

Primljen / Received: 10.12.2021.

Ispravljen / Corrected: 22.7.2022.

Prihvaćen / Accepted: 12.8.2022.

Dostupno online / Available online: 10.11.2022.

Beton ultravisoke čvrstoće pojačan staklenim vlaknima sa silicijskom prašinom

Autori:

Doc.dr.sc. **Sathyakumar Natarajan**, dipl.ing. građ.

Tehnološki institut Bannari Amman

Odjel za građevinarstvo

Tamil Nadu, Indija

sathyakumarn@bitsathy.ac.in

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **Arun Murugesan**, dipl.ing. građ.

PSG Institut za tehnologiju i primijenjena istraživanja

Odjel za građevinarstvo

Tamil Nadu, Indija

arun@psgitech.ac.inProf.dr.sc. **Jagatheeswaran Dhanapal**, dipl.ing. građ.

Tehnološki fakultet Sona, Tamil Nadu, Indija

Odjel za građevinarstvo

profjpillai@gmail.comProf.dr.sc. **Arunachalam Narayanan**, dipl.ing. građ.

Tehnološki institut Bannari Amman

Odjel za građevinarstvo

Tamil Nadu, Indija

arunachalamn@bitsathy.ac.in

Prethodno priopćenje

Sathyakumar Natarajan, Arun Murugesan, Jagatheeswaran Dhanapal, Arunachalam Narayanan

Beton ultravisoke čvrstoće pojačan staklenim vlaknima sa silicijskom prašinom

Konvencionalni beton pojačan staklenim vlaknima (GFRC) ima široku primjenu u visokim zgradama, mostovima i radovima obnove. U ovom istraživanju razvijene su mješavine betona pojačanog staklenim vlaknima ultravisoke čvrstoće kako bi se smanjila veličina nosivih elemenata. Varijacija postotka staklenih vlakana bila je 0 %, 0,03 %, 0,06 %, 0,09 % i 0,12 %. U ovom istraživanju izrađeno je i ispitano deset greda, s dva omjera raspona i statičke visine (a/d) od 1,6 i 2. Svi testirani uzorci opterećeni su do sloma, no vrijednosti čvrstoće su varirale. Točnije, uzorci pojačani s 0,09 i 0,06-postotnim staklenim vlaknima pokazali su najveću savojnu i posmičnu čvrstoću. Rezultati dobiveni ovim istraživanjem mogu se iskoristiti za odabir optimalnih mješavina betona ultravisoke čvrstoće pojačanog staklenim vlaknima u zadovoljavajućim radnim uvjetima.

Ključne riječi:

beton ultravisoke čvrstoće, beton pojačan vlaknima, silicijska prašina, staklena vlakna, lom posmikom, lom savijanjem

Research Paper

Sathyakumar Natarajan, Arun Murugesan, Jagatheeswaran Dhanapal, Arunachalam Narayanan

Glass fiber reinforced ultra-high strength concrete with silica fume

Conventional glass fiber-reinforced concrete (GFRC) has wide applications in high-rise buildings, bridges, and renovation works. In this study, ultra-high-strength glass fiber reinforced concrete (UHS-GFRC) mixtures were developed to minimize the size of the structural members. The percentage of glass fiber was varied as 0%, 0.03%, 0.06%, 0.09%, and 0.12%. In this investigation, ten beams were cast and tested, with two span-to-effective-depth (a/d) ratios of 1.6 and 2. All the tested specimens attained their respective strengths; however, the strength values varied. Specifically, the specimens reinforced with 0.09% and 0.06% of glass fiber exhibited the highest flexural and shear strengths, respectively. The results obtained in this study can be utilized to select optimum mixtures of UHS-GFRC under satisfying service conditions.

Key words:

ultra-high strength concrete, fiber reinforced concrete, silica fume, glass fiber, shear failure, flexural failure

1. Uvod

Zasad je primjena betona visoke čvrstoće neizbježna. Na betonu visoke čvrstoće provedena su mnoga istraživanja. On se obično proizvodi dodavanjem zgre visokih peći, letećeg pepela s visokim udjelom vlakana ili nekim posebnim metodama njegovanja. Time se povećavaju troškovi izgradnje i otežava primjena u građevinarstvu. Stoga je cilj ovog eksperimentalnog istraživanja utvrditi optimalni postotak staklenih vlakana za poboljšanje mehaničkog ponašanja na isplativ način. Betonske mješavine klasa M20, M30, M40 i M60 s konstantnim udjelom staklenih vlakana od 0,03 % i mješavina betonskih uzoraka sa staklenim vlaknima pokazuju povećanje čvrstoće od 10 do 20 % u usporedbi s konvencionalnim betonom pri starosti od 28 dana [1]. Različiti postoci staklenih vlakana od 0, 0,02, 0,04 i 0,06 % kod uzoraka sa staklenim vlaknima otpornim na alkalije klasa M20 i M30 značajno poboljšavaju mehanička svojstva bez obzira na svojstvo obradivosti betonske mješavine, a postotak povećanja čvrstoće za višu klasu betona neznatno je visok [2].

Razvijanjem betona ultravisoke čvrstoće koristeći se lokalnim materijalima kao što su fini pijesak, cement, kremen praš, mikrosilikatne čestice i čelična vlakna različitih omjera mješavine, povećavaju se mehanička svojstva. Stoga je tlačna čvrstoća betona ultravisoke čvrstoće s vlaknima veća od tlačne čvrstoće običnog betona. Savojna čvrstoća betona ultravisoke čvrstoće s čeličnim vlaknima je 68 % veća od čvrstoće betona bez čeličnih vlakana [3]. Djelomično je korišten drobljeni pijesak za zamjenu prirodnog pijeska, cementa, letećeg pepela, silicijske prašine, krupnog agregata (12,5 mm) i superplastifikatora s vodom. Osim toga, poboljšana su i mehanička svojstva. Savojna čvrstoća povećava se dodatkom drobljenog pijeska i 10-postotne mješavine silicijske prašine [4].

Tlačna je čvrstoća veća kod mješavine silicijske prašine i staklenog praha nego kod potpune zamjene silicijske prašine staklenim prahom.

Beton tlačne čvrstoće od 100 MPa do 200 MPa naziva se beton ultravisoke čvrstoće. Takav beton ima nizak omjer vode i veziva te visok udio veziva [6]. Koristi se drobljeni pijesak (više zbog ograničene dostupnosti prirodnog pijeska), portlandski cement klase 53 s dodatkom pucolana, drobljeni pijesak kao sitni agregat, krupni agregat, voda i superupijajući polimer za kontrolnu mješavinu kao samonjegujući membranski spoj, s obzirom na tlačnu čvrstoću od 20 MPa; međutim, obradivost betona smanjena je za drobljeni pijesak u usporedbi s prirodnim pijeskom. Membrana i samonjega daju bolje rezultate u usporedbi sa zrakom i standardnom vlažnom njegom [7].

Dodavanje silicijske prašine s drugim sastojcima povećava protočnost i mehanička svojstva betona ultravisoke čvrstoće i smanjuje toplinu hidratacije [8]. Provedeno je istraživanje o utjecaju visoke temperature na beton ultravisoke čvrstoće s polipropilenskim (PP) i najlonskim (NY) vlaknima, koje je pokazalo da se odlamanje betona kontrolira dodatkom 0,15 % do 0,25 % vlakana [9].

Provedeno je istraživanje o učinku nanosilikatnih čestica na autogeno skupljanje, hidrataciju i tlačnu čvrstoću betona ultravisoke čvrstoće. Zbog velike specifične površine nanosilikata, količina superplastifikatora raste s povećanjem udjela nanosilikata. Izotermni kalorimetrijski podaci pokazuju da vrijeme stvrdnjavanja odgađa dodavanje polikarboksilatnog superplastifikatora. Vrijednost hidratacije promjenjive temperature opada, a maksimalna unutarnja temperatura opada s povećanjem količine nanosilikata. Analiza rendgenskom difrakcijom pokazuje da se intenzitet CH smanjuje kod betona ultravisoke čvrstoće s nanosilikatima (2 % i 4 %) zbog potrošnje CH. Kako se udio nanosilikata povećava, sposobnost povećanja tlačne čvrstoće betona ultravisoke čvrstoće opada zbog visoke površinske energije nanosilikata [10].

Kada se količina silicijske prašine poveća na 22 %, protočnost se povećava; međutim, iznad 22 %, protočnost se smanjuje. Ukupna hidratacija betona ultravisoke čvrstoće povećava se dodatkom 15-postotne silicijske prašine i smanjuje se za 30 %. Zahvaljujući jakom pucolanskom učinku i sitnim česticama, silicijska prašina pozitivno utječe na ranu tlačnu čvrstoću. Kada se zgru koja je ugrađena da smanji C/S omjer pomiješa sama, tlačna se čvrstoća smanjuje; međutim, kada se pomiješa sa silicijskom prašinom, tlačna se čvrstoća povećava. S povećanjem količine silicijske prašine, smanjuje se poroznost betona ultravisoke čvrstoće, što može biti posljedica njegovog učinka punila i pucolanske aktivnosti, u kojoj se proizvodi više C-S-H gela, smanjujući veličinu pora. Udio kalcijevog hidroksida opada s povećanjem udjela zgre ili silicijske prašine [11].

Smanjenjem omjera vode i veziva povećava se čvrstoća, zbog čega je potrebna voda; kako bi se za to kompenziralo, potrebno je dodati sredstvo za redukciju vode. Cement, silicijska prašina, polikarboksilat eter na bazi metakrilata i polikarboksilat na bazi alila različitih duljina (kraći glavni lanac) učinkoviti su za proizvodnju betona ultravisoke čvrstoće. Učinkovito raspršivanje silicijske prašine nužno je za povećanje protočnosti smjese betona ultravisoke čvrstoće. Stoga, mješavina s ovim polikarboksilat eterom bit će najučinkovitija za betone ultravisoke čvrstoće. Ako je oblik silicijske prašine nepravilan, povećava se udio polikarboksilat etera [12].

Reciklirani keramički agregat ima veću poroznost od agregata koji se koristi u šljunčanom bazaltnom keramičkom agregatnom betonu. Cementna pasta ne može potpuno ući u pore keramičkog agregata, a mala količina zraka zatvorena je u zrcima agregata. Tako se keramički reciklirani agregat može upotrebljavati u proizvodnji betona ultravisoke čvrstoće s tlačnom čvrstoćom većom od 120 MPa i on ne zahtijeva nikakve dodatne metode za korištenje u proizvodnji betona [13].

Stoga je u ovom eksperimentalnom istraživanju detaljno ispitano mehaničko ponašanje, savojna čvrstoća i posmična čvrstoća betonskih greda ultravisoke čvrstoće armiranih staklenim vlaknima s optimalnim postotkom staklenih vlakana i ostalih sastojaka betona.

Tablica 1. Svojstva cementa, sitnog i krupnog agregata

| Red. br. | Provedeni test | Cement | Sitni agregat | Krupni agregat |
|----------|--|--------|---------------|----------------|
| 1 | Normalna konzistencija [%] | 26 | - | - |
| 2 | Početno vrijeme stvrdnjavanja [minute] | 30 | - | - |
| 3 | Vrijeme konačnog stvrdnjavanja [minute] | 340 | - | - |
| 4 | Specifična težina | 3,1 | 2,64 | 2,78 |
| 5 | Upijanje vode [%] | - | 1,745 | 0,6 |
| 6 | Bubrenje [%] | - | 3,99 | - |
| 7 | Nasipna gustoća [kg/m ³] | - | 3885,45 | - |
| 8 | Modul finoće | - | 2,97 | 9,2 |
| 9 | Utjecajna vrijednost [%] | - | - | 4,86 |
| 10 | Vrijednost drobljenja [N/mm ²] | - | - | 2,5 |
| 11 | Abrazivna vrijednost [%] | - | - | 4,12 |

Tablica 2. Detalji greda s postocima staklenih vlakana

| Red. br. | Oznaka grede | Postotak dodanih staklenih vlakana |
|----------|--|------------------------------------|
| 1 | Betonska greda ultravisoke čvrstoće koja otkazuje na savijanje (UHSCFB0) | 0 |
| 2 | Betonska greda ultravisoke čvrstoće koja otkazuje na posmik (UHSCSB0) | 0 |
| 3 | Betonska greda ultravisoke čvrstoće koja otkazuje na savijanje (UHSCFB1) | 0,03 |
| 4 | Betonska greda ultravisoke čvrstoće koja otkazuje na posmik (UHSCSB1) | 0,03 |
| 5 | Betonska greda ultravisoke čvrstoće koja otkazuje na savijanje (UHSCFB2) | 0,06 |
| 6 | Betonska greda ultravisoke čvrstoće koja otkazuje na posmik (UHSCSB2) | 0,06 |
| 7 | Betonska greda ultravisoke čvrstoće koja otkazuje na savijanje (UHSCFB3) | 0,09 |
| 8 | Betonska greda ultravisoke čvrstoće koja otkazuje na posmik (UHSCSB3) | 0,09 |
| 9 | Betonska greda ultravisoke čvrstoće koja otkazuje na savijanje (UHSCFB4) | 0,12 |
| 10 | Betonska greda ultravisoke čvrstoće koja otkazuje na posmik (UHSCSB4) | 0,12 |

2. Korišteni materijali i mješavina

Korišten je obični portland cement klase 43, drobljeni pijesak kao sitni agregat i 12-milimetarski krupni agregat. Provedena su preliminarna ispitivanja kako bi se utvrdila svojstva korištenih materijala, a rezultati su prikazani u tablici 1.

Kao dodaci korišteni su silicijska prašina i superplastifikatori Master Glenium sky tipa 8233. U istraživanju su korištena staklena vlakna otporna na alkalije promjera filameta 14

mikrona, specifične težine 2,68 i duljine 12 mm. Različiti postoci staklenih vlakana dodanih s betonom ultravisoke čvrstoće prikazani su u tablici 2. Svojstva čeličnih šipki korištenih u ovom istraživanju prikazana su u tablici 3.

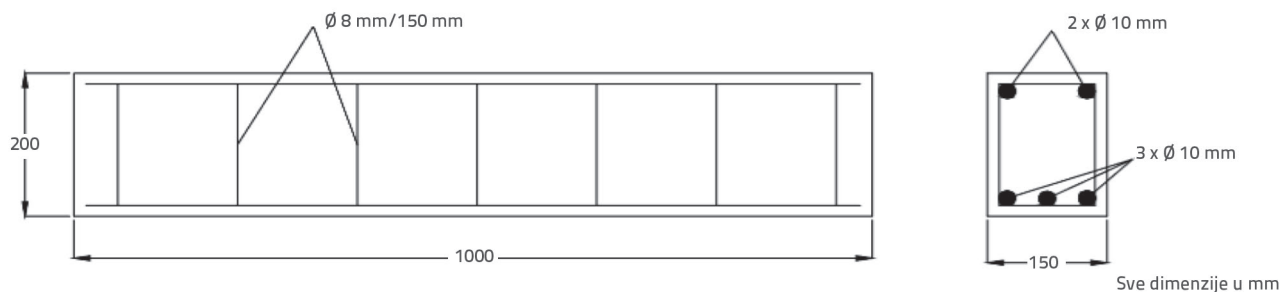
Cilj projektiranja ove mješavine razvoj je najisplativije mješavine za betone ultravisoke čvrstoće. Višestrukim ispitivanjima različitih mješavina betona u ovom je istraživanju dobiven optimalni udio cementa. Sastav mješavine i omjer sastojaka navedeni su u tablici 4.

Tablica 3. Svojstva armirane čelične šipke

| Promjer šipke [mm] | Deformacija pri slomu [%] | Granica popuštanja [N/mm ²] | Čvrstoća [N/mm ²] | Youngov modul E _s [N/mm ²] |
|--------------------|---------------------------|---|-------------------------------|---|
| 8 | 17,3 | 428,16 | 515,25 | 2,10 · 10 ⁵ |
| 10 | 16,3 | 417,24 | 497,6 | 2,08 · 10 ⁵ |

Tablica 4. Sastav mješavine za 1 m³ betona

| Cement [kg] | Sitni agregat [kg] | Krupni agregat [kg] | Silicijska prašina [kg] | Superplastifikator [litre] | Omjer vode i veziva |
|-------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------|
| 756 | 540 | 1080 | 75,6 | 10,8 | 166,32 |
| Omjeri sastojaka | | | | | |
| 1 | 0,714 | 1,429 | 0,1 | 0,0143 | 0,2 |



Slika 1. Detalji armiranja

3. Pojediniosti o uzorku

Sve grede ispitane u ovom istraživanju dimenzija su 1000 mm × 150 mm × 200 mm sa statičkom visinom (d) od 170 mm. Korištene su tri šipke promjera 10 mm kao uzdužna armatura donje zone, dvije šipke promjera 10 mm kao konstrukcijska armatura gornje zone i dvorezne sponne promjera 8 mm na osnovom razmaku od 150 mm (A_{sv}), kao što je prikazano na slici 1. Za sve grede korištena je jednaka armatura.

Nakon sastavljanja oplata, čelična armatura postavljena je unutar oplata na distancere visine 25 mm. Za miješanje materijala korištena je laboratorijska miješalica. Najprije su cement, silicijska prašina i drobljeni pijesak temeljito izmiješani dok se u miješalici nije dobila jednolična smjesa. Nakon toga su ovoj mješavini dodani krupni agregat i staklena vlakna. Na kraju je dodan superplastifikator zajedno s vodom kako bi se dobila jednolična smjesa. Nakon toga je betonska smjesa ugrađena u oplatu grede i popratnih uzoraka i zatim zbijena pomoću igličastog vibratora. Uzorci su podvrgnuti njezi uranjanjem. Ugradnja betona i stvrdnjavanje uzoraka u spremniku prikazani su na slici 2. Izrađeno je deset greda zajedno s popratnim uzorcima u svrhu ispitivanja ponašanja i nosivosti greda na savijanje i posmik. Sve su grede podijeljene u dvije skupine za ispitivanje savijanja i posmika s omjerima raspona i statičke visine (a/d) od 2 odnosno 1,6.

4. Postavka eksperimenta i mjerni uređaji

Ispitivanje tlačne, vlačne i savojne čvrstoće betona provedeno je prema normama IS 516:1959, IS 5816:1999, odnosno IS 9399:1979, kako bi se ispitala mehanička svojstva betona



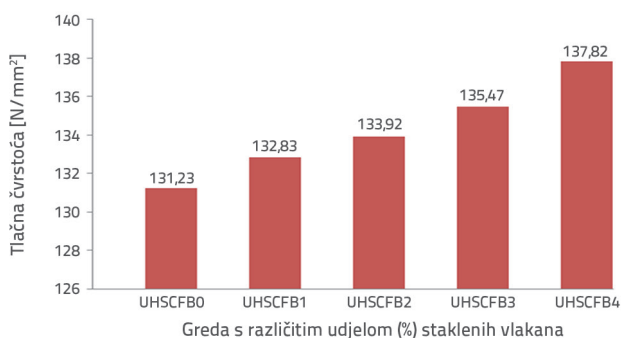
Slika 2. Priprema smjese, uzorci za ispitivanje i stvrdnjavanje uzoraka

ultravisoke čvrstoće ojačanog staklenim vlaknima. Na svim gredama su označene mreže s razmakom od 50 mm i korištene kao pomoć pri crtanju pukotina i mjerenju širina pukotina na traženim mjestima. Grede su ispitane u okviru nosivosti 750 kN. Opterećenje je primijenjeno pomoću hidraulične preše kapaciteta 500 kN i raspoređeno na gredu u dvije točke. Ukupno opterećenje izmjereno je mjernim prstenom nosivosti 200 kN. Omjeri raspona i statičke visine (a/d) održavani su na 2 i 1,6. Progibi su izmjereni na sredini, na jednoj četvrtini i na tri četvrtine raspona pomoću linearnog varijabilnog diferencijalnog transformatora (LVDT). Progib, širina pukotine i pukotine zabilježeni su pri svakom povećanju opterećenja.

5. Rezultati i rasprava

5.1. Tlačna čvrstoća

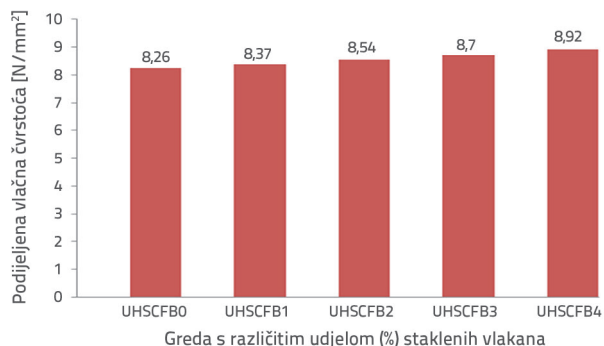
Petnaest kocaka dimenzija 100 mm × 100 mm × 100 mm izrađeno je za različite postotke staklenih vlakana kako bi se ispitala tlačna čvrstoća. Utvrđeno je da je tlačna čvrstoća mješavina betona ultravisoke čvrstoće za sve mješavine veća od 130 N/mm². Dodavanjem 0,03 % staklenih vlakana u mješavinu, tlačna se čvrstoća povećala za 1,22 %, a s 0,06 % staklenih vlakana čvrstoća se dodatno povećala za 0,82 %. Nadalje, 0,09-postotni udio staklenih vlakana u mješavini doveo je do povećanja čvrstoće od 1,15 % te daljnjeg povećanja čvrstoće od 1,73 % kada je dodano 0,12 % staklenih vlakana. Rezultati su pokazali da je povećanje udjela vlakana izravno proporcionalno tlačnoj čvrstoći do optimalnog postotka; međutim, varijacija čvrstoće bila je približno 1 %. Na temelju tih rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće, kao što je prikazano na slici 3, mješavina sa staklenim vlaknima i bez njih daje beton ultravisoke čvrstoće. Čvrstoća se poboljšava dodavanjem staklenih vlakana betonu [1]. Ova se mješavina može koristiti za izradu konstrukcijskih elemenata u visokim zgradama minimiziranjem veličine elementa u usporedbi s konvencionalnom mješavinom betona za iste uvjete nosivosti.



Slika 3. Tlačna čvrstoća betona ultravisoke čvrstoće s različitim postotkom staklenih vlakana, prema tablici 2

5.2. Vlačna čvrstoća

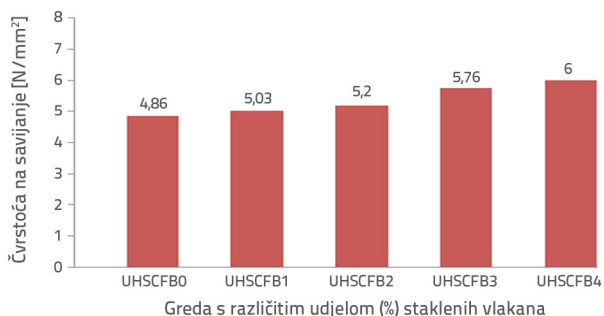
Vlačna čvrstoća dobivena ovim istraživanjem također se povećala s postupnim povećanjem udjela vlakana do optimalnog postotka. Ukupno je izliveno i testirano 15 cilindara promjera 150 mm i visine 300 mm. Vlačna čvrstoća povećala se s 1 % na 2 % za svaki postotak udjela vlakana, kao što je prikazano na slici 4. Dodavanjem silicijске prašine ostalim sastojcima poboljšavaju se mehanička svojstva betona [8].



Slika 4. Vlačna čvrstoća betona ultravisoke čvrstoće s različitim postotkom staklenih vlakana

5.3. Savojna čvrstoća

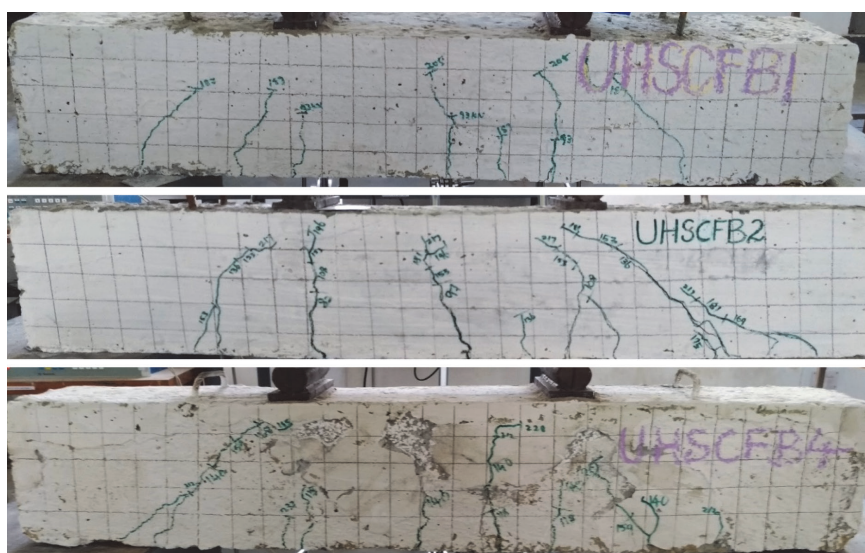
S obzirom na savojnu čvrstoću, izrađeno je i ispitano 15 prizmi dimenzija 500 × 100 × 100 mm. Varijacija između dobivene mješavine bez staklenih vlakana i sa staklenim vlaknima od 0,12 % bila je približno 23 %, kao što je prikazano na slici 5., što upućuje na poboljšanje ponašanja pri savijanju zahvaljujući dodatku vlakana u betonu; postotna varijacija čvrstoće bila je veća od varijacije tlačne i vlačne čvrstoće betona. Uzorci betona s dodanim vlaknima pokazuju veću savojnu čvrstoću nego betoni bez vlakana [3].



Slika 5. Savojna čvrstoća betona ultravisoke čvrstoće s različitim postotkom staklenih vlakana, prema tablici 2



Slika 6. Eksperimentalni postav i ispitivanje greda



Slika 7. Pukotine u gredama uslijed opterećenja

Tablica 5. Pojediniosti rezultata eksperimentalnih ispitivanja

| Red. br. | Oznaka greda | a/d omjer | Čvrstoća betonske kocke [N/mm ²] | Opterećenje pri raspucavanju $W_{cr(E)}$ [kN] | Krajnje opterećenje $W_{u(E)}$ [kN] | Vrsta loma |
|------------------------|--------------|-----------|--|---|-------------------------------------|------------|
| 1 | UHSCFB0 | 2 | 131,23 | 105 | 119 | savijanje |
| 2 | UHSCSB0 | 1,6 | 131,23 | 71 | 147 | posmik |
| 3 | UHSCFB1 | 2 | 132,83 | 93 | 205 | savijanje |
| 4 | UHSCSB1 | 1,6 | 132,83 | 117 | 253 | posmik |
| 5 | UHSCFB2 | 2 | 133,92 | 82 | 217 | savijanje |
| 6 | UHSCSB2 | 1,6 | 133,92 | 126 | 301 | posmik |
| 7 | UHSCFB3 | 2 | 135,47 | 115 | 271 | savijanje |
| 8 | UHSCSB3 | 1,6 | 135,47 | 107 | 289 | posmik |
| 9 | UHSCFB4 | 2 | 137,82 | 118 | 248 | savijanje |
| 10 | UHSCSB4 | 1,6 | 137,82 | 105 | 266 | posmik |
| Srednja vrijednost | | | | | 256,25 | |
| Standardno odstupanje | | | | | 33,02 | |
| Koefficient varijacije | | | | | 12,88 % | |

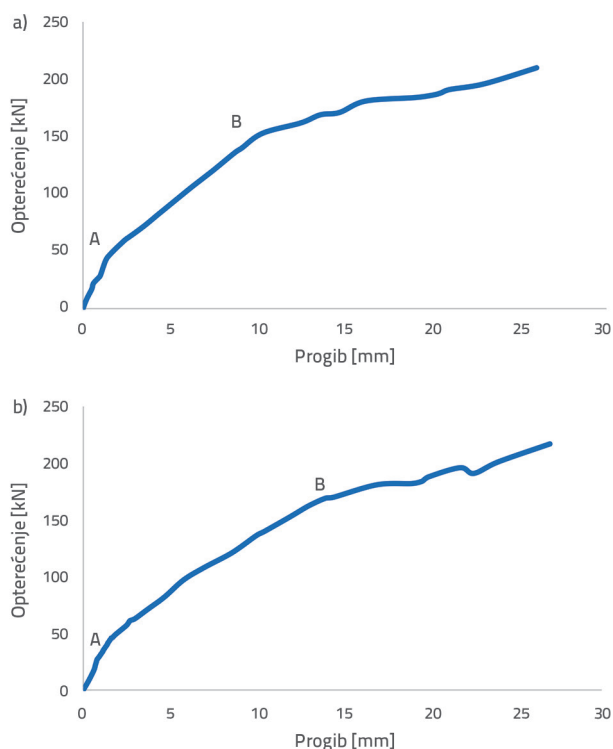
5.4. Ponašanje pri savijanju i posmiku betonskih greda ultravisoke čvrstoće ojačanih staklenim vlaknima

Sve grede razmatrane u ovom istraživanju ispitane su do loma pod simetrično primijenjenim i postupno rastućim opterećenjima u dvije točke, kao što je prikazano na slici 6. Zabilježeno je povećanje nosivosti greda na savijanje ($a/d = 2$) pri optimalnom udjelu vlakana od 0,09 %. Ako udio vlakana prijeđe ovu granicu, nosivost se smanjuje. Postignuta nosivost maksimalna je za gredu koja sadrži 0,12 % staklenih vlakana kod posmičnog sloma ($a/d = 1,6$), jer nosivost greda ovisi o primjesama kao i o omjeru raspona i statičke visine. Pukotine uslijed opterećenja prikazane su na slici 7.

5.5. Odnosi opterećenja i progiba

Opterećenje je primijenjeno postupno na način opisan ranije. Opterećenje pri raspucavanju, krajnje opterećenje i vrsta sloma navedeni su u tablici 5. Krivulje opterećenje – progib uslijed posmičnog sloma i savojnog sloma prikazane su na slici 8. Mogu se uočiti tri jasno definirana područja ponašanja. U gredi UHSCSB2,

linija do točke A je linearna i ima najveći nagib. To odgovara fazi prije raspucavanja. Do raspucavanja dolazi u točki A, zbog čega se mijenja nagib grafa. U točki B dolazi do popuštanja čelika. Graf je zakrivljen nakon točke B, a isto vrijedi i za gredu UHSCFB3. Sve ostale grede pokazale su slične promjene na grafu opterećenje–progib.



Slika 8. Opterećenje u odnosu na progib za savojni i posmični slom: a) UHSCSB2 Opterećenje – progib; b) UHSCFB3 Opterećenje – progib

6. Zaključak

Ispitivanje betona ultravisoke čvrstoće važno je kako bi se prikazali različiti materijali i kombinacije korištene za izradu betona ultravisoke čvrstoće, kao i eksperiment koji detaljno opisuje ponašanje greda od betona ultravisoke čvrstoće pojačanog staklenim vlaknima pri savijanju i posmiku za opterećenja prije raspucavanja. Nadalje, potrebni su grafovi

opterećenje – progib za različite postotke staklenih vlakana i omjer raspona i statičke visine. U ovom radu istraživali smo ponašanje greda pri savijanju. Trenutačno nije objavljen nijedan članak o savojnoj čvrstoći ovih greda. Ovo istraživanje dovelo je do sljedećih zaključaka:

- Sve mješavine dobivene u ovom istraživanju, sa staklenim vlaknima i bez njih, pokazale su ultravisoku čvrstoću (tlačna čvrstoća veća od 100 MPa).
- Ispitane grede s omjerom posmičnog raspona i statičke visine (av/d) 2,0 slomile su se zbog savijanja.
- Ispitane grede s omjerom posmičnog raspona i statičke visine (av/d) 1,6 slomile su se zbog posmika.
- Povećanje udjela staklenih vlakana do optimalnog postotka od 0,09 % po volumenu betona pokazuje 24,88 % veću nosivost od 0,06-postotnog udjela vlakana i 8,48 % od 0,12-postotnog udjela vlakana pri lomu zbog savijanja.
- Povećanje udjela staklenih vlakana do optimalnog postotka od 0,06 % volumena betona pokazuje 18,97 % veću nosivost od 0,03-postotnog udjela vlakana i 3,98 % od 0,09-postotnog udjela vlakana pri lomu zbog posmika.
- Bez obzira na postotak staklenih vlakana, grede su se slomile zbog početka popuštanja armaturnog čelika i kasnijeg drobljenja betona u tlačnoj zoni.
- Optimalni postotak staklenih vlakana od 0,06 % do 0,12 % po volumenu betona s omjerom vode i veziva od 0,2 i silicijskom prašinom, superplastifikatorom, cementom, drobljenim pijeskom i krupnim agregatom veličine 12 mm dovoljan je za proizvodnju betona ultravisoke čvrstoće s boljom čvrstoćom. Također se mogu upotrijebiti šuplje grede istog sastava za predviđanje nosivosti i ponašanja.

U budućim istraživanjima potrebno je razmotriti primjenu nerazornog ispitivanja utemeljenog na primjeni piezoelektričnih pametnih agregata koji omogućuju aktivno praćenje stanja konstrukcija i elemenata, prema [14].

Zahvala

Autori zahvaljuju upravi Instituta za tehnologiju Bannari Amman u Erodeu na osiguranju laboratorijskih objekata za provođenje ovog istraživanja. Također zahvaljuju na tehničkoj podršci pri provođenju eksperimenta koju su pružili nastavni i laboratorijski tehničari Instituta za tehnologiju Bannari Amman.

LITERATURA

- [1] Upendra Varma, A., Kumar, A.D.: Glass Fibre Reinforced Concrete, International Journal of Engineering Research and Applications, 3 (2013) 5.
- [2] Md.Abid A., Imran, A., Fazlur, R.: Experimental Study on Properties of Glass Fibre Reinforced Concrete, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), 24 (2015) 6.
- [3] Srinivas, A., Craig, M.N.: Ultra-High Strength Concrete Mixtures Using Local Materials, Journal of Civil Engineering and Architecture, 5 (2011).
- [4] Magudeaswaran, P., Eswaramoorthi, P.: High Performance Concrete Using M Sand, Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities, 6 (2016), pp. 372-386.

- [5] Vaitkevičius, V., Šerelis, E.: Influence of Silica Fume on Ultrahigh Performance Concrete, *International Journal of Bioengineering and Life Sciences*, 8 (2014).
- [6] Venkatesan, G., Tamizhazhagan, T.: Ultra High Strength Concrete, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5 (2016).
- [7] Sagura, R., Jagadeesan, R.: Experimental Study on Mechanical Properties of M-Sand Concrete by Different Curing Methods, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X.
- [8] Wu, Z., Shi, C., Khayat, K.H.: Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC), *Cement and Concrete Composites*, 2016.
- [9] Choe, G., Kim, G., Nam, J., Kim, H., Hwang, E., Lee, S.: Effect of Mass Loss of Organic Fiber on the Water Vapor Pressure and Moisture Migration of 150 and 200 MPa Ultra-High Strength Concrete Exposed to High Temperature, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 18 (2020), pp. 339-351.
- [10] Zhang, G.Z., Cho, H.K., Wang, X.Y.: Effect of Nano-Silica on the Autogenous Shrinkage, Strength, and Hydration Heat of Ultra-High Strength Concrete, *Applied sciences*, 10 (2020).
- [11] Shi, C., Wang, D., Wu, L., Wu, Z.: The hydration and microstructure of ultra-high strength concrete with cement - silica fume - slag binder, *Cement and Concrete Composites*, 61 (2015), pp. 44-52.
- [12] Plank, J., Schroebl, C., Gruber, M., Lesti, M., Sieber, R.: Effectiveness of Polycarboxylate Superplasticizers in Ultra-High Strength Concrete: The importance of PCE Compatibility with Silica Fume, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7 (2009) 1, pp. 5-12.
- [13] Bartosz, Z., Maciej, S., Paweł, O.: Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes – The method of production and the interfacial transition zone; *Construction and Building Materials*, 122 (2016), pp. 736-742.
- [14] Stojić, N., Nestorović, T., Stojić, D., Marković, N., Stojković, N., Velimirović, N.: Energy based three-dimensional damage index for monitoring and damage detection of concrete structures, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 12, pp. 1223-1238, <https://doi.org/10.14256/JCE.2428.2018>