Primljen / Received: 20.3.2020.
Ispravljen / Corrected: 13.8.2020.
Prihvaćen / Accepted: 25.8.2020.
Dostupno online / Available online: 10.3.2021.

Eksperimentalno istraživanje svojstava oštećenja na spoju armature i betona nakon mikrovalnog zagrijavanja

Autori:

Dr.sc. **Yi Wu**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Xi'an za znanost i tehnologiju, Kina
Arhitektonsko-građevinski fakultet
wuy.0912@foxmail.com

Prof.dr.sc. **Jun Dai**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Xi'an za znanost i tehnologiju, Kina
Arhitektonsko-građevinski fakultet
1098437146@qq.com

Dongshuo Li, dipl.ing.građ.
Sveučilište Xi'an za znanost i tehnologiju, Kina
Arhitektonsko-građevinski fakultet
1095810940@qq.com

Bailei Shi, dipl.ing.građ.
Sveučilište Xi'an za znanost i tehnologiju, Kina
Arhitektonsko-građevinski fakultet
bailei.shi.0519@foxmail.com
Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Yi Wu, Jun Dai, Dongshuo Li, Bailei Shi

Eksperimentalno istraživanje svojstava oštećenja na spoju armature i betona nakon mikrovalnog zagrijavanja

Povećanjem urbanog građevnog otpada s ciljem da se nađe učinkovita metoda mehaničke regeneracije armiranog betona uz pomoć mikrovalnog zračenja, u ovom se radu analiziraju svojstva termičkog oštećenja na kontaktu spoja između čelične rebraste armature i betona nakon različitih mikrovalnih zračenja. Rezultati su pokazali da je povećanjem snage mikrovalnog zračenja došlo do promjene sloma uzorka – umjesto sloma cijepanjem, nastao je slom izvlačenjem armature, a krivulja proklizavanja spoja, kao i odgovarajuće jednadžbe prilagodbe odredile su se nakon različitih razina mikrovalnog zračenja. Analizom karakterističnih točaka krivulje, određeno je da je 3500 W prihvatljiva snaga zračenja.

Ključne riječi:
mikrovalno zračenje, armirani beton, oštećenje, svojstva sloma, krivulja proklizavanja spoja

Research Paper

Yi Wu, Jun Dai, Dongshuo Li, Bailei Shi

An experimental study of damage characteristics at bond of RC after microwave heating

With an increase in urban construction waste, and in order to find an effective method of microwave-assisted mechanical RC regeneration, thermal damage characteristics of the interfacial bond between steel rebar and concrete after different microwave irradiations are analysed in this paper. The results show that, with an increase in microwave power, the overall failure mode of the specimen changes from splitting failure to pull-out failure. Bond slip curves and the corresponding fitting equations were obtained at various levels of microwave irradiation. By analysing characteristic points of the curve, 3500W was determined as a reasonable irradiation power.

Key words:
microwave irradiation, reinforced concrete, damage, failure characteristics, bond slip curve

Vorherige Mitteilung

Yi Wu, Jun Dai, Dongshuo Li, Bailei Shi

Verlängerung der Verwendbarkeit von Schienen bei Schäden des Schienenkopfes

Während ihrer Verwendung sind Schienen aufgrund von Biegung den Prozessen von Verschleiß, Korrosion und Kontaktermüdung ausgesetzt. Infolge dieser Prozesse treten verschiedene Schäden und Mängeln an den Schienen auf. Die weitere Verwendbarkeit der Schienen hängt von der Größe, Position und Richtung des Schadens ab. In dieser Arbeit werden die maximal zulässigen Werte der Rissgröße nach der Finite-Elemente-Methode berechnet. Die Richtung der Rissebene wurde in Bezug auf die Ebene der Rad-Schiene-Kontaktfläche analysiert. Die Abhängigkeit des Spannungsgrößenfaktors von der Rissoberfläche wurde bestimmt. Dies ermöglicht die weitere Verwendung beschädigter Schienen und die sichere Fortsetzung des Betriebs auf Eisenbahnschienen mit weniger Aktivität.

Schlüsselwörter:
Eisenbahnschiene, Schienenbeschädigung, Finite-Elemente-Methode, Riss

1. Uvod

Zbog ubrzanog procesa urbanizacije u Kini, potrebno je demolirati velik broj armiranih betonskih konstrukcija svake godine kako bi se dovršila naizmjenična obnova novih i starih zgrada [1, 2]. Nedostaci tradicionalnih metoda rušenja, poput velike buke, prašine i neučinkovitosti tijekom rušenja, sve su više ograničavali njihovu upotrebu u gradovima [3]. Mehaničko rušenje uz pomoć mikrovalnog zračenja može unaprijed oslabiti spoj između čelične rebraste armature i betona [4] te tako postići učinkovito i za okoliš prihvatljivo rješenje rušenja gradskih građevina. Iz tog razloga potrebno je istražiti oštećenje prianjanja armature i betona kao posljedice mikrovalnog zračenja. Dobra veza između čelične armature i betona ključna je za armiranobetonske elemente koji prenose vanjsko opterećenje [5]. Velik utjecaj na svojstva spoja između armature i betona ima izlaganje armiranobetonske konstrukcije visokim temperaturama [6]. Mnogi su znanstvenici dosad eksperimentalno istraživali svojstva spoja između čelične armature i betona te predložili različite eksperimentalne modele i krivulje proklizavanja spoja pod različitim uvjetima opterećenja. Tako se u sklopu jednog istraživanja primjenjivao eksperimentalni program kako bi se odredio učinak visokih temperatura na modul posmika na kontaktu između betona i armature [7]. U tom su se istraživanju koristili rezultati ispitivanja izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka u kombinaciji s analitičkim modelom radi izračuna modula posmika spoja. Analitički se model temeljio na fizikalnom prikazu ispitivanja izvlačenjem armature iz uzorka uz aproksimaciju linearno-elastičng ponašanja čelika i betona.

Lu [8] je napravio uzorak armiranog betona veličine 100 mm × 100 mm × 10·d mm (d je promjer čelične šipke) te na njemu proveo ispitivanje izvlačenjem armature iz uzorka. Rezultati ispitivanja pokazali su da porastom čvrstoće betona raste i čvrstoća spoja. Granična vlačna čvrstoća povećala se s porastom promjera čelične šipke. Čvrstoća spoja između čelične šipke i betona povećala se nakon što se uzorak izložio velikoj temperaturi od 300 °C u odnosu na slučaj kada se uzorak ne izlaže visokim temperaturama. Razlog je što cement u uzorku nije potpuno hidratizirao, a prikladna temperatura ubrzala je hidrataciju cementa u betonu, pa se je čvrstoća spoja povećala. Kako bi se ispitao učinak povećanja temperature na ponašanje spoja između čelične šipke i betona ograničenog stremenima, Liu [9] je proveo ispitivanje izvlačenjem armature iz uzorka, a može se uočiti kako svi uzorci isključuju slučaj oštećenja zbog ograničenja uzorka stremenima. Nadalje, registriran je trend smanjenja čvrstoće spoja porastom temperature. Čvrstoća spoja se smanjila za 65 % kada je uzorak izložen temperaturi od 700 °C u odnosu na slučaj kada nije izložen visokim temperaturama. Naposljetku, prikazana je statistički određena krivulja proklizavanja spoja uzimajući u obzir utjecaj temperature. Svojstva spoja između armaturne šipke i betona na temperaturi između 20 °C i 165 °C analizirana su ispitivanjem izvlačenja armature iz betonskog uzorka, uzimajući pritom u obzir parametre poput temperature, promjera šipke, debljine zaštitnog sloja, duljine sidrenja te granice popuštanja armature [10].

Eksperimentalno ispitivanje je pokazalo da svojstva spoja znatno ovise o temperaturi, odnosno da se čvrstoća spoja povećava linearno sa smanjenjem temperature postižući maksimum između -80 °C i -120 °C.

Osim toga, koeficijent čvrstoće spoja se smanjio linearno s relativnom debljinom zaštitnog sloja. U konačnici, drugi parametri poput duljine sidrenja i granice popuštanja čelika imali su neznatan utjecaj. Chiang [11] je proučavao čvrstoću spoja između čelične šipke i betona pri različitim temperaturama te dobio podrobnije informacije o odnosu između čvrstoće betona, temperature i vremena zagrijavanja. Hasan [12] je kvantitativno analizirao odnos proklizavanja spoja između armature i betona uzimajući pritom u obzir čimbenike poput debljine zaštitnog sloja, čvrstoće i temperature betona. Haddad [13] je odredio utjecaj oblika različitih površina i parametara ojačanja na zakonitost degradacije čvrstoće spoja armiranog betona pri visokoj temperaturi na temelju vlačnog ispitivanja u oba smjera. Katz [14] je istražio utjecaj visoke temperature na spoj između polimernih materijala ojačanih vlaknima (FRP), armaturnih šipki i betona. Spoj je pokazao znatno smanjenje čvrstoće od 80 % do 90 % pri relativno niskoj temperaturi (do 200 °C), popraćeno promjenama u ponašanju odnosa opterećenja i proklizavanja prilikom ispitivanja izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka. Razvijen je semiempirički model radi prikazivanja odnosa smanjenja čvrstoće spoja o povećanju temperature. U model su uvedeni različiti parametri šipki koje su se ispitivale tijekom izvlačenja pri različitim temperaturama. Krivulje rezultata koje prikazuju odnos spoja i temperature pokazale su dobro poklapanje s rezultatima ispitivanja. Yang [15] je proveo ispitivanje vlačne čvrstoće čelične šipke pri visokoj temperaturi, ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem standardne kocke pri visokoj temperaturi, ispitivanje temperaturnih polja te ispitivanje izvlačenja armature iz armiranobetonskog uzorka. Rezultati su pokazali da je čvrstoća rebraste armature nakon izloženosti visokoj temperaturi pokazala malu promjenu ispod 400 °C, vlačna čvrstoća betona cijepanjem smanjila se linearno s promjenom temperature, a trend varijacije čvrstoće spoja pod visokom temperaturom bio je sličan vlačnoj čvrstoći betona. Rezultati su pokazali dva različita odnosa između krutosti spoja i temperature i to za proklizavanje od 0,015 mm. Čvrstoća spoja ojačanog betona mjerila se izvodeći ispitivanja izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka pri različitim temperaturama te različitim načinima hlađenja nakon visoke temperature, a analizirali su se granična čvrstoća spoja i proklizavanje armiranobetonskog spoja [16]. Rezultati su pokazali da se čvrstoća spoja postupno smanjivala s porastom temperature, te da se krajnje proklizavanje također postupno smanjivalo. Uporabom modificiranih ispitivanja izvlačenja [17] proučeni su učinci svojstava materijala na spoj između armaturne šipke i betona izloženog visokim temperaturama. Eksperimentalni rezultati pokazali su da se s porastom temperature smanjuje rezidualna čvrstoća na spoju između armaturne šipke i betona. Proučavao se prvi ozbiljniji gubitak

čvrstoće za razred materijala S220a pri rasponu od 200 °C do 400 °C i za razred materijala S420a i S500a pri rasponu od 400 °C do 600 °C. Rezidualna tlačna čvrstoća je odgovarala rezidualnoj čvrstoći spoja S420a i S500a, a rezidualna savojna čvrstoća odgovarala je rezidualnoj čvrstoći spoja s razredom materijala S220a. Ukratko, iako postoje mnoga istraživanja o rušenju armiranobetonskih konstrukcija, i dalje postoje mnogi nedostaci koji otežavaju njihovu primjenu [18-21]. Oprema za rušenje uz pomoć mikrovalnog zračenja, kao sustavna metoda rušenja i demontiranja, nije primjenjiva samo na lom kamenja [22, 23] nego je primjenjiva i za rušenje u uskim urbanim područjima te posebno ojačanih betonskih konstrukcija. Kako bi se istražila izvedba spoja armiranog betona pri visokoj temperaturi, većina se uzoraka peče u električnim pećima sa sporom brzinom grijanja i niskim stupnjem temperature. Tako dobiveni rezultati se uglavnom primjenjuju u zaštiti od požara [24]. Iz tog razloga, a radi da se tehnologija mehaničkog rušenja armiranog betona uz pomoć mikrovalnog zračenja proširi na inženjersku upotrebu, potrebno je provesti detaljnu analizu oštećenja spoja i svojstva sloma između čelične armature i betona pod utjecajem mikrovalnog zračenja u početnoj etapi istraživanja. U pogledu navedenih problema, a na temelju prethodnih istraživanja, ovaj rad se fokusira na armirani beton kao predmet istraživanja, provodi mikrovalno zračenje i ispitivanje izvlačenjem armature iz standardnih armiranobetonskih uzoraka te proučava slabljenje čvrstoće spoja i svojstva sloma armiranobetonskih uzoraka pri mikrovalnom zračenju.

2. Temeljna načela mikrovalnog zagrijavanja i model oštećenja

Beton se sastoji od prirodnog agregata i morta. Kako se agregat i mort razlikuju u elektromagnetskim svojstvima i mikrovalnoj indukciji, temperatura u betonu neko je vrijeme nejednaka nakon izlaganja mikrovalnom zračenju, a temperatura u mortu brže se povećava nego u prirodnom agregatu. Razlika u temperaturi izazvat će temperaturno naprezanje u betonu, pogotovo na granici između morta i prirodnog agregata. Postupno povećanje izloženosti mikrovalnom zračenju i temperaturnom naprezanju rezultira novim pukotinama u betonu, a spoj između morta i prirodnog agregata također počinje slabjeti. Osim toga, unutarnje isparavanje vode također oblikuje i povećava pukotine u betonu. Gubitak snage mikrovalnog zračenja po jedinici volumena u betonskoj okolini P_d prikazan je izrazom (1) [25]:

$$P_d = 2\pi f \varepsilon' \varepsilon'' M^2 \tag{1}$$

gdje je P_d gustoća rasipanja mikrovalne snage, f je frekvencija, ε' je koeficijent vakuuma, ε'' je dielektrični faktor gubitka, a M je dielektrična čvrstoća.

U skladu s prosječnom gustoćom snage, brzina zagrijavanja minerala u betonu izloženom mikrovalnom zračenju prikazana je izrazom (2):

$$C_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = P_d + \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{2}$$

gdje je c_p specifični toplinski kapacitet, ρ_0 je gustoća minerala, a k je koeficijent toplinske provodljivosti.

Pretpostavlja se da izvedba na kontaktu spoja uključuje parametre B – u stanju koje nema gubitaka i B' - u oštećenom stanju [26], a varijabla oštećenja D prikazana je izrazom (3):

$$D = \frac{B - B'}{B} \tag{3}$$

Kada je $B = B'$, $D = 0$, odnosno nema oštećenja na kontaktu materijala. Kada je $B' = 0$, $D = 1$, odnosno kontakt spoja materijala u potpunosti je oštećen. Kada je $0 < D < 1$, kontakt spoja materijala oštećen je u različitim stupnjevima. Naprezanje spoja izražava se kao τ, proklizavanje se izražava kao S, pa slijedi (4):

$$\tau = B' S \tag{4}$$

U kombinaciji s načelom ekvivalentnog naprezanja, pretpostavlja se da je količina proklizavanja koja odgovara Cauchyjevom tenzoru naprezanja na oštećenom materijalu spoja jednaka količini proklizavanja koja odgovara efektivnom naprezanju spoja na neoštećenom materijalu [27]. Može se dobiti izraz (5):

$$S = \frac{\tau'}{B} = \frac{\tau}{B'} \tag{5}$$

Stoga se izraz (6) može dobiti spajanjem s izrazom (3):

$$S = \frac{\tau}{B(1+D)} \tag{6}$$

Prema izrazima (3), (4), (5) i (6), konstitutivni model proklizavanja spoja koji uzima u obzir oštećenje je sljedeći:

$$\tau = \begin{cases} S \times B & (0 < S < S') \\ S \times B' & (S' < S) \end{cases} \tag{7}$$

Nadalje, izraz nastanka oštećenja spoja prikazan je izrazom (8):

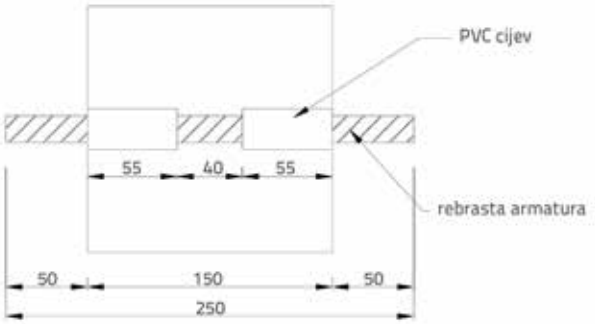
$$D = \begin{cases} 0 & (0 < S < S') \\ 1 - \left(\frac{\tau}{S}\right) / B & (S' < S) \end{cases} \tag{8}$$

Proklizavanje na svakoj točki odgovara početnoj vrijednosti nagiba B na krivulji proklizavanja armiranog betona, a D - vrijednost proklizavanja na svakoj točki može se postići. Regresijskom analizom dobiva se izraz nastanka oštećenja tako što se prilagođava relativno proklizavanje i količina oštećenja na svakoj točki, a uzimajući u obzir oštećenje, može se dobiti konstitutivni izraz proklizavanja spoja.

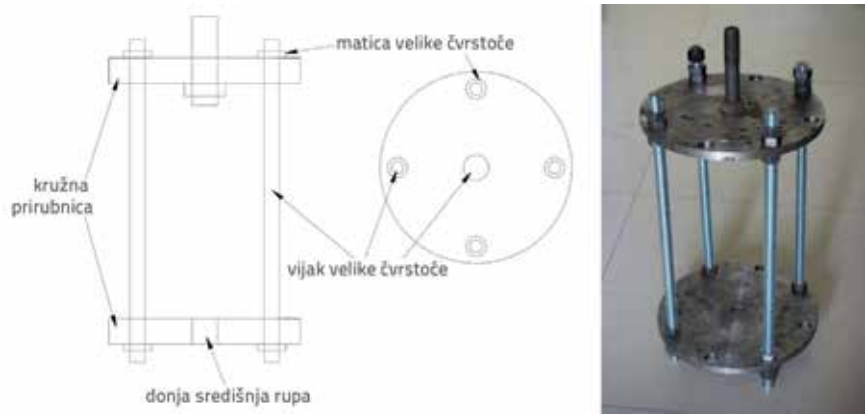
3. Plan izvedbe eksperimenta i priprema

3.1. Izvedba eksperimenta

Ispitivanje izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka primjenjivano je u ovom istraživanju prema "Normi za metodu ispitivanja betonskih konstrukcija" (*Standard for Test Method of Concrete Structures* (GB50152-92)) iz Kine. Dimenzije uzorka bile su 150 mm × 150 mm × 150 mm, uzorak je činio obični beton čvrstoće koja pripada razredu C30 i vruće oblikovane rebraste šipke promjera 16 mm s granicom popuštanja od 400 MPa. Uzimajući u obzir stvarnu veličinu mikrovalne pećnice, određena je duljina vruće oblikovanih čeličnih šipki od 250 mm. Duljina spoja između armiranog betona u uzorku bila je 2,5d (d je promjer rebraste čelične armature), tj. 40 mm. Kako bi se otklonila pojava koncentracije naprezanja na krajevima uzorka tijekom procesa opterećenja u ispitivanju izvlačenjem, dva profila PVC cijevi stavljena su na krajeve čelične rebraste armature i zalijepljena se pjenastim punjenjem kako bi se oblikovalo 10 mm profila koji se ne vežu, a duljina je svakog profila PVC cijevi bila 55 mm čiji je unutarnji promjer iznosio 25 mm. Spoj između čelične rebraste armature i betona nalazio se na srednjem dijelu uzoraka kako bi postigao bolji slom na kontaktu spoja armiranog betona na toj dubini. Slika 1. prikazuje veličinu uzorka, čeličnu rebrastu armaturu i izgled PVC cijevi.



Slika 1. Konstrukcijske dimenzije uzorka



Slika 2. Dijagram učvršćenja pri ispitivanju izvlačenjem

3.2. Materijal i priprema učvršćenja tijekom izvlačenja

Razred čvrstoće betona oblikovanog u ovom eksperimentu bio je C30, cement je pripadao razredu 42.5 i bio je obični portland cement koji su proizveli *Tongchuan Shengwei Building Materials* co. LTD. iz kineske pokrajine Shaanxi. Čisti se agregat dobio drobljenjem kamena vapnenca te je nastao pijesak s modulom finoće koji iznosi 3,82. Krupni je agregat bio trajni šljunak kakvoće 5 mm do 20 mm, s omjerom gradacije koja iznosi 4,5 : 3,5 : 2, a volumna težina bila je 1680,4 kg/m^3. Čelična rebrasta armatura je vrste HRB400 s promjerom 16 mm kupljena na tržnici čelika Kraljevske palače u Xi'anu u Kini. Tablice 1. i 2. prikazuju parametre cementa i č.elične rebraste armature.

Učvršćivanje pri izvlačenju u ovom eksperimentu prilagođeno je cijeni čelika Kraljevske palače, učvršćenje ima dvije protupožarne prirubnice DN150 koje su velike čvrstoće, četiri dugačka vijka velike čvrstoće, jedan kratak vijak i nekoliko matica. Slika 2. prikazuje sredinu prstenaste tvrde prirubnice koju treba probiti.

3.3. Lijevanje i stvrdnjavanje uzorka

Beton oblikovan u ovom eksperimentu pripada razredu čvrstoće C30. Prema kineskoj "specifikaciji za omjer mješavine običnog betona" (JGJ55-2011), a kako bi se isključile razlike u propusnosti između uzoraka, prihvaćena je mješavina betona za adaptiranje

Tablica 1. Fizikalni i mehanički pokazatelji cementa

Razred	Finoća [%]	Posebno površinsko područje [cm^2/g]	Težina [kg/m^3]	Vrijeme vezanja [min]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Čvrstoća pri savijanju [MPa]	Gubici pri paljenju [%]	Udio vode [%]
P.O 42.5	4,7	3460	3043	142	229	49,4	2,3	0,38

Tablica 2. Mehanička svojstva čelične rebraste armature

Specifikacije rebraste čelične armature	Nominalni promjer [mm]	Nominalno područje poprečnog presjeka [mm^2]	Granica popuštanja [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Istezljivost nakon loma [%]	Ukupna istezljivost pri najvećoj nanesenoj sili [%]
HRB400	16	201,06	473,86	639,07	27,9	12,8

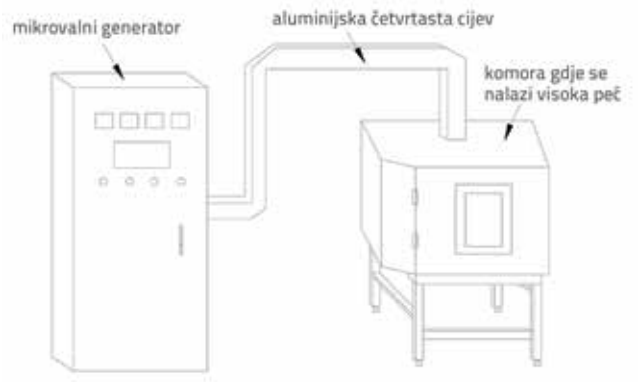
u omjeru 1 : 0,46 : 1,29 : 1,93 za odnos cementa, vode, pijeska i kamena (omjer težine). Na tržnici čelika Kraljevske palače obrađena je čelična rebrasta armatura tako da svaki od ukupno 30 profila ima 250 mm, a PVC cijev je obrađena tako da svaki od 60 profila ima 55 mm. Kalup za ispitivanje je plastična kocka veličine 150 mm koja se može odvojiti. Zbog posebnih zahtjeva pri dodavanju čelične rebraste armature u uzorak, bušile su se rupe promjera 24 mm u sredini simetričnih strana kalupa za ispitivanje. Prije izrade uzorka, trebalo je unaprijed primijeniti odvajač na ispitnom kalupu, a beton se pripremao miješalicom JG3036-96 Single-shaft Forced Action.

Pod standardnim uvjetima pri temperaturi 20 °C ±2 °C i relativnoj vlažnosti većoj od 95 %, a prema kineskom "propisu za kvalitetno odobravanje betonske konstrukcije" (GB50204-2015), dan nakon lijevanja skinut je kalup, a pod istim su uvjetima uzorci premazani i poprskani vodom kako bi se stvrdnjavali 28 dana. Nakon stvrdnjavanja, a prije uporabe, uzorci su se sušili na zraku dok nisu postigli postojanu težinu pri sobnoj temperaturi radi da se smanji razlika u sadržaju vlage između uzoraka i da se omoguće uvjeti za postizanje prikladnih parametara mikrovalnog zračenja. Izrađeno je ukupno 30 uzoraka armiranog betona.

Slika 3. Uzorak za ispitivanje spoja izvlačenjem armature iz betona

4. Određivanje parametara zagrijavanja u eksperimentu

Slika 4. prikazuje mikrovalni generator koji se koristi u eksperimentu. Proizvela ga je kineska tvornica *Nanjing Aorun Microwave*, a riječ je o ORW10SY-3T tipu mikrovalne pećnice velike snage. Mikrovalna pećnica radi pri naponu od 380 V i frekvenciji rada od 2450 ± 10 MHz, s rasponom snage između 0 kW i 10 kW. Sustav mikrovalnog zračenja ima mikrovalni generator i komoru u kojoj se nalazi visoka peć (duljina 1050 mm, širina 1050 mm i visina 1000 mm), a ta su dva dijela povezana aluminijskom četvrtastom cijevi. Mikroval koji je proizveo mikrovalni generator ulazi u komoru gdje je visoka peć preko aluminijske četvrtaste cijevi, te se mikroval iznova odbija u komori gdje je visoka metalna peć, te probija beton kako bi postigao homogenije i brže zagrijavanje. Samostojeća udaljenost određuje se nakon što je uzorak vraćen u komoru gdje se nalazi visoka peć. S obzirom na to, ovaj eksperiment ne uzima u obzir utjecaj udaljenosti mikrovalnog zračenja na rezultate, što omogućuje uvjete uz pomoć kojih se postižu prikladni parametri mikrovalnog zračenja.



Slika 4. Skica uređaja za mikrovalno zračenje velike snage

4.1. Preliminarni eksperiment

Šest kocaka duljine stranice 100 mm određeno je za uzorke običnog betona. Koristio se beton u istim šaržama kao i beton u armiranobetonskim uzorcima te se stvrdnjavao tijekom 28 dana pod istim uvjetima. Slika 5. prikazuje oblikovane uzorke.

Slika 5. Betonski uzorci u preliminarnom eksperimentu

S obzirom na raznolikost i složenost kombinacije snage mikrovalnog zračenja i vremena, ravnomjerno se ograničilo vrijeme mikrovalnog zračenja na 5 minuta u preliminarnom i naknadnom eksperimentu, a prihvatljiv raspon snage određena je na temelju mikrovalnih zračenja različite snage. U preliminarnom eksperimentu mikroval snage 3000 W, 4000 W, 5000 W i 6000 W primijenjen je da se nasumično ozrače četiri uzorka običnog betona.

Rezultat je pokazao pojavu pukotine u uzorku običnog betona kad je mikroval imao snagu 6000 W i kad je vrijeme zračenja bilo minutu i 16 sekundi.

Nakon toga, preostala dva uzorka betona zračila su se mikrovalom snage 6000 W, a otkriveno je da su uzorci betona pukli nakon dvije minute i 40 sekundi, odnosno četiri minute i 11 sekundi.

4.2. Određivanje parametra

Iz svega prije navedenoga može se odrediti kritična vrijednost snage zračenja 5000 W, pod eksperimentalnim uvjetima opisanima u ovom radu, kad mikrovalno zračenje neprekidno traje 5 minuta. Zato se odredilo mikrovalno zračenje od 5 minuta snage između 0 W i 5000 W kako bi se zagrijali uzorci u naknadnom eksperimentu.

4.3. Eksperimentalni proces

Ispitivanje izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka provedeno je uz pomoć inteligentnog dinamometra RFP-09 600 kN, proizvođača *Tianshui Hongshan Testing Machine* Co., ltd., uz pomoć navedenog učvršćenja prilikom izvlačenja. Slika 6. prikazuje uređaj za ispitivanje. Podešavanjem kontrole nanesena je sila pri brzini od 0,2 kN/s, a sila povlačenja i pomak postavljeni su na nulu prije nanošenja te ih je očitao senzor za ispitivanje. Položaji uzorka i učvršćivača prikazani su na slici 6.

Slika 6. Dijagram ispitne opreme

Prema parametrima raspona mikrovalnog zračenja izmjerenih u uvodnom eksperimentu, u ispitivanju izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka određeno je 5 minuta za mikrovalno zračenje, a snaga je zračenja bila 0 W, 700 W, 1000 W, 1500 W, 2000 W, 2500 W, 3000 W, 3500 W, 4000 W, odnosno 5000 W. Uzorci su podijeljeni u 10 skupina s tri uzorka u svakoj. Uzorci svake skupine nakon mikrovalnog zračenja izvađeni su iz komore u kojoj je visoka peć i ostavljeni na sobnoj temperaturi da se obavi ispitivanje izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka. Tablica 3. prikazuje oznake uzoraka.

5. Rezultati i rasprava

5.1. Analiza svojstava sloma

Tablica 4. prikazuje svojstva sloma za svaku skupinu nastala poslije ispitivanja izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka nakon mikrovalnog zračenja. Slika 7. prikazuje fotografije vanjskog sloma reprezentativnih uzoraka nakon što su razvrstana ispitivanja izvlačenja armature iz armiranobetonskih uzoraka.

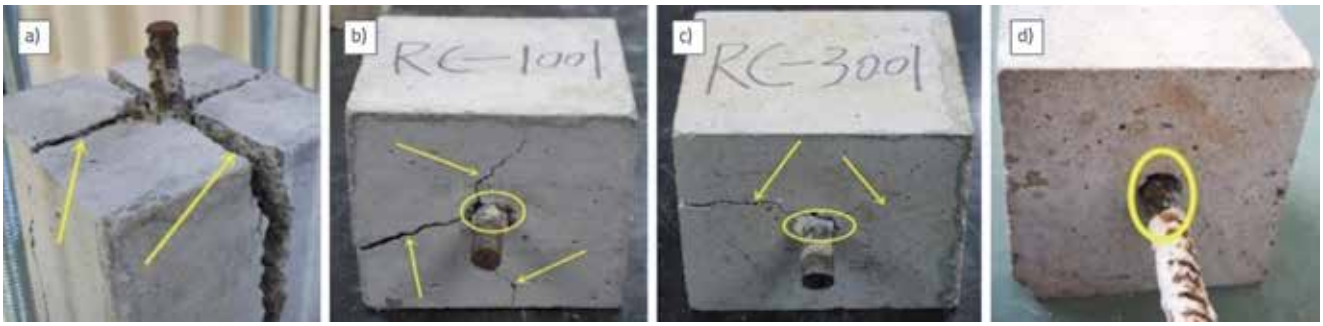
Na temelju fotografija vanjskog sloma može se vidjeti da je bez izloženosti zračenju vlačno naprezanje prstenastog spoja betona i čelične armature u području spoja premašilo vlačnu čvrstoću pri cijepanju armiranog betona i došlo je do sloma uzorka cijepanjem kad se izvukla čelična armatura. Čvrstoća spoja armiranog betona smanjila se do određene mjere nakon što se primijenilo 1000 W mikrovalnog zračenja. Nakon ispitivanja izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka, tri su se pukotine pojavile na površini odakle se izvlačila čelična rebrasta armatura i one su bile približno 120° oko čelične rebraste armature. Pukotine su bile relativno jasne i brojne, ali bez pojave većeg prodora. Sam je uzorak bio relativno dovršen, a pojava cijepanja smanjila se u usporedbi s uzorcima nakon ispitivanja izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka koji nije bio izložen zračenju. Štoviše, pojavila se mala količina znakova izvlačenja čelične rebraste armature, na uzorku je došlo do sloma cijepanjem prilikom izvlačenja šipke. Nakon što se uzorak izložio 3000 W mikrovalnog zračenja, došlo je do sloma sličnog onomu koji je nastao nakon što se uzorak izložio 1000 W mikrovalnog zračenja, a koji je također bio slom cijepanjem prilikom izvlačenja šipke, s tom razlikom što je došlo do relativnog smanjenja širine i broja pukotina. Nakon što se uzorak izložio 5000 W mikrovalnog zračenja, spoj je armiranog betona bio dodatno oslabljen, a uzorak se oštetio jedino pri izvlačenju šipke, ali bez ijedne makroskopske pukotine. Kako

Tablica 3. Tablica označavanja uzoraka

Snaga	0 W			700 W		
Oznaka	RC-01	RC-02	RC-03	RC-701	RC-702	RC-703
Snaga	1000 W			1500 W		
Oznaka	RC-1001	RC-1002	RC-1003	RC-1501	RC-1502	RC-1503
Snaga	2000 W			2500 W		
Oznaka	RC-2001	RC-2002	RC-2003	RC-2501	RC-2502	RC-2503
Snaga	3000 W			3500 W		
Oznaka	RC-3001	RC-3002	RC-3003	RC-3501	RC3502	RC-3503
Snaga	4000 W			5000 W		
Oznaka	RC-4001	RC-4002	RC-4003	RC-5001	RC-5002	RC-5003

Tablica 4. Statistička tablica svojstava sloma za svaku skupinu

Snaga	0 W			700 W		
Svojstva sloma	cijepanje	cijepanje	cijepanje	izvlačenje-cijepanje	cijepanje	cijepanje
Snaga	1000 W			1500 W		
Svojstva sloma	izvlačenje-cijepanje	izvlačenje-cijepanje	izvlačenje-cijepanje	izvlačenje-cijepanje	izvlačenje-cijepanje	izvlačenje-cijepanje
Snaga	2000 W			2500 W		
Svojstva sloma	izvlačenje-cijepanje	izvlačenje-cijepanje	izvlačenje-cijepanje	izvlačenje-cijepanje	izvlačenje-cijepanje	izvlačenje-cijepanje
Snaga	3000 W			3500 W		
Svojstva sloma	izvlačenje	izvlačenje	izvlačenje-cijepanje	izvlačenje-cijepanje	izvlačenje	izvlačenje
Snaga	4000 W			5000 W		
Svojstva sloma	izvlačenje	izvlačenje	izvlačenje	izvlačenje	izvlačenje	izvlačenje

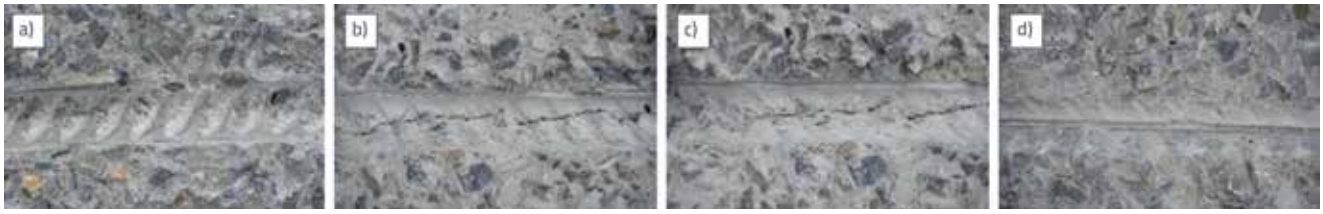


Slika 7. Vanjska oštećenja nakon mikrovalnog zračenja: a) 0 W; b) 1000 W; c) 3000 W; d) 5000 W

bi se dalje istražio slom na unutarnjoj površini spoja armiranog betona, slomovi uzoraka izloženih ispitivanju izvlačenjem šipke iz armiranog betona, a pri mikrovalnom zračenju od 0 W, 1000 W, 3000 W i 5000 W bili su rasječeni, a proučio se kontakt spoja armiranog betona, kao što je prikazano na slici 8.

Slika 8. sadrži fotografije koje prikazuju površinu spoja između čelične rebraste armature i betona unutar uzorka. Kad nije bilo izloženosti mikrovalnom zračenju, znakovi žilica u unutrašnjosti slomljenog uzorka čelične rebraste armature na površini spoja armiranog betona bili su relativno jasni; mehanička nazubljenja u betonu nisu se slomila. Može se zaključiti da se najviše pomaka pojavilo nakon cijepanja uzorka, a kad se pomak pojavio, rebro čelične rebraste armature i mehaničko nazubljenje prilikom drobljenja betona su se razdvojili.

Nakon što se uzorak izložio 1000 W mikrovalnog zračenja, znakovi žilica čelične rebraste armature na unutarnjoj površini spoja betona, kao i slom cijepanjem pri ispitivanju izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka bili su nejasni; došlo je do lokalnog sloma mehaničkog nazubljenja u betonu. Tanka pukotina pojavila se na površini spoja uzdužnim prodiranjem čelične rebraste armature. Kad se uzorak izložio 3000 W mikrovalnog zračenja, unutarnji slom uzorka bio je sličan onome kao kad se uzorak izložio 1000 W mikrovalnog zračenja, s tom razlikom što su znakovi izbočina čelične rebraste armature bili nejasniji, a broj slomova mehaničkog nazubljenja u betonu se povećao, ali se smanjio stupanj pucanja pukotine. Kad se uzorak izložio 5000 W mikrovalnog zračenja, stupanj pucanja mehaničkoog nazubljenja u uzorku bio je najveći i nije bilo ni sitne pukotine u smjeru čelične rebraste armature. U uvjetima mikrovalnog zračenja, razlika dielektrične konstante između čelične rebraste armature i betona izravno vodi do brzog zagrijavanja betona u kratkom vremenu, dok čelična



Slika 8. Oštećenja na unutarnjoj površini spoja nakon mikrovalnog zračenja: a) 0 W; b) 1000 W; c) 3000 W; d) 5000 W

rebrasta armatura ne stvara nikakvu toplinu. Veliki porast temperature i toplinskog naprezanja stvaraju se na površini spoja čelične rebraste armature i betona što omogućava smanjenje posmične čvrstoće mehaničkog nazubljenja u betonu koje ima ulogu vezivanja. Osim toga, kako se beton nastavlja zagrijavati, unutarnja voda u porama isparava, a značajno se razvijaju mikropore i makropore na površini spoja. Nakon visoke temperature, čelična rebrasta armatura skuplja se, a beton apsorbira vodu i širi se što smanjuje silu trenja i silu mehaničkog kidanja (drobljenja) između čelične rebraste armature i betona. Kada snaga mikrovalnog zračenja dosegne 4000 W i 5000 W, hidratacijski sastojci betona brzo dehidriraju i raspadaju se, agregat karbonizira i oslabi, pukotine na kontaktu spoja između hidratacijskih sastojaka i agregata brzo se prošire, a čvrstoća spoja naglo opada.

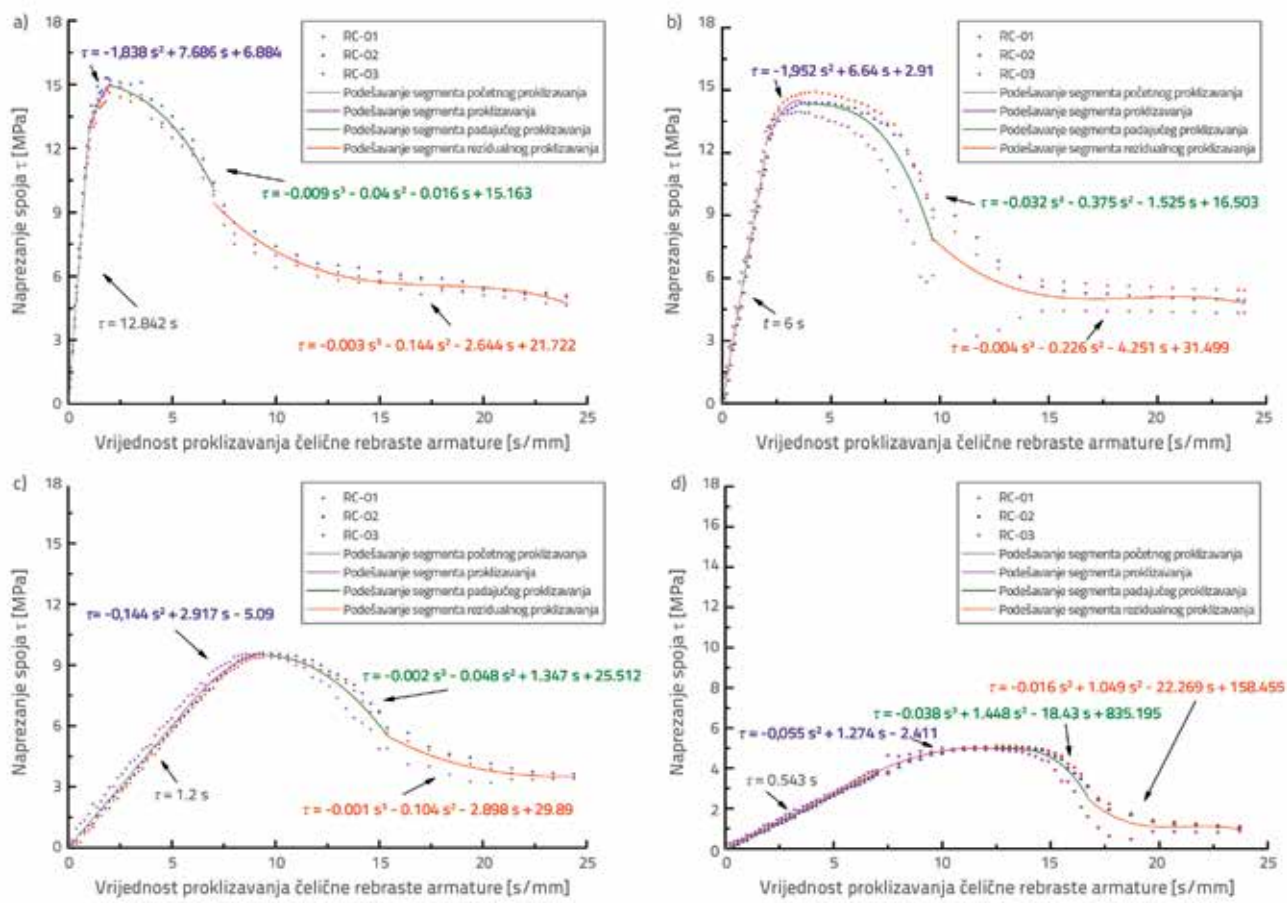
5.2. Analiza krivulje proklizavanja spoja

Prilikom ispitivanja izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka, naprezanje spoja na kraju opterećenja u području spoja uglavnom je veće nego na slobodnom kraju, a raspodjela je naprezanja spoja nejednaka [28]. U ovom radu najveće naprezanje spoja $\tau_{u,a}$ koje se može izraziti sljedećom jednadžbom (9) u području spoja uzeto je za čvrstoću spoja između čelične rebraste armature i betona.

$$\tau_{u,\alpha} = \frac{F_{max}}{\pi \cdot d \cdot l_{\alpha}} \tag{9}$$

gdje je F_{max} vrijednost opterećenja u trenutku sloma uzorka, d je nominalni promjer čelične rebraste armature, l_{α} je duljina spoja armiranog betona. Za uzorke armiranog betona u ovom radu kad proklizavanje čelične rebraste armature nije veće od 105 mm, duljina čelične rebraste armature u području spoja ostaje konstanta koja iznosi 40 mm, pa se stoga l_{α} može smatrati stalnom vrijednošću u eksperimentu. U slučaju modela krivulje proklizavanja, krivulja je uglavnom pojednostavljena tako da ima izgled mnogostruko nabrane (zakrivljene) linije. Postoji mnogo jednostavnih modela [29, 30]. U ovom radu usvojen je 4-segmentni model Europske specifikacije betona CEB-FIPMC90 kako bi se približio konstitutivnom modelu krivulje koja prikazuje cijeli proces tlačnosti betona. Slika 9. prikazuje krivulju podešavanja prosječne čvrstoće spoja armiranog betona izloženog mikrovalnom zračenju od 0 W, 1000 W, 3000 W i 5000 W.

Kritična točka količine proklizavanja između početnog segmenta proklizavanja i segmenta proklizavanja je A koja je izražena



Slika 9. Podešavanje krivulje proklizavanja spoja uzorka nakon mikrovalnog zračenja: a) 0 W; b) 1000 W; c) 3000 W; d) 5000 W

Tablica 5. Statistička tablica naprezanja spoja armiranobetonskog uzorka

Snaga [W]	τ_A [MPa]	τ_A/τ_{AO}	τ_B [MPa]	τ_B/τ_{BO}	τ_C [MPa]	τ_C/τ_{CO}	τ_D [MPa]	τ_D/τ_{DO}
0	13	1,000	15	1,000	8,5	1,000	4,9	1,000
700	12,2	0,938	14,3	0,953	8,2	0,965	4,8	0,980
1000	12	0,923	14,1	0,940	8,1	0,953	4,7	0,960
1500	10,7	0,823	12,9	0,860	7,6	0,894	4,4	0,898
2000	10	0,769	12,3	0,820	7,3	0,859	4,3	0,878
2500	7,8	0,600	10,7	0,713	6	0,706	3,8	0,776
3000	6,5	0,500	9,5	0,633	5,5	0,647	3,5	0,714
3500	4,5	0,346	7	0,467	3,3	0,388	1,6	0,327
4000	4	0,308	6,5	0,433	3	0,353	1,3	0,265
5000	3,8	0,292	6	0,400	2,6	0,306	1	0,204

kao S_A, a konačna čvrstoća proklizavanja početnog segmenta proklizavanja izražena je kao τ_A. Kritična točka između segmenta proklizavanja i segmenta padajućeg proklizavanja je B koja je izražena kao S_B, a ukupna konačna čvrstoća izražena je kao τ_B. Kritična točka segmenta padajućeg proklizavanja i segmenta rezidualnog proklizavanja je C koja je izražena kao S_c, a rezidualna konačna čvrstoća spoja izražena je kao τ_C. Završetak rezidualnog proklizavanja je D, koji je izražen kao S_D, a ukupna rezidualna čvrstoća spoja izražena je kao τ_D. Povećanjem mikrovalne snage povećavaju se postupno S_A, S_B i S_{AC} (kako je najveća vrijednost proklizavanja u eksperimentu oko 24 mm, smatra se da je S_D nepromijenjen), a τ_A, τ_B, τ_C i τ_D postupno se smanjuju. Krivulja podešavanja proklizavanja spoja postaje strmijeg oblika pa se zato može nagađati da se varirajući raspon naprezanja spoja između čelične rebraste armature i betona smanjuje s povećanjem mikrovalne snage, te je tada ravnomjernija sila koja je nanesena na čeličnu rebrastu armaturu izvučenu iz betona. To će biti pogodno za kontrolu udarnog opterećenja u stvarnoj primjeni konstrukcijskog rušenja armiranog betona i smanjit će nesigurnost sloma konstrukcije kao posljedica iznenadno nanesene sile.

Povećanjem snage mikrovalnog zračenja, naprezanje spoja armiranobetonskog uzorka na svakoj kritičnoj točki smanjilo se u različitim stupnjevima, kao što je prikazano u tablici 5. Smanjenja čvrstoće spoja na svakoj kritičnoj točki izloženoj 700 W i 1000 W mikrovalnog zračenja bila su relarivno blizu, a smanjenje je bilo manje nego vrijednost osnovne linije skupine uzoraka koji nisu bili izloženi mikrovalnom zračenju. To pokazuje da mikroval od 700 W i 1000 W ne može učinkovito smanjiti čvrstoću spoja između čelične rebraste armature i betona u 5 minuta. Smanjenja čvrstoće spoja na svakoj točki izloženoj mikrovalnom zračenju od 1500W i 3000W bila su veća nego ona izložena mikrovalnom zračenju od 700 W i 1000 W. Ipak, čvrstoća spoja na svakoj točki u velikoj se mjeri smanjila pri mikrovalnom zračenju od 3500 W, a opadanja su iznosila 65,4 %, 53,3 %, 61,2 % odnosno 67,3 %. Smanjenja na svakoj točki izloženoj mikrovalnom zračenju od 4000 W i 5000 W bila su vrlo slična: smanjenja u čvrstoći spoja u svakoj točki izloženoj mikrovalnom zračenju od 5000 W iznosila su 70,8 %, 60 %, 69,4 % odnosno 79,6 %. Iako je čvrstoća spoja na svakoj točki bila niža pri mikrovalnom zračenju od 5000 W, smanjenja čvrstoće spoja u svakoj točki povećala su se samo za 5,4 %, 6,7 %, 8,2 % i 12,3 % više nego ona izložena mikrovalnom zračenju od 3000 W. To je razlog zašto izloženost uzoraka armiranog betona mikrovalnom zračenju od 3500 W ne samo da može izazvati opadanje čvrstoće spoja u velikoj mjeri nego postiže i bolji omjer energetske učinkovitosti. Prema tome preporučuje se koristiti 3500 W mikrovalnog zračenja.

6. Zaključak

Analizom svojstava sloma i krivulje proklizavanja spoja armiranog betona, koji se ispitao izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka nakon što je izložen mikrovalnom zračenju, dokazalo se da spoj između čelične rebraste armature i betona u velikoj mjeri slabi zbog izloženosti mikrovalnom zračenju. To je vrlo korisno za razvoj tehnologije mehaničkog rušenja uz pomoć mikrovalnog zračenja u gradovima kad su u pitanju napuštene armiranobetonske zgrade.

Prema statističkoj analizi oblika sloma kao posljedici ispitivanja izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka, a nakon što su se izložili mikrovalnom zračenju različite snage, otkrilo se da bi kod uzorka došlo do sloma cijepanjem kad i nije izložen mikrovalnom zračenju. Naime, došlo bi do sloma cijepanjem prilikom ispitivanja izvlačenja armature iz armiranobetonskog uzorka kad bi bilo izloženo mikrovalnom zračenju između 700 W i 3500 W, a došlo bi do sloma izvlačenjem prilikom ispitivanja izvlačenja armature iz armiranobetonskog uzorka kad bi bilo izloženo mikrovalnom zračenju većem od 4000 W. S obzirom na razliku u obliku sloma, nagađa se da je smanjenje posmične čvrstoće spoja koju izaziva temperaturno naprezanje glavni razlog pojavljivanja sloma izvlačenjem tijekom povećanja mikrovalne snage u ispitivanju izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka.

Nakon mikrovalnog zračenja analizirana je krivulja proklizavanja spoja prilikom ispitivanja izvlačenjem armature iz armiranobetonskog uzorka. Cijela krivulja sastojala se od početnog segmenta proklizavanja, segmenta proklizavanja, padajućeg segmenta i rezidualnog segmenta proklizavanja. Kako se povećava mikrovalna snaga, čvrstoća spoja na različitim kritičnim točkama smanjuje se u različitim stupnjevima. Međutim, smanjenje čvrstoće spoja pod mikrovalnim zračenjem koje iznosi 5000 W nije bilo značajno u usporedbi s onim koje je izloženo mikrovalnom zračenju koje iznosi 3500 W. Prema tome smatra se da uporaba mikrovalnog zračenja od 3500 W ima bolji omjer energetske učinkovitosti.

Zahvala

Istraživanje opisano u ovom radu financira Kineska zaklada prirodnih znanosti (51174159).

LITERATURA

[1] Chen, K.J., Sun, H.: China's construction waste disposal model from international experience, Journal of International Economic Cooperation, 312 (2011), pp. 38-41

[2] Long, N.P., Daido, H., Yamada, T., Nishimura, A., Hasegawa, N., Kawachi, T.: Experimental characterization of concrete removal by high-power quasicontinuous wave fiber laser irradiation, Journal of Laser Applications, 29 (2017), 041501

[3] Ye, J.J., Chen, F., Xiao, J.Z., Cheng, D.C.: Green Blasting Demolition Technology of Reinforced Concrete Structures, Blasting, 36 (2019), pp. 90-97

[4] Li, H., Zhai, B.H.: Policy Research on Promoting Recycling Construction Waste in China, Urban Development Studies, 22 (2015), pp. 125-130

[5] Meisels, R., Toifl, M., Hartlieb, P., Kuchar, F., Antretter, T.: Microwave propagation and absorption and its thermo-mechanical consequences in heterogeneous rocks, International Journal of Mineral Processing, 135 (2015), pp. 40-51

[6] Pothisiri, T., Panedpojaman, P.: Modeling of bonding between steel rebar and concrete at elevated temperatures, Construction & Building Materials, 27 (2012), pp. 130-140

[7] El-Hawary, M.M., Hamoush, S.A.: Bond shear modulus of reinforced concrete at high temperatures, Engineering Fracture Mechanics, 55 (1996), pp. 991-999

[8] Lu, Z.L.: Experimental Studies on the Bond-anchoring Performance between Reinforcing Bars and Concrete after High-temperature Processing, School of Civil Engineering & Architecture, Henan University of Technology 2014, pp. 59

[9] Liu, G.R., Xiao, S., Yan, L.Y., Wang, Y.Y.: Research on Bond Behavior between Steel Bars and Concrete after Elevated Temperatures, Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 36 (2015), pp. 59-62

[10] Xie, J., Hairui, L.I., Huijie, L.I.: Experiment on bonding properties between reinforcement and concrete at 20°C to 165°C, Journal of Glaciology and Geocryology, 36 (2014), pp. 626-631

[11] Chiang, C.H.,Tsai, C.L.: Time–temperature analysis of bond strength of a rebar after fire exposure, Cement & Concrete Research, 33 (2003), pp. 1651-1654

[12] Arel, H.S., Yazici, S.: Effect of Different Parameters on Concrete-Bar Bond under High Temperature, ACI Materials Journal, 111 (2014), pp. 633-639

[13] Haddad, R.H., Al-Saleh, R.J., Al-Akhras, N.M.: Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete, Fire Safety Journal, 43 (2008), pp. 334-343

[14] Katz, A., Berman, N.: Modeling the effect of high temperature on the bond of FRP reinforcing bars to concrete, Cement & Concrete Composites, 22 (2000), pp. 433-443

[15] Yang, O., Wang, C.Y., Huo, J.S.: Experimental Study and Analysis on Bond Performance between Reinforcing Bar and Concrete under High Temperature, Journal of Hunan University (Natural Sciences), 45 (2018), pp. 10-19

[16] Yin, K.F., Han, Y., Liu, Y.: Experimental Research on Bond Strength between Rebar and Concrete after High Temperature, Applied Mechanics & Materials, 71-78 (2011), pp. 1057-1061

[17] Ergün, A., Kürklü, G., Bapnar, M.S.: The effects of material properties on bond strength between reinforcing bar and concrete exposed to high temperature, Construction & Building Materials, 112 (2016), pp. 691-698

[18] Fan, J.J., Yu, N.H., Wen, G.Z., Cheng, G.H.: Experimental Study of bond stress between concrete and FRP rebars, Journal of Wuhan Polytechnic University, 30 (2011), pp. 63-65

[19] Jacintho, A.E., Silva, V.P., Requena, J.A.V., Lintz, R.C.C., Pimentel, L.L.: Analysis of composite steel and concrete columns at high temperatures, Fire & Materials, 40 (2016), pp. 305-317

[20] Zhao, J., Zou, C.Y., Wang, W.B., Zhang, X.Q.: Study on Bonding Property Between Steel Rebars and Concrete Caused by Freeze-Thaw Action, Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 23 (2007), pp. 719-722

[21] Zhou, X., Zhang, R., Zhao, K., Zhang, G., Wu, B.: An experimental study of impact performance of RC piers with different reinforcement ratios, GRAĐEVINAR, 71 (2019) 6, pp. 465-479, doi: https://doi.org/10.14256/JCE.2305.2018

[22] Cai, X., Yao, L., Hu, Y.,Jiang, H., Shen, M., Hu, Q., Wang, Z., Dahlgren, R.A.: Particle-attached microorganism oxidation of ammonia in a hypereutrophic urban river, Journal of Basic Microbiology, 59 (2019), pp. 511-524

[23] Wang, Y., Djordjevic, N.: Thermal stress FEM analysis of rock with microwave energy, International Journal of Mineral Processing, 130 (2014), pp. 74-8

[24] Gao, W.Y., Dai, J.-G., Teng, J.G., Chen, G.M.: Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire, Engineering Structures, 52 (2013), pp. 488-501

[25] Li, Y.: Study on dielectric and heat transfer properties of materials during microwave heating, Kunming University of Science and Technology, 2012., pp. 75

[26] Huang, M.L.: Study on interface damage of reinforced concrete, Hohai university, 2006, pp. 81

[27] Alfano, G., Sacco, E.: Combining interface damage and friction in a cohesive zone mode, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 68 (2006), pp. 542-582

[28] Torre-Casanova, A., Jason, L., Davenne, L., Pinelli, X.: Confinement effects on the steel–concrete bond strength and pull-out failure, Engineering Fracture Mechanics, 97 (2013), pp. 92-104

[29] Elmorsi, M., Kianoush, M.R., Tso, W.K.: Modeling bond-slip deformations in reinforced concrete beam-column joints, Canadian Journal of Civil Engineering, 27 (2000), pp. 490-505

[30] Santos, J., Henriques, A.A.: New finite element to model bond–slip with steel strain effect for the analysis of reinforced concrete structures, Engineering Structures, 86 (2015), pp. 72-83

[31] Long, W.J., Khayat, K.H.: Creep of Prestressed Self-Consolidating Concrete, Aci Materials Journal, 108 (2011), pp. 476-484