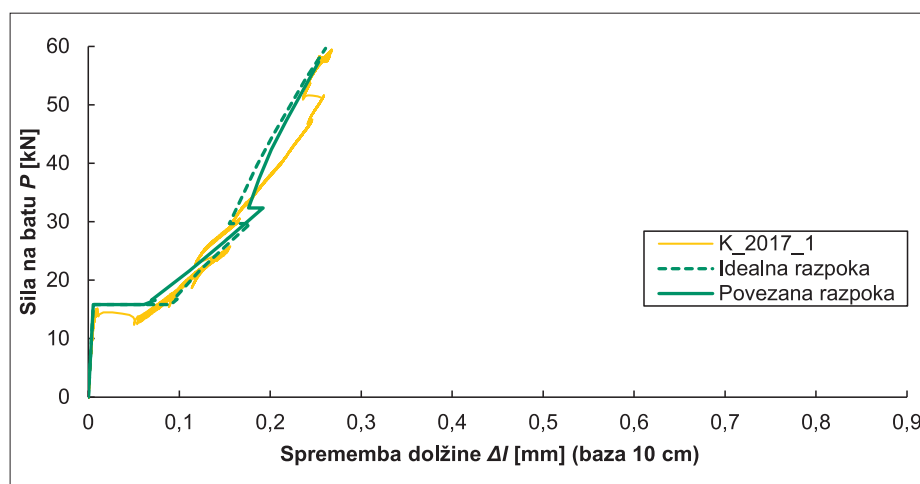


Slika 16 • Primerjava eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje dolžine elementa s kontinuirno armaturno palico brez stremen.



Slika 17 • Nesimetrično odpiranje razpok pri centrični natezni obremenitvi (Bažant, 1989).

sliki 14). Na sliki 16 prikazujemo primerjavo eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje dolžine preizkušanca v odvisnosti od natezne obremenitve (povprečje meritev



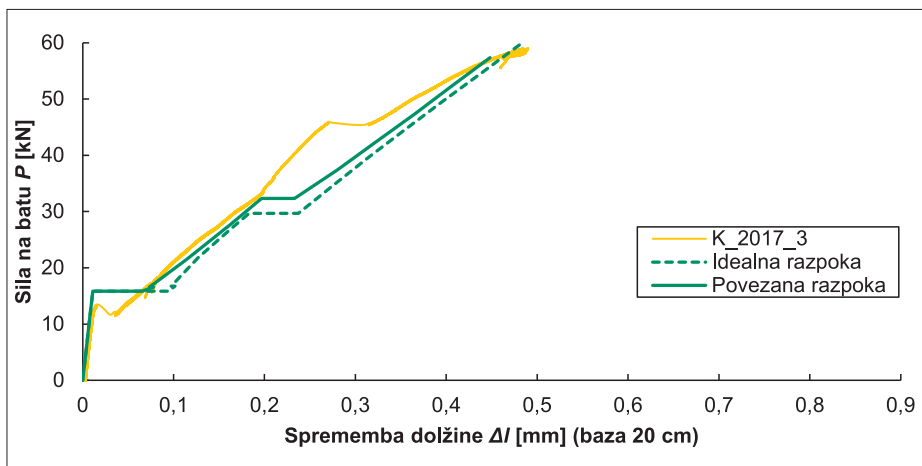
Slika 18 • Primerjava eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje širine prve razpoke pri elementu s kontinuirno armaturno palico brez stremen z oznako K\_2017\_1.

deformetra 15 in 18). Med preizkusom je bila porušitev elementa posledica plastifikacije vzdolžne armaturne palice, kar se je na diagramu odrazilo v nenadni izgubi togosti. Ugotovimo, da se rezultati numerične analize zelo dobro prilegajo rezultatom meritev. Naj pri tem omenimo, da so pri preizkušancu K\_2017\_1 zaradi odpovedi deformetra 15 prikazane meritve le za deformeter 18, zato smo k oznaki preizkušanca dodali »\*«. Tudi v okviru numerične analize je bila porušitev elementa posledica plastifikacije armature.

V nadaljevanju prikažemo še primerjavo eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje širine prve razpoke, ki se je med nateznim preizkusom pojavila na sredini preizkušanca na mestu oslabitve. Zaradi nesimetričnega odpiranja razpoke prikazujemo povprečje meritev deformetrov 11 in 12. Upogibanje preizkušanca in posledično nesimetrično odpiranje razpok ni posledica le naključnih imperfektnosti, temveč je pokazatelj nestabilnosti, ki se pojavlja pri natezno obremenjenih preizkušancih. Razpoke se zato širijo z ene strani betonskega prečnega prereza proti drugi (glej sliko 17), namesto da bi se razpoka odprla naenkrat po celotnem betonskem prerezu (Bažant, 1989).

Pri odčitavanju numeričnih rezultatov dodatno upoštevamo, da je bila meritev pri preizkušancu K\_2017\_1 izvedena z deformetrom z bazo dolžine 10 cm, pri preizkušancu K\_2017\_3 pa z deformetrom z bazo 20 cm. Zaradi različne baze zajemanja podatkov primerjave med eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati prikazujemo ločeno na slikah 18 in 19. Ugotovimo zelo dobro ujemanje rezultatov. Dodatno opazimo, da upoštevanje delne povezanosti razpok





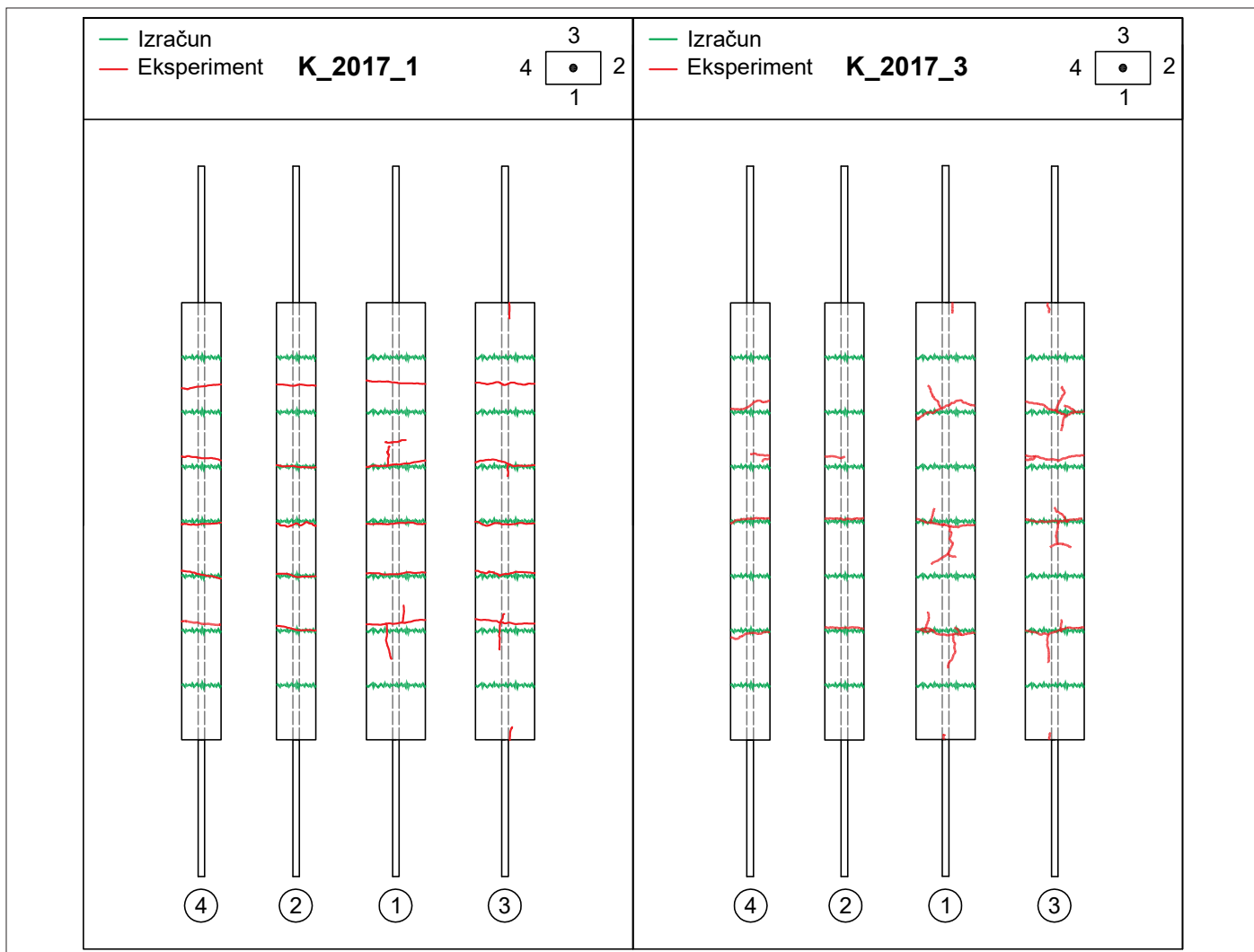
Slika 19 • Primerjava eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje širine prve razpoke pri elementu s kontinuirno armaturno palico brez stremen z oznako K\_2017\_3.

z agregatnimi zrni («povezana razpoka») nima bistvenega vpliva na spreminjanje širine razpoke. Pri preizkušancu K\_2017\_3

(slika 19) je pri višjih nivojih natezne obremenitve izmerjena in izračunana širina razpoke opazno večja kot pri preizkušancu

K\_2017\_1. To je posledica daljšega območja zajemanja pomikov, ki pri višjih nivojih obremenitev vključuje tudi nastanek in širjenje sosednje, novonastale razpoke. Slednja se v numeričnih analizah pojavi pri natezni sili približno 30 kN, medtem ko je bila med eksperimentom zaznana pri nekoliko višji obremenitvi (pribl. 45 kN). Pojav nove razpoke je na sliki 19 viden z nenadnim povečanjem širine razpoke (spremembe dolžine  $\Delta l$ ) pri nespremenjeni obremenitvi.

V nadaljevanju na sliki 20 prikažemo še primerjavo med računsko in eksperimentalno določeno razporeditvijo razpok v stabiliziranem stanju. Ugotovimo, da so rezultati numerične analize primerljivi z rezultati meritev. Pri preizkušancu z oznako K\_2017\_1 smo v stabiliziranem stanju našli 5 prečnih razpok (levi prikaz na sliki 20), pri preizkušancu K\_2017\_3 pa štiri. V numerični



Slika 20 • Primerjava računsko in eksperimentalno določene razporeditve razpok v stabiliziranem stanju vzdolž elementa s kontinuirno armaturno palico brez stremen.

analizi smo v stabiliziranem stanju našli 7 razpok, ki so bile razporejene v enakih medsebojnih oddaljenostih. Pri tem pa upoštevaje pojava delne povezanosti razpok z agregatnimi zrni ni imelo vpliva na njihovo razporeditev, pojavile so se le pri nekoliko nižjih obremenitvah in v drugačnem zaporedju (Kralj, 2018).

#### 4.2. Element s kontinuirno vzdolžno armaturno palico $\phi 12$ in dodanimi stremeni (KS\_2018)

Sedaj prikažemo primerjavo rezultatov numerične in eksperimentalne analize še za element s kontinuirno armaturno palico  $\phi 12$ , pri katerem smo betonski ovoj ojačali s stremeni. Konstitucijski zakon stika

pogoje sidranja. Sprjemna trdnost stika sedaj znaša  $\tau_{u,split} = 1,182 \text{ kN/cm}^2$  (glej tudi preglednico 5), pripadajoči zamik pa  $s_{split} = 0,441 \text{ mm}$ .

V nadaljevanju na sliki 22 prikažemo primerjavo med numeričnimi in eksperimentalnimi rezultati za spreminjanje dolžine elementa v odvisnosti od natezne obremenitve (povprečne meritev deformetra 15 in 18). Ugotovimo, da se rezultati numerične analize brez oziroma z upoštevanjem delne povezanosti betonskih ovojev ob razpoki z agregatnimi zrni zelo dobro prilegajo rezultatom meritev. Tudi v tem primeru je porušitev elementa (eksperiment, numerična analiza) posledica plastifikacije vzdolžne armature.

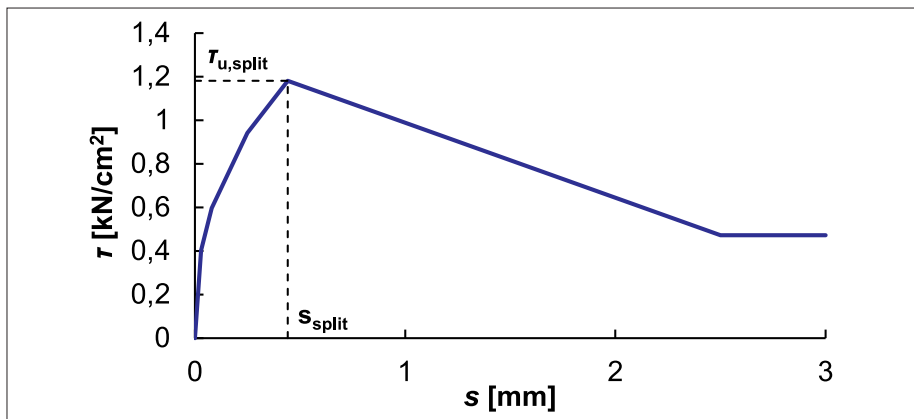
nahaja tudi dodatna oslabeitev. Na sliki 23 prikazujemo primerjavo eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje širine prve razpoke (povprečne meritev deformetra 11 in 12). Spet opazimo zelo dobro ujemanje rezultatov. Dodatno ugotovimo, da se numerični rezultati bolje prilegajo rezultatom meritev, če v analizi upoštevamo t. i. povezano razpoko. Pri nizkih nivojih natezних obremenitev je vpliv delne povezanosti razpok relativno velik, razpoka je zaradi tega pojava nekoliko ožja, z odpiranjem razpoke pa se ta vpliv zmanjšuje.

Na sliki 24 prikažemo še primerjavo med računsko in eksperimentalno določeno razporeditvijo razpok v stabiliziranem stanju. Ugotovimo, da se rezultati numerične analize zelo dobro prilegajo rezultatom meritev tako glede števila kot lokacije razpok. To je do neke mere pričakovano, saj se razpoke pojavijo na mestu vgrajenih stremen, ki predstavljajo oslabeitev betonskega prereza.

#### 4.3. Element z viličastim preklpom vzdolžne armature na dolžini $10\phi$ in dodanimi stremeni (P10S\_2018)

Zdaj prikažemo še primerjavo numeričnih in eksperimentalnih rezultatov za element z viličastim preklpom vzdolžne armature na dolžini  $10\phi$  in dodanimi stremeni (glej sliko 5(b)). Ker se število armaturnih palic v prečnem prerezu vzdolž elementa spreminja, se sočasno spreminja tudi računsko določena sprjemna trdnost stika med armaturno palico in okoliškim betonom. Tako za del 'a' trdnost stika znaša  $\tau_{u,split} = 1,289 \text{ kN/cm}^2$ , za del 'b'  $1,122 \text{ kN/cm}^2$ , za del 'c' pa  $1,256 \text{ kN/cm}^2$  (glej preglednico 5). Tudi v primeru tega elementa upoštevamo porušitev stika z razcepljanjem betona ter dobre pogoje sidranja. Zaradi poenostavitve računa v nadaljnji analizi za vse tri dele upoštevamo konstitucijski zakon, ki velja za del 'b', kjer je  $\tau_{u,split} = 1,122 \text{ kN/cm}^2$ , pripadajoči zamik pa  $s_{split} = 0,388 \text{ mm}$ . Prikazujemo ga na sliki 25. Na podlagi parametričnih študij, ki smo jih opravili v okviru testiranja razvitega numeričnega modela, smo ugotovili, da je sprjemna trdnost stika eden najpomembnejših parametrov, ki pri uporabljenem numeričnem modelu določa nosilnost elementa. Zato dodatno skonstruiramo še dva zakona stika, pri katerih sprjemno trdnost reduciramo za 20 oziroma 40%. Ustrezno določimo tudi pripadajoče zamike  $s_{split}$ . Tudi ta dva modificirana zakona sta prikazana na sliki 25.

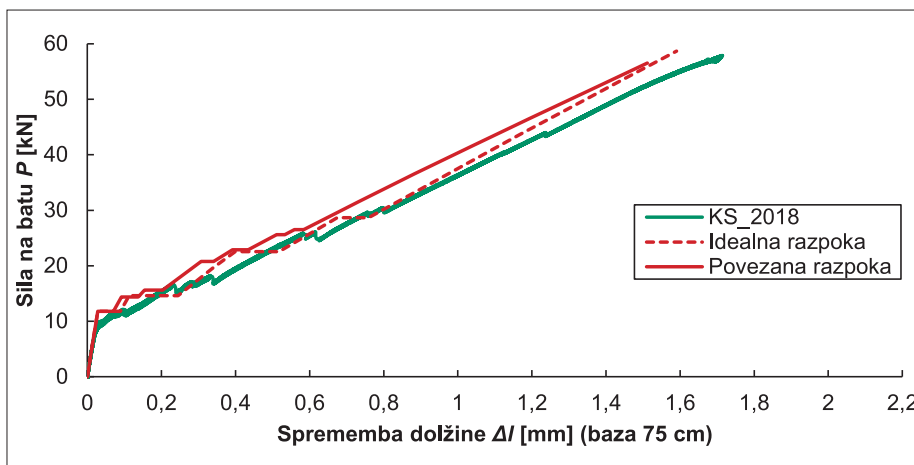
Na sliki 26 najprej prikažemo primerjavo rezultatov numerične in eksperimentalne



Slika 21 • Konstitucijski zakon stika za element s kontinuirno armaturno palico in dodanimi stremeni (Fib, 2013).

z upoštevanjem ugodnega vpliva objetja s stremeni prikazujemo na sliki 21. Tudi

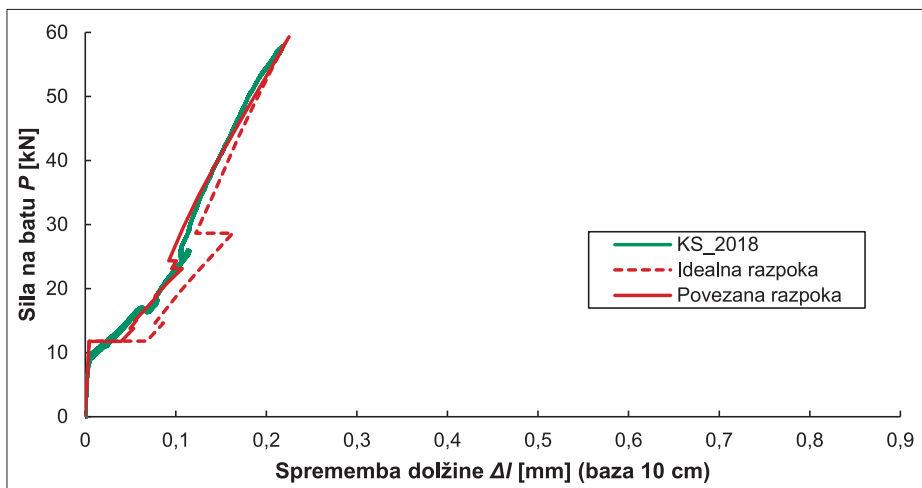
Tako kot pri elementu s kontinuirno armaturno palico brez stremen se tudi v



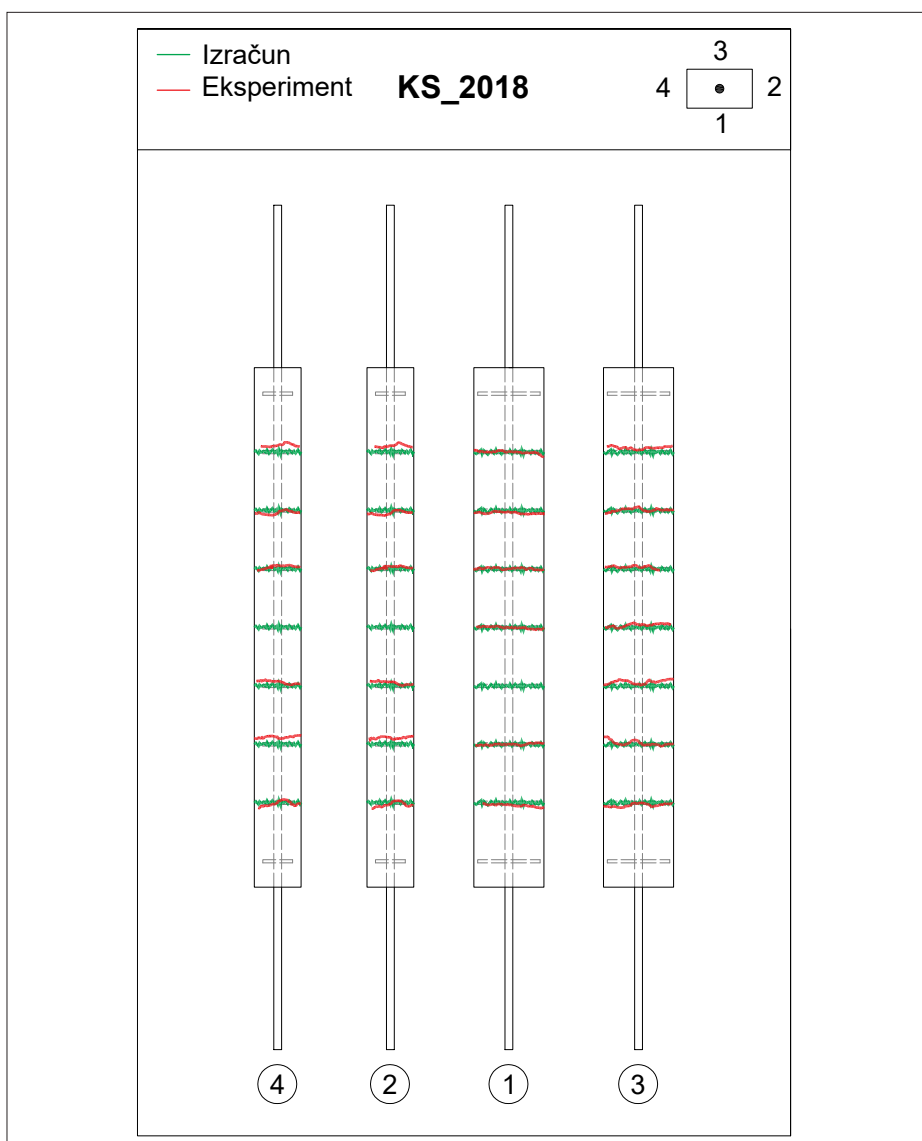
Slika 22 • Primerjava eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje dolžine elementa s kontinuirno armaturno palico in dodanimi stremeni.

v tem primeru predpostavimo porušitev stika z razcepljanjem betona in dobre

tem primeru prva razpoka pojavi na sredini dolžine elementa, kjer se poleg stremena



Slika 23 • Primerjava eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje širine prve razpoke pri elementu s kontinuirno armaturno palico in dodanimi stremeni.



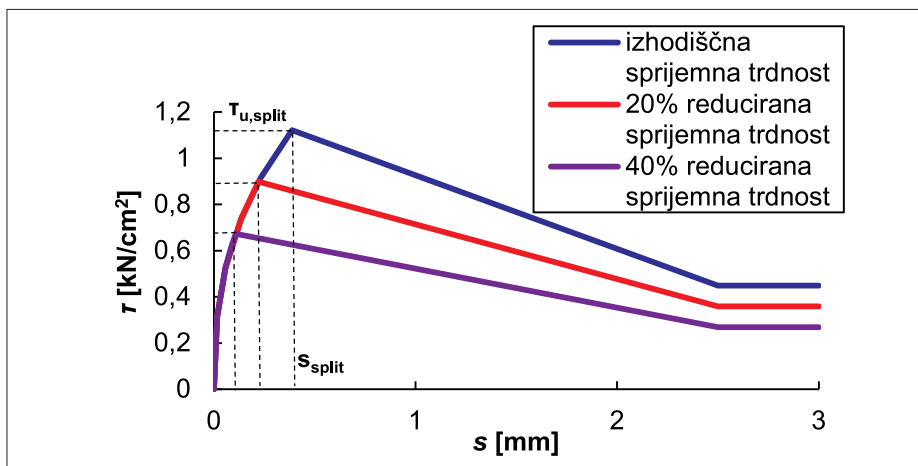
Slika 24 • Primerjava računsko in eksperimentalno določene razporeditve razpok v stabiliziranem stanju vzdolž elementa s kontinuirno armaturno palico in dodanimi stremeni.

analize za spreminjanje dolžine elementa v odvisnosti od natezne obremenitve (povprečje meritev deformetra 15 in 18). Kljub vgrajenim stremenom se je med preizkusom element porušil zaradi razcepljanja betonskega ovoja v območju preklopa vzdolžne armature, kar najverjetneje pomeni, da količina vgrajenih stremen pri tako kratkem preklonu ni bila zadostna oziroma kratek preklon ne omogoča učinkovitega prenosa sile z ene palice na drugi dve. Natezna nosilnost elementa je znašala okrog 35 kN in je bila precej manjša od nosilnosti elementov s kontinuirnim potekom vzdolžne armature (pribl. 55 kN, glej sliki 16 in 19). Numerično analizo izvedemo brez upoštevanja delne povezanosti betonskega ovoja ob razpoki z agregatnimi zrnji (»idealna razpoka«), saj smo na podlagi predhodno opravljenih parametričnih študij ugotovili, da je ta vpliv v primeru analiziranega elementa zanemarljiv. Če v numerični analizi upoštevamo izhodiščno sprijemno trdnost stika, se rezultati numerične analize do sile 35 kN zelo dobro prilegajo rezultatom meritev, medtem ko nosilnost elementa zelo precenimo, saj v numeričnem modelu ne moremo neposredno upoštevati vpliva razcepljanja betonskega ovoja. To lahko storimo le posredno, in sicer z zmanjšanjem nosilnosti stika. Tako ugotovimo, da je s 40 % redukcijo sprijemne trdnosti računsko določena nosilnost elementa praktično enaka izmerjeni.

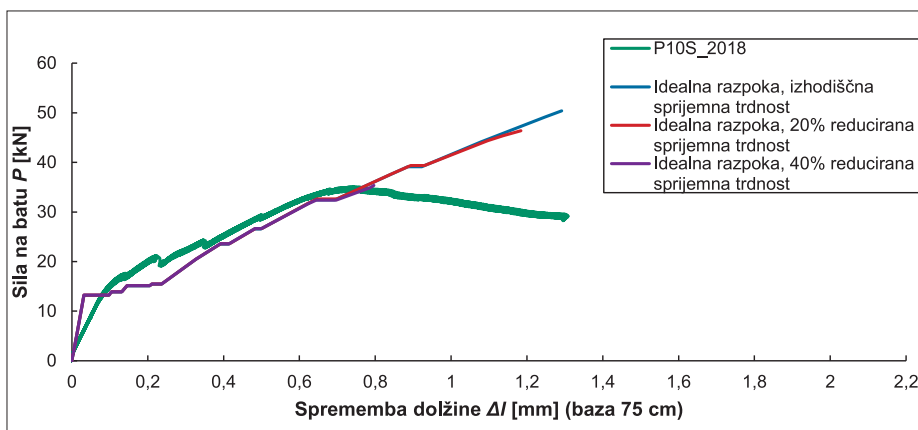
V nadaljevanju prikazemo še primerjavo eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje širine razpoke, ki se formira na začetku viličastega preklopa, tj. v območju merilnega območja deformetrov 11 in 12. Primerjavo prikazujemo na sliki 27. Ugotovimo, da je izračunana širina obravnavane razpoke v primerjavi z izmerjeno nekoliko večja. V numerični analizi se namreč znotraj merilnega območja pojavi prva razpoka pri sili  $P = 13,17$  kN, kar se na sliki 27 odraža kot nenadno povečanje dolžine  $\Delta l$ . Med preizkusom pa se je znotraj merilnega območja pojavila šele druga razpoka, in sicer pri sili okrog  $P = 20$  kN, medtem ko smo prvo razpoko opazili zunaj merilnega območja.

V nadaljevanju na sliki 28 prikazemo še primerjavo med računsko (upoštevamo 40 % reducirano sprijemno trdnostjo stika) in eksperimentalno določeno razporeditvijo razpok pri največji natezni obremenitvi. Ugotovimo, da

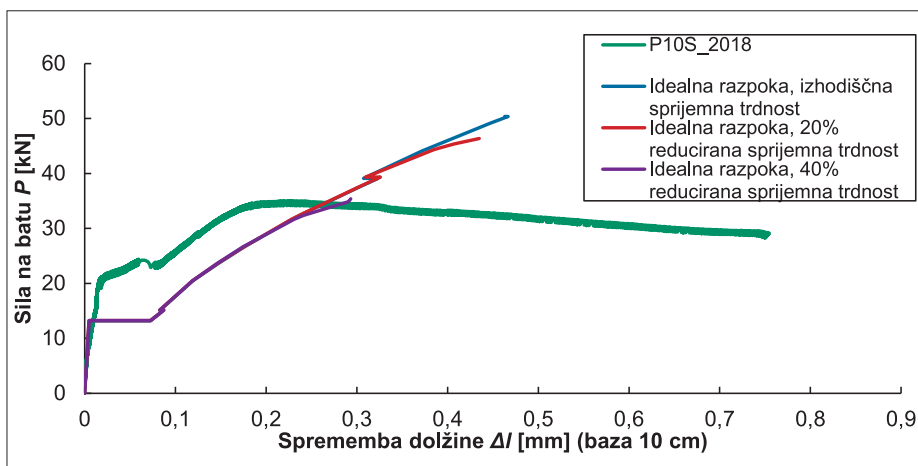




Slika 25 • Izhodišni (Fib, 2013) ter dva modificirana konstitucijska zakona stika za element z viličastim preklpom vzdolžne armature na dolžini 10φ in dodanimi stremeni.



Slika 26 • Primerjava eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje dolžine elementa z viličastim preklpom vzdolžne armature na dolžini 10φ in dodanimi stremeni.



Slika 27 • Primerjava eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje širine izbrane razpoke pri elementu z viličastim preklpom vzdolžne armature na dolžini 10φ in dodanimi stremeni.

je računsko določeno število razpok primerljivo s številom razpok, ki smo jih opazili med preizkusom. S slike 28 je dodatno razvidno, da so se med preizkusom poleg prečnih

razpok pojavile tudi cepilne oziroma vzdolžne razpoke v območju preklpa, zaradi katerih je odpovedal stik med armaturnimi palicami in betonom.

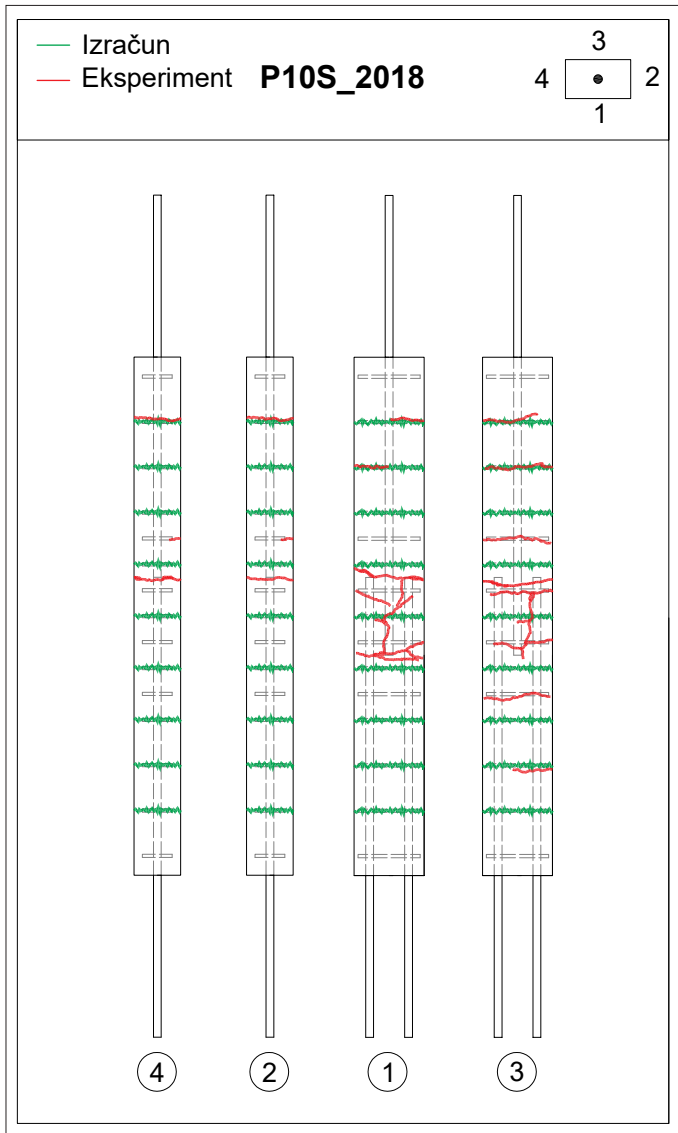
#### 4.4. Element z viličastim preklpom vzdolžne armature na dolžini 15φ in dodanimi stremeni (P15S\_2018)

V zadnjem primeru pa predstavimo še rezultate numerične analize za element z viličastim preklpom vzdolžne armature na dolžini 15φ in dodanimi stremeni (glej sliko 5(c)) ter jih primerjamo z eksperimentalnimi rezultati. Zaradi nezadostnega betonskega križja tudi v tem primeru upoštevamo porušitev stika z razcepljanjem betona in dobre pogoje sidranja. Za vse tri dele nosilca upoštevamo konstitucijski zakon stika, ki velja za del 'b'. Pripadajoča sprjemna trdnost znaša  $\tau_{u,split} = 1,028 \text{ kN/cm}^2$  in je pričakovano manjša kot pri elementu s krajšo dolžino preklpa, saj so stremena sedaj na večji medsebojni oddaljenosti. Pripadajoči zamik je  $s_{split} = 0,312 \text{ mm}$ . Dodatno skonstruiramo še dva konstitucijska zakona stika z ustrezno reducirano trdnostjo. Upoštevane zakone stika prikazujemo na sliki 29.

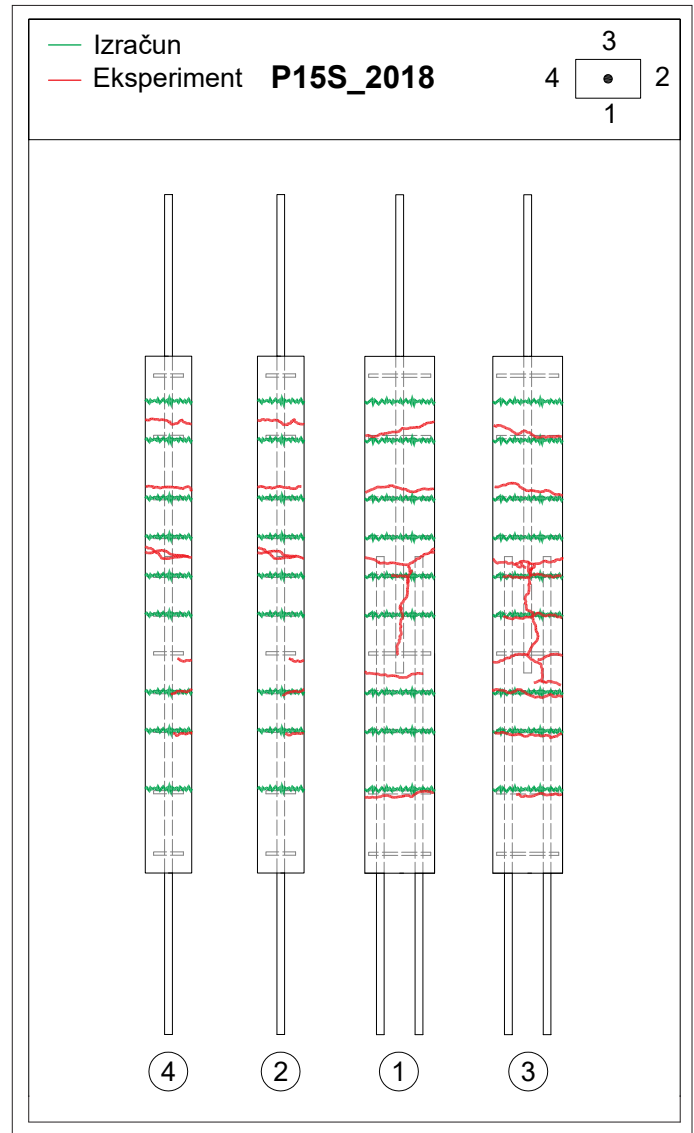
Najprej na sliki 30 prikazemo primerjavo med eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati za spreminjanje dolžine elementa v odvisnosti od natezne obremenitve (povprečje meritev deformetra 15 in 18). Med preizkusom je bila porušitev elementa posledica plastifikacije armature ter sočasne odpovedi stika med armaturnimi palicami in betonom zaradi razcepljanja betonskega ovoja v območju preklpa. Pri tem je bila dosežena natezna nosilnost povsem primerljiva z nosilnostjo elementov s kontinuirnim potekom vzdolžne armature (pribl. 55 kN). Ugotovimo, da se rezultati računa zopet zelo dobro prilegajo rezultatom meritev. Ker je vpliv delne povezanosti razpok z agregatnimi zrni tudi pri tem elementu zanemarljiv, numerično analizo izvedemo le za model idealne razpoke.

V primeru analize z upoštevanjem izhodiščne sprjemne trdnosti stika oziroma z 20% reducirano trdnostjo je računsko določena natezna nosilnost elementa primerljiva z izmerjeno, porušitev elementa pa je posledica plastifikacije vzdolžne armature.

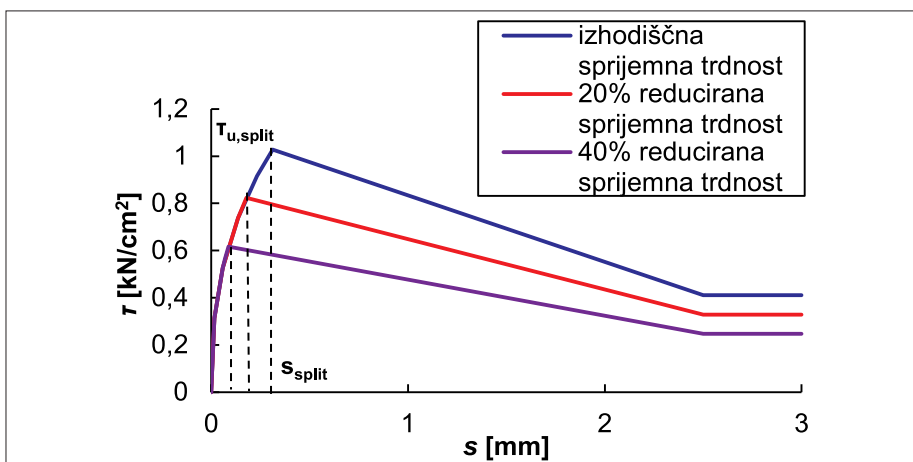
Na sliki 31 prikazujemo primerjavo eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje širine razpoke, ki se formira na začetku viličastega preklpa, tj. znotraj merilnega območja deformetrov 11 in 12. Ugotovimo, da so rezultati numerične analize primerljivi z rezultati meritev. Tako kot pri elementu z viličastim preklpom na dolžini 10φ in dodanimi stremeni, ki smo ga analizirali v prejšnjem razdelku, tudi pri tem elementu prva razpoka v numerični simulaciji nastane znotraj merilnega območja deformetra, medtem ko se je prva razpoka med preizkusom pojavila zunaj merilnega ob-



Slika 28 • Primerjava računsko in eksperimentalno določene razporeditve razpok vzdolž elementa z viličastim preklpom vzdolžne armature na dolžini 10 $\phi$  in dodanimi stremeni pri največji natezni obremenitvi.



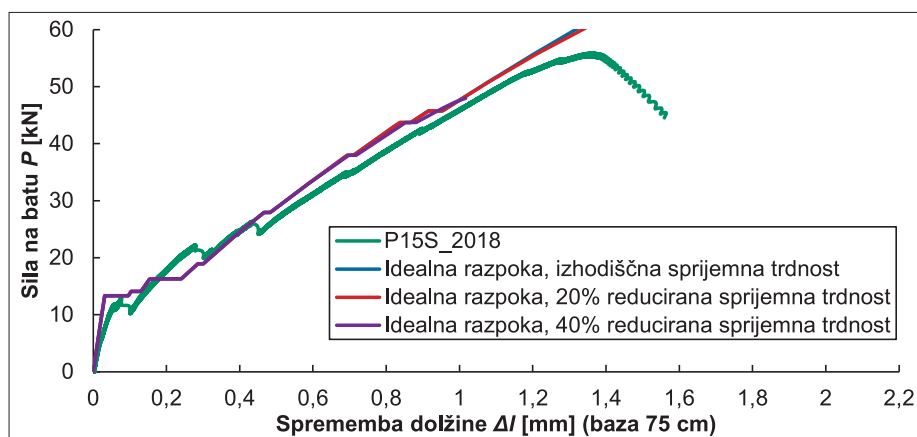
Slika 32 • Primerjava računsko in eksperimentalno določene razporeditve razpok vzdolž elementa z viličastim preklpom vzdolžne armature na dolžini 15 $\phi$  in dodanimi stremeni pri največji natezni obremenitvi.



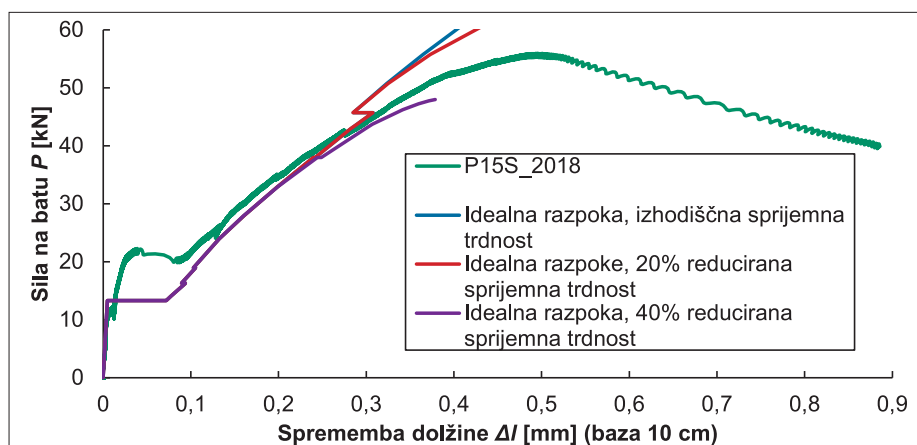
Slika 29 • Izhodiščni (Fib, 2013) ter dva modificirana konstitucijska zakona stika za element z viličastim preklpom vzdolžne armature na dolžini 15 $\phi$  in dodanimi stremeni.

močja. Zaradi tega lahko na sliki 31 opazimo odstopanje med izračunano in izmerjeno silo, pri kateri nastane obravnavana razpoka.

Na sliki 32 prikazemo še primerjavo med računsko (upoštevamo 20% reducirano sprijemno trdnostjo stika) in eksperimentalno določeno razporeditvijo razpok v stabiliziranem stanju. Ugotovimo, da je računsko določeno število prečnih razpok v primerjavi z eksperimentalnimi opažanji nekoliko večje. V računu se pojavi 9 prečnih razpok, pri čemer jih je 8 razporejenih na mestu stremen, ena pa med stremenoma, med preizkusom pa smo zabeležili 6 razpok. Sočasno so se med preizkusom na območju preklpa pojavile tudi vzdolžne cepilne razpoke, ki pa jih z uporabljenim numeričnim modelom žal ne moremo simulirati.



Slika 30 • Primerjava eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje dolžine elementa z viličastim preklpom vzdolžne armature na dolžini 15φ in dodanimi stremeni.



Slika 31 • Primerjava eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za spreminjanje širine izbrane razpoke pri elementu z viličastim preklpom vzdolžne armature na dolžini 15φ in dodanimi stremeni.

## 5 • SKLEP

V članku smo se ukvarjali z analizo pojavnosti in širjenja razpok pri armiranobetonskem elementu, ki je izpostavljen kratkotrajni natezni obremenitvi. Analiza je bila razdeljena na eksperimentalni in teoretični del.

V okviru eksperimentalnega dela smo zasnovali in izdelali tri armiranobetonске preizkušance z dolžino 80 cm in s pravokotnim prečnim prerezom z dimenzijami 10,8/7,2 cm. Pri enem preizkušancu smo vzdolžno armaturno palico vodili kontinuirno, pri drugih dveh pa smo na sredini dolžine preizkušanca izvedli stikovanje armature s prekrivanjem. Zaradi zagotavljanja čim bolj simetričnega vnašanja natezne obremenitve v preizkušane, smo stikovanje izvedli v obliki t. i. viličastega preklpa. Pri tako izvedenem prekrivanju

se obremenitev prenaša z ene palice na drugi dve, to pomeni, da zadošča že polovična dolžina prekrivanja. Izbrali smo dolžini prekrivanja 10φ in 15φ. Slednja okvirno ustreza projektni dolžini prekrivanja skladno s standardom SIST EN 1992-1-1:2005. S krajšo dolžino preklpa pa smo simulirali razpokanje elementov, ki ne izpolnjujejo zahtev iz trenutno veljavnih standardov. V vse tri elemente smo dodatno vgradili tudi stremensko armaturo, s katero smo želeli preprečiti pojav razcepljanja betonskega ovoja zaradi nezadostne debeline krovne plasti. Količino stremen smo določili skladno s priporočili iz tuje strokovne literature. Pri preizkušancu s kontinuirno vzdolžno armaturo (KS\_2018) so stremena imela vpliv predvsem na lego in

zaporedje pojavljanja razpok ter na njihovo število v stabiliziranem stanju (na mestu stremen je bil betonski prerez oslabiljen), medtem ko je bil način porušitve preizkušanca posledica plastifikacije vzdolžne armature. Pri preizkušancu s stikovanjem vzdolžne armature na dolžini 10φ (P10S\_2018) je bila kljub vgrajenim stremenom porušitev posledica razcepljanja betona na območju preklpa in odpovedi stika med armaturnimi palicami in betonom. S podaljšanjem preklpa na dolžino 15φ (P15S\_2018) pa so stremena opravila svojo nalogo, tako da se je preizkušanec porušil zaradi plastifikacije vzdolžne armature. Cepilne razpoke so se namreč pojavile šele po plastifikaciji vzdolžne armature. Lahko zaključimo, da pri krajšem preklpu (10φ) količina vgrajenih stremen v območju preklpa ni bila zadostna oziroma tako kratek preklp ni omogočal učinkovitega prenosa sile z ene palice na drugi dve, zato se je preizkušanec



porušil zaradi razcepljanja betonskega ovoja v območju preklopa. Tako pri njem nismo dosegli faze stabiliziranih razpok, ko pri večanju natezних obremenitev nove prečne razpoke več ne nastajajo, povečuje se le njihova širina. V teoretičnem delu analize smo z numeričnim modelom, ki je nastal v okviru raziskovalnega dela na Katedri za masivne in lesene konstrukcije in Katedri za mehaniko na UL FGG, simulirali nastanek in širjenje razpok pri analiziranih armiranobetonskih preizkušanjih. Na podlagi primerjave med rezultati eksperimentalne in numerične analize smo ugotovili, da razviti nu-

merični model omogoča učinkovito in dovolj natančno analizo nastanka in širjenja prečnih razpok pri armiranobetonskem elementu, ki je izpostavljen kratkotrajni natezni obremenitvi. Z modelom lahko tudi dovolj natančno ocenimo natezno nosilnost elementa. Žal pa razviti numerični model ne omogoča simulacije nastanka vzdolžnih cepilnih razpok. Njihov vpliv na natezno nosilnost elementa smo lahko upoštevali le posredno, in sicer z modifikacijo konstitucijskega zakona stika med armaturno palico in okoliškim betonom. Dodatno smo z numeričnim modelom upoštevali tudi vpliv

delne povezanosti betonskega ovoja ob razpoki z agregatnimi zrni. Ugotovili smo, da je ta vpliv majhen, saj so razpoke že ob nastanku relativno široke.

V prihodnje nameravamo eksperimentalne in numerične simulacije razpokanosti izvesti še za druge dolžine viličastega preklopa oziroma pri spremenjeni količini in razporeditvi stremenske armature, sočasno pa nameravamo proučevati razpokanost preizkušanca, ki bo imel namesto vzdolžne klasične jeklene armature vgrajeno nerjavno armaturo iz bazaltnih vlaken.

## 6 • ZAHVALA

Predstavljeni rezultati so pridobljeni v sklopu dela programskih skupin Gradbene konstrukcije in gradbena fizika (P2-0158) ter Mehanika konstrukcij (P2-0260), ki ju financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Za finančno pomoč se ji iskreno zahvaljujemo.

## 7 • LITERATURA

- Abrishami H. H., Mitchell D., Influence of splitting cracks on tension stiffening. *ACI Structural Journal* 93: 703–710, 1996.
- Bažant Z. P., Pijaudier-Cabot G., Measurement of characteristic length of nonlocal continuum, *Journal of Engineering Mechanics*, 115: 755–767, 1989.
- Canbay E., Frosch R.J., Bond Strength of Lap-Spliced Bars, *ACI Structural Journal*, 102: 605–614, 2005.
- Carpinteri A., Minimum reinforcement in concrete beams. Oxford, Elsevier Science Ltd., 1999.
- CEB-FIP Model Code 1990: Design Codes, Comité Euro-International du Beton and Federation International de la Précontrainte, London: Thomas Telford, 1993.
- Cerar B., Bratina S., Saje D., Razpokanost natezno obremenjenega armiranobetonskega elementa, Zbornik. 39. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, november 2017, 191–198, 2017.
- Cerioni R., Bernardi P., Michelini E., Mordini A., A general 3D approach for the analysis of multi-axial fracture behavior of reinforced concrete elements, *Engineering Fracture Mechanics*, 78:1784–1793, 2011.
- Chan H. C., Cheung Y. K., Huang Y. P., Crack analysis of reinforced concrete tension members, *Journal of Structural Engineering*, 118: 2118–2132, 1992.
- Fib, International Federation for Structural Concrete, fib Model Code for Concrete Structures 2010, Berlin: Ernest & Sohn GmbH & Co. KG., 2013.
- Hassan M. N., Feldman L. R., Behavior of Lap-Spliced Plain Steel Bars, *ACI Structural Journal*, 109:235–243, 2012.
- Kralj U., Nastanek in širjenje razpok pri natezno obremenjenem armiranobetonskem elementu, Magistrsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, 2018.
- Lagier F., Massicotte B., Charron J. P., Experimental investigation of bond stress distribution and bond strength in unconfined UHPFRC lap splices under direct tension, *Cement and Concrete Composites*, 74:26–38, 2016.
- Lee J. K., Bonding Behavior of Lap-spliced Reinforcing Bars Embedded in Ultra-High Strength Concrete with Steel Fibers, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20:273–281, 2016.
- Martuljški slapovi, [http://krajci.eu/slovenija/kranjska\\_gora\\_z\\_okolico/slo](http://krajci.eu/slovenija/kranjska_gora_z_okolico/slo), pridobljeno 15. 8. 2018.
- Ponte Morandi, <https://img.ilgcdn.com/sites/default/files/foto/2018/08/17/1534502661-ponte-morandi-2017.jpg>, pridobljeno 21. 8. 2020.
- Saje D., Planinc I., Bratina S., Vpliv stikovanja armaturnih palic s prekrivanjem na togost razpokanega nateznega armiranobetonskega elementa: numerični model, *Gradbeni vestnik* 66: 97–108, 2017.
- SIST, SIST EN 1992–1–1:2005, Evrokod 2, Projektiranje betonskih konstrukcij–Del 1–1, Splošna pravila in pravila za stavbe, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2005.
- SIST, SIST 1026:2016. Beton – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2016.
- Wollrab E., Kulkarni S. M., Ouyang C., Shah, S. P., Response of reinforced concrete panels under uniaxial tension, *ACI Structural Journal* 93: 648–657, 1996.
- Wu H. Q., Gilbert R. I., An experimental study of tension stiffening in reinforced concrete members under short-term and long-term loads, UNICIV Report No. R-449, Sydney, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, 2008.