

Primljen / Received: 6.2.2024.

Ispravljen / Corrected: 16.7.2024.

Prihvaćen / Accepted: 23.7.2024..

Dostupno online / Available online: 10.9.2024.

Metoda za postizanje značajnih sila sidrenja unutar ograničenih dubina ugradnje u tanke betonske ploče i ljsuke ojačane vlaknima

Autor:

Izv.prof.dr.sc. **Niyazi Özgür Bezgin**, dipl.ing.grad.

Sveučilište u Istanbulu – Cerrahpaşa, Turska

Građevinski fakultet

ozgur.bezgin@iuc.edu.tr

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Niyazi Özgür Bezgin

Metoda za postizanje značajnih sila sidrenja unutar ograničenih dubina ugradnje u tanke betonske ploče i ljsuke ojačane vlaknima

Suvremeni beton ojačan vlaknima pruža nove mogućnosti za projektiranje tankih betonskih elemenata sa značajnom otpornošću na savijanje. Kako bi se u potpunosti ostvarile prednosti smanjenja težine zbog smanjene debljine konstrukcije, moraju se razviti novi elementi za sidrišta, koji mogu izdržati velike sile sidrenja u okvirima ograničenih dubina ugradnje u tanke ploče. Cilj ovog rada je predstaviti novi koncept sidrišta za betonske ploče ili ljsuke, koji osigurava velike vlačne sile između 4 i 6 kN s malom ugradbenom dubinom od 5 mm. Predloženi projektni koncept uključuje dvostupanjski mehanizam za sidrište koji sidrištu osigurava potrebnu vlačnu čvrstoću i duktilnost. Ovakva sidra unutar ograničene dubine ugradnje tankih betonskih elemenata omogućuju proizvodnju lakih betonskih ploča i ljsuki.

Ključne riječi:

fasadne ploče, betonske ljsuke, beton ojačan vlaknima, sidrište, dubine ugradnje

Research Paper

Niyazi Özgür Bezgin

Method to attain substantial anchorage forces within limited embedment depths into thin fibre-reinforced concrete plates and shells

Contemporary fibre-reinforced concrete provides new opportunities for the design of thin concrete elements with substantial bending strength. To realise the full benefits of reduced weights owing to the reduced structural thickness, new anchorage elements must be developed that can sustain high anchorage forces within limited embedment depths in thin plates. This paper introduces a new anchorage design for concrete plates or shells that provides high tensile forces between 4 and 6 kN within a small embedment depth of 5 mm. The proposed design concept includes a two-stage anchorage mechanism that provides the required tensile strength and ductility for the anchorage. Achieving such anchorage capabilities within the limited embedment depth of thin concrete elements enables the production of lightweight concrete plates and shells.

Key words:

façade panels, concrete shells, fibre-reinforced concrete, anchorage, embedment depths

1. Uvod

Beton je višenamjenski građevni materijal koji omogućuje oblikovanje različitih konstrukcijskih oblika kao odgovor na brojne potrebe u arhitekturi. Suvremene betonske konstrukcije mogu postići značajne razine vlačne čvrstoće dodavanjem stakla otpornog na lužine, polimera i čeličnih vlakana u betonsku smjesu [1-3]. Uslijed povećane vlačne čvrstoće, zahvaljujući vlaknima ugrađenima u beton, moguće je izostaviti upotrebu čelične armaturne šipke, što omogućuje izradu tankih betonskih ploča i betonskih ljsuki. Za oblikovanje arhitektonskih pročelja zgrada upotrebljavaju se betonske ploče debljine do 10 mm [3]. Te su ploče izrađene da se odupru pritiscima vjetra i inercijskim silama uzrokovanim seizmičkim događajima [4, 5].

Napredak u projektiranju betonskih konstrukcija zahtijeva holistički pristup koji uključuje projektiranje betonskih konstrukcijskih elemenata i potpornih i armaturnih veza za oblikovani betonski element. Poboljšanja vlačne čvrstoće betona dodavanjem staklenih i čeličnih vlakana otpornih na lužine eliminiraju potrebu za odvojenim armaturnim koševima za suzbijanje vlačnih naprezanja koja se javljaju unutar određenih betonskih konstrukcijskih elemenata djelovanjem konstrukcijskih sila, kao što su ploče i ljsuke fasada [6, 7]. Uklanjanje čeličnih ojačanja također eliminira potrebu za upotrebom betonskog zaštitnog sloja za sprječavanje korozije čelika, čime se smanjuje debljina ploče i ljsuke, a time i njihova konstrukcijska težina [8].

Projektiranje građevine nepotpuno je ako se ne uzmu u obzir projektiranje nosivih elemenata i povezanosti građevine sa svojim nosivim elementima. Obično se uzima u obzir dubina ugradnje čelične armature u betonu ili duljina prijenosa šipki za prednaprezanje u betonu, što zahtijeva ugradnju značajne količine betona. Međutim, ako je raspoloživi volumen betonske konstrukcije ograničen, na primjer tankim betonskim pločama i ljsukama, a količina sile koja se mora prenijeti je velika, potrebne su druge metode za prijenos tih sila na ograničenoj dubini.

Debljina tankih ploča i ljsuki često se povećava u točkama sidrišta kako bi se osigurao građevni materijal za povezivanje sa sidrišnim elementima. Međutim, takve su metode kontraproduktivne za konstrukciju lakih ploča i ljsuki, jer dovode do povećanja vlastite težine konstrukcije zbog veće debljine na točkama oslonca.

U ovom je radu prikazan razvoj nove metode sidrenja i sidrišnog elementa za tanke betonske ploče i ljsuke koje se sastoje od betona ojačanog staklenim vlaknima. Predloženo sidrište moglo bi proizvesti značajne sile sidrenja i duktilnost na dubini od 5 mm putem posmičnog povezivanja. Konstrukcija sidrišta omogućuje da se vlačna otpornost ugrađenog betonskog elementa očituje kroz posmično povezivanje s ugrađenim betonom. Najprije je prikazana struktura mješavine betona ojačanog staklenim vlaknima otpornih na lužine te izrada četiri skupa tankih ploča. Parametri mehaničkog dizajna betonskog materijala zatim se određuju ispitivanjem savijanjem u četiri točke, provedenog na tim pločama. Na kraju je prikazan dizajn sidrišnog elementa, detaljni rezultati testa čupanja sidra, provedenog na nizu sidara ugrađenih u betonske ploče, te rasprava o tim rezultatima.

2. Izbor betonske mješavine i određivanje njezinih mehaničkih parametara

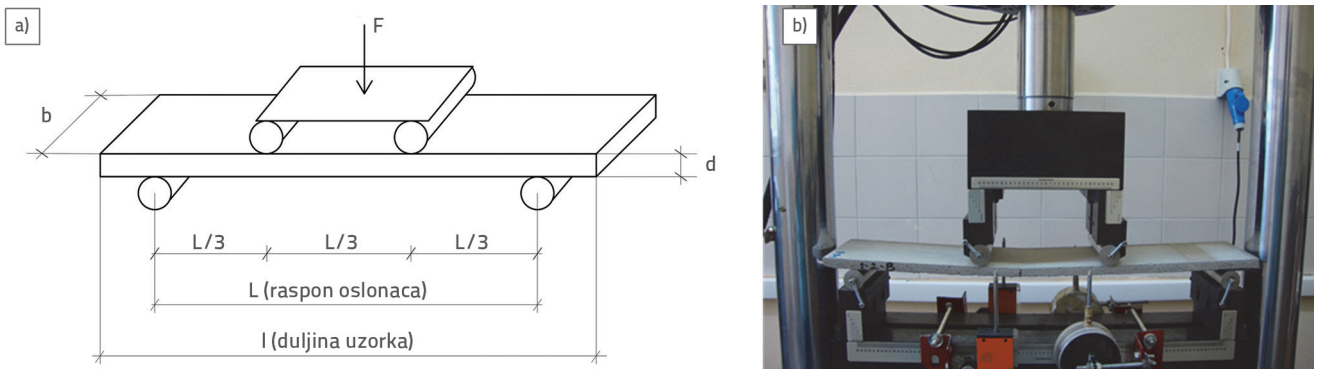
Projektiranje i ispitivanje predloženog sidrišnog mehanizma započelo je izradom konstrukcijskog materijala i ispitnih uzoraka za procjenu konstrukcijskih parametara materijala ispitivanjem savijanja u četiri točke. Provedena su brojna ispitivanja smjese mijenjanjem masenih udjela vlakana, pijeska i cementa. Maseni udjeli vlakana u ispitivanjima iznosili su 1 %, 2 % i 3 % u odnosu na masu po jedinici volumena betona. U tablici 1. prikazani su sadržaj i količine smjese koja je pripremljena miješalicom s visokim oštrocama. Duljina vlakana iznosila je 13 mm, a kao plastifikator upotrijebljen je materijal s modificiranim svojstvima na bazi etera polikarboksilne kiseline (PCE).

Tablica 1. Projektirani sadržaj betona za smjesu s udjelom vlakana od 3 % i omjerom cementa i pijeska 1:1,75

Sadržaj	Količina [kg/m ³]
CEM I 52.5 O	910
Kvarcni pijesak	910
Staklena vlakna otporna na lužine	67
Plastifikator	9
Voda	327

Nakon određivanja udjela betonske mješavine ojačane staklenim vlaknima, od konstrukcijskog materijala pripremljene su tri skupine od 24 pravokutna uzorka. Uzorci su bili dugi 55 cm i široki 10 cm i raspoređeni u skupine prema debljini od 10, 20 i 30 mm. Prva identifikacija uzorka bio je broj grupa, označen kao 1, 2 i 3. Svaka grupa sadržavala je dva skupa ploča, označenih kao 1 i 2, a svaki je skup sadržavao četiri uzorka, označenih kao A, B, C i D. Razlika između skupova 1 i 2 bila je razlika u njihovoj proizvodnji s obzirom na usmjerenost vlakana. U prvoj skupini uzorci su proizvedeni na način da su se vlakna nasumično pozicionirala po cijeloj površini uzorka bez dodatnih mjera za postizanje usmjerenosti. Drugi skup uzoraka proizveden je kako bi se postigla što veća usklađenost vlakana duž cijele duljine ploča. Beton je ugrađen s jednog kraja oplate i tekao je na drugi. Utvrđeno je da bi postizanje usmjerenosti vlakana okomito na poprečni presjek uzorka stvorilo najveću korist u smislu savijanja.

Uzorci su bili podvrgnuti ispitivanju savijanja pod opterećenjem u četiri točke prema specifikacijama navedenim u normi EN 1170-5: "Predgotovljeni betonski proizvodi – Ispitna metoda za cement armiran staklenim vlaknima – 5. dio: Mjerenje čvrstoće na savijanje metodom cjelovitog ispitivanja čvrstoće na savijanje" [9]. Slika 1.a prikazuje predloženi postav ispitivanja savijanja u četiri točke, a slika 1.b prikazuje sliku ispitivanja savijanja u četiri točke za uzorak 1-2-B. Širina uzorka je "b", a njegova debljina je "d". Debljina uzorka 1-2-B, koji je proizveden s pažnjom kako bi se utvrdila usmjerenost vlakana duž raspona uzorka, iznosi 10 mm. Ispitivanja kontrolirana



pomakom započela su postavljanjem uzoraka duljine 55 cm i širine 10 cm na jednostavne nosače s čistim rasponom od 45 cm. Stopa opterećenja na uzorcima bila je $0,03 \pm 0,003$ mm/s, pri čemu je raspon bio opterećen na 1/3 odnosno 2/3 raspona. Podaci o sili (F) i povezanom progibu (Δ) prikupljeni su do granice proporcionalnosti naprezanja i deformacije (eng. *limit of stress-strain proportionality* - LOP) i indeksa loma (eng. *modulus of rupture* - MOR). Podaci o sili i progibu zatim su upotrijebljeni za procjenu vrijednosti naprezanja s obzirom na granicu proporcionalnosti naprezanja i deformacije i indeks loma prema izrazima (1) i (2) u tehničkim specifikacijama [9]. Odgovarajuća opterećenja su zatim procijenjena primjenom izraza (3) i (4) kako je navedeno u tehničkim specifikacijama [9]. Debljina svakog uzorka izmjerena je u tri točke duž njegove širine (na rubovima i u sredini), a prosječna vrijednost (d_{ave}) upotrijebljena je za izračune. Izrazi (1) do (4) povezuju relevantna naprezanja i deformacije na granicama elastičnosti i konačnim granicama s krutošću dijela, primijenjenom silom i pripadajućim progibom. Uređaj za savijanje kontroliran pomakom omogućio je procjenu krutosti napuknutog dijela pomoću izmjerene vrijednosti sile osim F_{LOP} .

$$\sigma_{LOP} = \frac{F_{LOP} \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (1)$$

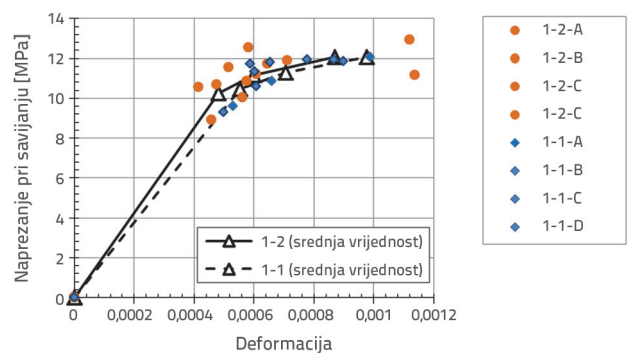
$$\varepsilon_{LOP} = \frac{108}{23} \cdot \frac{\Delta_{LOP} \cdot d}{L^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{MOR} = \frac{F_{MOR} \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (3)$$

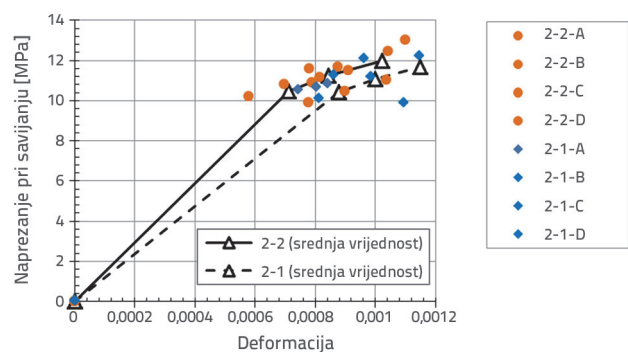
$$\varepsilon_{MOR} = \frac{108}{23} \cdot \frac{\Delta_{MOR} \cdot d}{L^2} \quad (4)$$

U tablici 2. sažeti su prikupljeni podaci i procijenjene vrijednosti naprezanja i deformacija na odgovarajućim granicama. Na temelju izmjerenih sila i deformacija, procijenjena su i obilježena naprezanja i deformacije za tri različite debljine uzorka od 10, 20, odnosno 30 mm (vidi slike 2., 3. i 4.). Odzivi na savijanje na primijenjene progibe bili su linearni i elastični do granice naprezanja koja se naziva granica proporcionalnosti

(LOP). Nakon granice proporcionalnosti, povećanje progiba pratilo je manje povećanje otpora do razine naprezanja (koja se naziva σ_2) izmjerene na srednjoj razini između granice proporcionalnosti i indeksa loma. Nakon srednje razine naprezanja, daljnje povećanje progiba rezultiralo je još nižom otpornošću sve do najviše razine naprezanja (tj. indeksa loma) pri kojoj je došlo do pucanja uzoraka. Ovo trilinearno ponašanje uočeno je u tri skupine uzoraka, slično rezultatima dobivenim u drugim ispitivanjima [10-14]. Za svaki skup od četiri uzorka unutar skupine izračunano je srednje naprezanje i odgovarajuće deformacije, a trilinearno ponašanje srednjeg naprezanja i deformacije za svaki skup prikazano je na slikama 2. do 4.



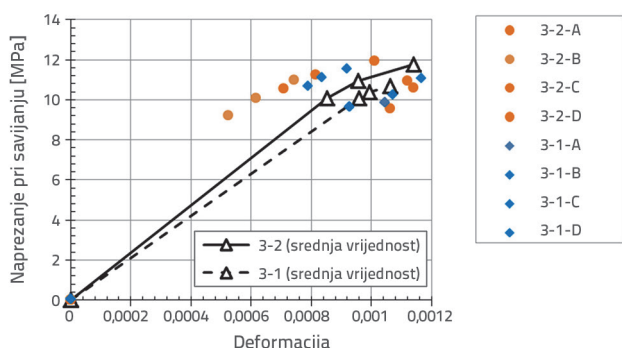
Slika 2. Krivulje naprezanja i deformacija dvaju skupa uzoraka debljine 10 mm



Slika 3. Krivulje naprezanja i deformacije dvaju skupa uzoraka debljine 20 mm

Tablica 2. Podaci ispitivanja i procijenjenih vrijednosti napreznja i deformacija

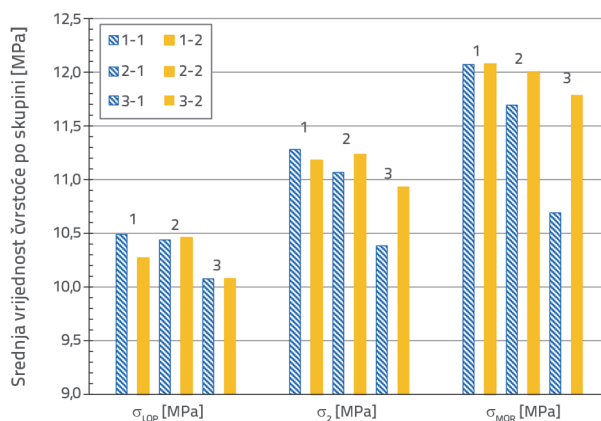
Uzorak	b [mm]	d _{ave} [mm]	F _{LOP} [N]	Δ _{LOP} [mm]	F _{MOR} [N]	Δ _{MOR} [mm]	(F _{MOR} -F _{LOP})/2 [N]	Δ ₂ [mm]	ε _{LOP}	ε ₂	ε _{MOR}	σ _{LOP}	σ ₂	σ _{MOR}
1-1-A	94,2	12,7	323,8	1,8	406,6	3,36	365,2	2,25	0,00053	0,00066	0,00099	9,6	10,9	12,1
1-1-B	103,1	13,3	376,6	1,62	482,3	2,82	429,4	1,97	0,0005	0,00061	0,00087	9,3	10,6	11,9
1-1-C	94,4	13	416,4	1,95	424,2	2,58	420,3	2,16	0,00059	0,00065	0,00078	11,7	11,8	11,9
1-1-D	104,2	13,3	464,3	1,95	506,7	4,11	485,5	2,91	0,0006	0,0009	0,00127	11,3	11,8	12,4
1-2-A	95,8	12	329,6	1,71	360,9	231	345,2	2,18	0,00048	0,00061	0,00064	10,7	11,2	11,7
1-2-B	98,9	11,5	305,7	1,56	362	2,19	333,9	1,94	0,00042	0,00052	0,00058	10,6	11,6	12,5
1-2-C	97	12,7	308,6	1,56	386,5	3,87	347,6	1,91	0,00046	0,00056	0,00114	8,9	10	11,2
1-2-D	101,2	12,6	386,6	1,98	459,9	3,84	423,2	2,44	0,00058	0,00071	0,00112	10,9	11,9	12,9
2-1-A	99,5	22,8	1206,5	1,41	1243,1	1,59	1224,8	1,52	0,00074	0,0008	0,00084	10,5	10,7	10,8
2-1-B	99,8	22,6	1270,4	1,65	1453,9	2,43	1362,2	1,84	0,00086	0,00096	0,00127	11,3	12,1	12,9
2-1-C	96,9	22,5	1078	2,1	1182,1	2,58	1130	2,39	0,0011	0,00125	0,00135	9,9	10,4	10,8
2-1-D	101,9	22,9	1200,2	1,53	1451,9	2,16	1326,1	1,85	0,00081	0,00096	0,00115	10,1	11,2	12,2
2-2-A	93,6	21,4	1039,4	1,59	1185,2	2,1	1112,3	1,77	0,00079	0,00088	0,00104	10,9	11,7	12,4
2-2-B	104,6	21,8	1198,5	1,38	1275,7	1,8	1237,1	1,61	0,0007	0,00082	0,00091	10,8	11,2	11,5
2-2-C	94,9	22	1036,8	1,14	1322,4	2,16	1179,6	1,53	0,00058	0,00078	0,0011	10,2	11,6	13
2-2-D	103,7	21,9	1096,1	1,53	1223,8	2,04	1160	1,77	0,00078	0,0009	0,00104	9,9	10,5	11,1
3-1-A	96,9	31,3	2075,5	1,44	2075,5	1,44	2075,5	1,44	0,00105	0,00105	0,00105	9,8	9,8	9,8
3-1-B	101,3	31,5	2276	1,47	2633,1	1,86	2454,6	1,6	0,00107	0,00117	0,00136	10,2	11	11,8
3-1-C	96,6	31,5	2272,1	1,08	2453,6	1,26	2362,9	1,14	0,00079	0,00083	0,00092	10,7	11,1	11,5
3-1-D	102,6	31,8	2217,8	1,26	2217,8	1,26	2217,8	1,26	0,00093	0,00093	0,00093	9,6	9,6	9,6
3-2-A	98,6	30,9	2218,6	0,99	2505,2	1,41	2361,9	1,13	0,00071	0,00081	0,00101	10,6	11,3	11,9
3-2-B	99,2	31,4	1998,9	0,72	2386,3	1,02	2192,6	0,85	0,00052	0,00062	0,00074	9,2	10,1	11
3-2-C	100,3	30,4	2257,7	1,59	2589,1	2,1	2423,4	1,79	0,00112	0,00126	0,00148	10,9	11,8	12,6
3-2-D	96,9	31,2	2009,6	1,47	2441,9	1,83	2225,7	1,58	0,00106	0,00114	0,00132	9,6	10,6	11,6



Slika 4. Krivulje napreznja i deformacije dvaju skupova uzoraka debljine 30 mm

Tri različite debljine koje predstavljaju karakteristične dimenzije ploča ojačanih staklenim vlaknima upotrijebljene su za procjenu mogućih učinaka debljine na učinkovitost vlakana pri savijanju. Usporedba slike 2. do 4. pokazuju da su za prvi skup uzoraka, uz obraćanje posebne pozornosti na usmjerenost vlakana, zabilježeni veći omjeri napreznja i deformacija u svim područjima napreznja i deformacija u usporedbi s uzorcima proizvedenim bez ikakve pozornosti na usmjerenost vlakana, što je slično nalazima dobivenih drugim ispitivanjima [15]. Slika 5. prikazuje razlike u prosječnim vrijednostima čvrstoće za tri različita područja napreznja i deformacija. Za svaku skupinu uzoraka 1, 2 i 3 prikazane su dvije različite vrijednosti (1 ili 2) koje predstavljaju dva skupa. Svaki skup označen je drugom bojom i uzorkom na slikama. Učinak usmjerenja vlakana na

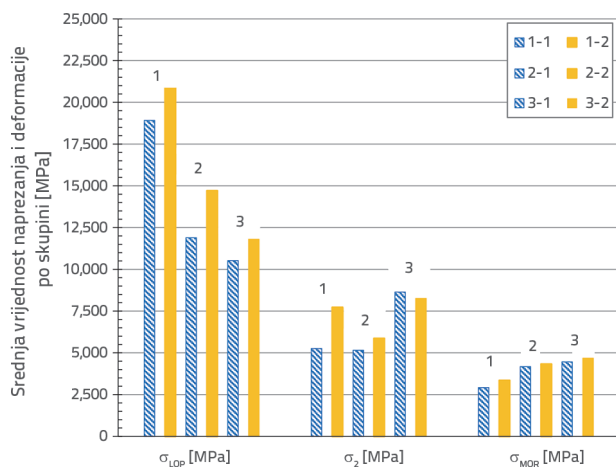
omjere napreznja i deformacije izvan granice proporcionalnosti vidljiv je na ovim slikama za ispitne uzorke debljine 20 i 30 mm.



Slika 5. Srednja vrijednost čvrstoće na savijanje u odgovarajućim granicama za svaku skupinu uzoraka

Na temelju dijagrama srednje vrijednosti napreznja i deformacije procijenjeni su omjeri napreznja i deformacija za odgovarajuće skupove. Kao što je prikazano na slikama 2. do 4., modul elastičnosti materijala je omjer između granice linearnog elastičnog napreznja i odgovarajuće deformacije, a smanjuje se povećanjem deformacije. Slika 6. prikazuje razlike u omjerima napreznja i deformacija unutar odgovarajućih područja napreznja i deformacija. Kao što je i očekivano, otpornost na progib uslijed savijanja smanjivao se s povećanjem napreznja.

Moduli elastičnosti do granice proporcionalnosti smanjivali su se s povećanjem debljine uzorka. Kako se debljina povećavala, uzorci su dosegli svoje odgovarajuće granice proporcionalnosti pri višim vrijednostima deformacije. Za debljine uzorka od 10 i 20 mm, čini se da utvrđena duljina vlakana od 13 mm reagira na naprezanja uslijed savijanja pri manjim deformacijama.



Slika 6. Procijenjeni omjeri naprezanja i deformacija unutar elastičnog i plastičnog područja do odgovarajućih granica naprezanja σ_{LOP} , σ_2 , i σ_{MOR}

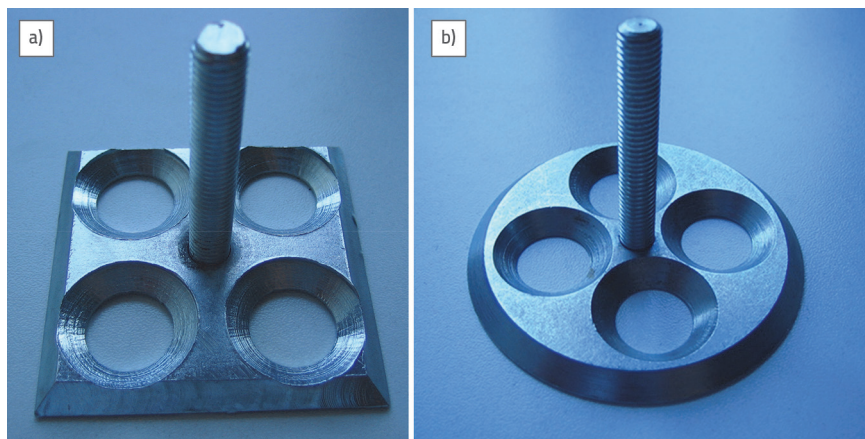
Na temelju triju ispitivanja na tlak, provedenih na standardnim cilindričnim uzorcima za betonske smjese dobivene su vrijednosti tlačne čvrstoće od 46,3; 48,1, odnosno 45,2 MPa, sa srednjom vrijednošću $f_m = 46,5$ MPa i standardnim odstupanjem od $SD = 1,2$ MPa. Karakteristična tlačna čvrstoća betona temeljena na 90 % pouzdanosti iznosi $f_c = f_m - 1,28 \cdot SD = 46,5 - 1,28 \cdot 1,2 = 45$ MPa. Ispitivanja pritiska provedena su u skladu s normom EN 206 [16, 17]. Srednje vrijednosti naprezanja s obzirom na granicu proporcionalnosti i indeks loma bile su $\sigma_{LOP} = 10,5$ MPa i $\sigma_{MOR} = 11,7$ MPa. Njihova standardna odstupanja bila su $SD_{LOP} = 0,7$ MPa i $SD_{MOR} = 0,9$ MPa.

Iako se beton uglavnom upotrebljava zbog svoje tlačne čvrstoće, njegova čvrstoća na savijanje i izravna vlačna čvrstoća važni su parametri u primjeni sidara u tankim pločama i ljuskama [3]. Međutim, mjerenje izravne vlačne čvrstoće betona nije bilo moguće jer uređaj za ispitivanje izravne vlačne čvrstoće, kalupi za vlačne uzorke i dodaci za uzorke nisu bili dostupni tijekom ovog ispitivanja. Eksperimentalno ispitivanje izravne vlačne čvrstoće je teško jer rezultati mogu uvelike ovisiti o veličini uzorka i veličini čestica komponenti koje čine betonsku mješavinu, kao i o stopi opterećenja [10, 12, 13]. Mnogi istraživači istraživali su odnos između izravne vlačne čvrstoće i tlačne čvrstoće betona. Na temelju karakteristične tlačne čvrstoće $f_c = 45$ MPa izravna vlačna čvrstoća betona može se procijeniti na $f_t = 3,8$ MPa ili $f_t = 4$ MPa na temelju normi CEB-FIB 91 i ACI 363R-92 [10]. Međutim, ove vrijednosti podcjenjuju vlačnu čvrstoću betona ojačanog vlaknima jer navedeni empirijski izrazi ne uzimaju u

obzir učinke ugradnje vlakana [3, 10]. U prijašnjim istraživanjima koja su proučavala vezu između izravne vlačne čvrstoće betona i njegove čvrstoće na savijanje, utvrđeno je da se izravna vlačna čvrstoća betona ojačanog vlaknima može približno odrediti kao 50 % njegovog indeksa loma [3, 10, 18]. Karakteristična vrijednost indeksa loma (f_{c-MOR}) za konstrukcijski materijal određena je s razinom pouzdanosti od 90 % kao $f_{c-MOR} = \sigma_{MOR} - 1,28 \cdot SD_{MOR} = 11,7 - 1,28 \cdot 0,9 = 10,5$ MPa. Stoga je izravna vlačna čvrstoća upotrijebljenog materijala procijenjena kao $f_t = 0,5 \cdot 10,5$ MPa = 5,25 MPa = 5 MPa. Dodatno povećanje izravne vlačne čvrstoće moguće je upotrebom betona vrlo visokih svojstava koji uključuje silicijsku prašinu [19, 20]. Međutim, vlačna čvrstoća materijala upotrijebljenog u ovom istraživanju postavljena je na najmanju preporučenu vrijednost za dani sadržaj vlakana i tlačnu čvrstoću primijenjenog betona.

3. Konstrukcija sidrišta ploče

Sidrišni elementi namijenjeni su za sidrenje (pričvršćenje) fasadnih ploča koje se izrađuju od elemenata tankih ploča. Relevantna proračunska sila na fasadne ploče je pritisak uzrokovan vjetrom. Ovisno o visini na kojoj se ploča postavlja, arhitektonskim obilježjima nosive konstrukcije i obilježjima vjetra, fasadne ploče izložene su različitim pritiscima u rasponu od pozitivnih do negativnih vrijednosti. Stoga je konačna projektirana vrijednost negativnog tlaka od 2000 N/m² za sidrišni element u ovom istraživanju navedena kao kritični projektni uvjet, pri čemu raspodjela jednog sidrišnog elementa po kvadratnom metru fasade predstavlja ekstremni slučaj. Odabrana vrijednost projektirane tlačne nosivosti primjer je karakterističnih visokih tlakova vjetra koji mogu djelovati na fasade zgrada do 60 m visine [21]. Utvrđeno je da je način strukturnog sloma sidra duktilan jer bi krhka veza odmah pukla bez upozorenja. Stoga dizajn sidrišta uključuje značajke koje ne osiguravaju samo potrebnu čvrstoću, već i potrebnu duktilnost. U tu je svrhu odabran klinasti profil za sidrišni element debljine 5 mm, kao što je prikazano na slici 7. Najprije je oblikovan četvrtasti oblik s četiri unutarnje rupe i klinastim obodima (sl. 7a). Naknadno je odabran okrugli oblik zbog koncentracije naprezanja na uglovima kvadratnog oblika. Unutarnje rupe upotrijebljene su kao konstrukcijske značajke zbog dva različita razloga. Prvo kako bi se olakšala ugradnja sidrišnih elemenata u svježi beton. Drugo kako bi se sidrenje provelo izravnom vlačnom čvrstoćom betona preko unutarnjih klinova formiranih od unutarnjih rupa. Vanjski obodni klinovi pružaju dodatnu čvrstoću koju osiguravaju unutarnji klinovi. Vanjski klinovi također su produljili trajanje postignute vlačne čvrstoće i osigurali duktilnost sustava sidrišta. Sva ova očekivanja u vezi s konstrukcijom podvrgnuta su programu ispitivanja čiji su detalji predstavljeni u poglavlju 4. ovog rada. Slika 8. prikazuje tlocrt i poprečni presjek konstruiranog sidrišnog elementa. Dimenzije su navedene u milimetrima. Sidrišni element imao je četiri unutarnje rupe s promjerom baze $D_i = 16$ mm na svom dnu sidrišnog elementa. Stoga, površina



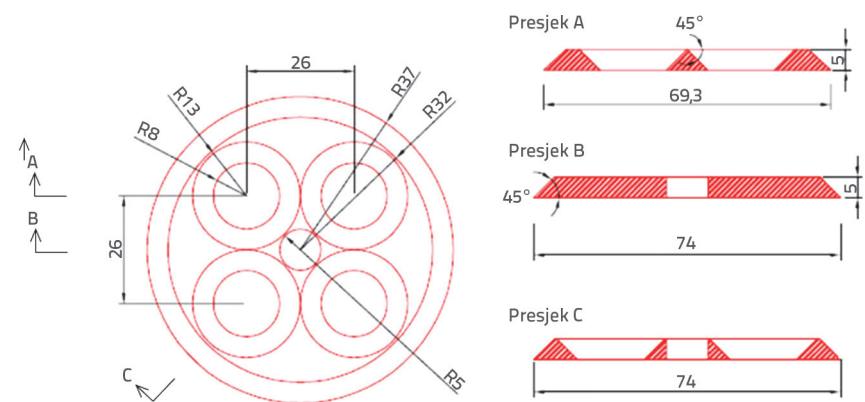
Slika 7. Konfiguracija prototipa sidrišnog elementa: a) četvrtasti oblik; b) kružni oblik

svake rupe na bazi sidra (A_i) je dakle $A_i = 200 \text{ mm}^2$. Promjer baze sidra je $D_b = 74 \text{ mm}$. Stoga je površina baze sidrišta, uključujući unutarnje površine rupa, $A_b = 4298 \text{ mm}^2$. Budući da postoje četiri unutarnje rupe, neto osnovna površina sidrišta bez rupa iznosi $A_n = A_b - 4A_i = 3498 \text{ mm}^2$. U ovom dijelu nije bilo vezivanja za beton.

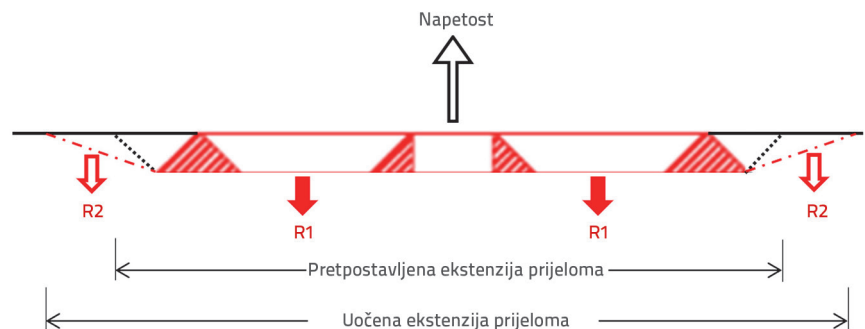
Slika 9. prikazuje nacrt poprečnog presjeka sidrišta, označen kao odjeljak C, slika 8. Mehanika otpora sidrišta sastoji se od dva dijela. Prvi dio, označen s R1, pojavio se u unutarnjim

sustavu i djelomično doprinosi R1, povećavajući deformabilnost sustava i poboljšavajući žilavost sidrišta. Prema tome, obodno sidrište konstrukcijsko je obilježje ugrađeno prije svega kako bi se sustavu dodala duktilnost i povećala njegova čvrstoća. R1 je procijenjen na temelju proračunske vrijednosti za izravnu vlačnu čvrstoću (DTS_d) betonske smjese i unutarnjeg dijela rupe, kao što je prikazano u izrazu (5):

$$R1 = DTS_d \cdot A_i = 5 \text{ MPa} \cdot 200 \text{ mm}^2 = 1000 \text{ N} \quad (5)$$



Slika 8. Tlocrt i poprečni presjeci sidrišnih elemenata s dimenzijama izraženim u milimetrima



Slika 9. Shema poprečnog presjeka sidrišta s naglaskom na pretpostavljene i promatrane stošće prijeloma

rupama kružnog oblika u sidrištu. Te su rupe namjerno uključene u dizajn kako bi se osiguralo ispravno vezivanje sidra s betonom uz minimalno oštećenje betona i kako bi se osiguralo izraženo unutarnje klinasto spajanje koje bi prisililo beton da pukne pod izravnim opterećenjem. Druga komponenta otpora, označena kao R2, uključuje istovremenu prisutnost smicanja i napetosti duž nagnutih ravnina sloma oko vanjskih rubova sidrišta. Pretpostavlja se da se R1 i R2 ne pojavljuju istovremeno. Aktivacija R2 temeljila se na vertikalnom kretanju sidrišta, koje je R1 moralo svladati. Stoga se pretpostavljalo da R2 intervenira u

Stoga je za svaku vrijednost R1 vlačni otpor iznosio 1000 N. Budući da se pretpostavljalo da će se četiri rupe usidriti istovremeno, ukupni unutarnji otpor sidrišta procijenjen je pomoću izraza (6).

$$4 \cdot R1 = 4 \cdot 1000 \text{ N} = 4000 \text{ N} \quad (6)$$

Nakon R1, radi se druga procjena za R2. Pretpostavlja se da ravnina sloma od približno 45° na dnu sidra okružuje perimetar sidrišta. Ispitivanja su pokazala da su ravnine bile nagnute pod kutom od približno 30° u odnosu na horizontalu. Područje sučelja duž pretpostavljenog perimetra loma dano je izrazom (7).

$$A_f = \frac{\pi \cdot (42^2 - 37^2)}{\cos 45} = 1754 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

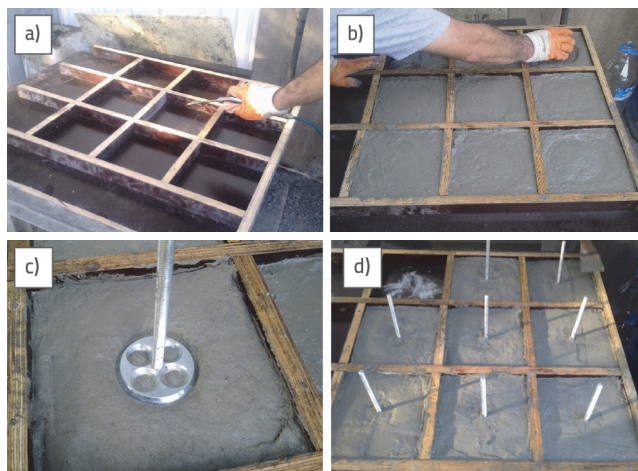
Na temelju izravne vlačne čvrstoće betona i pretpostavljene površine loma, R2 je procijenjen pomoću izraza (8):

$$R2 = DTS_d \cdot A_f = 5 \text{ MPa} \cdot 1754 \text{ mm}^2 = 8770 \text{ N} \quad (8)$$

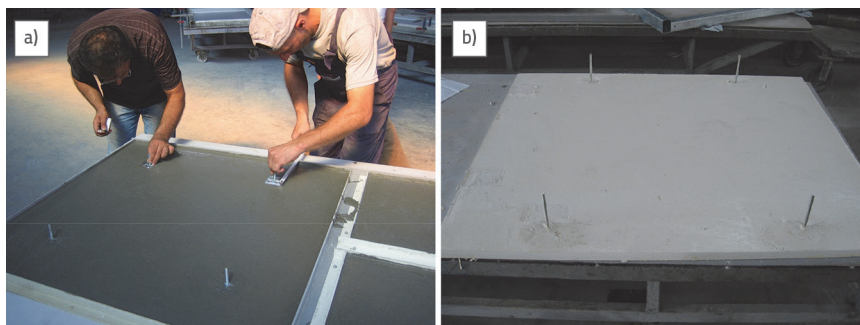
Međutim, to je predstavljalo najveću moguću procjenu za slomljeni stožac jer je cijeli presjek duž pretpostavljene ravnine sloma bio zajedno izložen naprezanju. To je bilo neočekivano jer se očekivanje temeljilo na prisutnosti posmičnih sila uz vlačne sile duž nagnute ravnine sloma oko sidrišta. Slom bi počeo postupno, utječući na područja sučelja uzastopno, a ne kao cjelinu. Stoga se očekivalo da će utjecaj R2 povećati duktilnost iznad najveće vlačne čvrstoće koju je omogućio R1 i donekle povećao R2. U ovom slučaju, očekivani kapacitet sidrišta uslijed opterećenja smatrao se minimalnim $4 \cdot R1 + R2 = R = 4000 \text{ N}$, ako se ne uzme u obzir utjecaj R2. Međutim, ako dio R2 komponente otpora sidrišta može sudjelovati uz $4 \cdot R1$, ukupni otpor čupanja sidrišta vjerojatno će se povećati iznad procijenjenog minimuma od 4000 N. Točno ponašanje projektiranih sidrišta promatrano je nizom testova čupanja.

4. Priprema i ispitivanje uzoraka sidrišta

Za ispitivanje sidrišta upotrijebljeno je osam uzoraka. Slika 10. prikazuje faze proizvodnje uzorka za ispitivanje sidrišta. Kalup za uzorke postavljen je za pripremu uzorka debljine 25 mm, nakon čega je uslijedila ugradnja betona u kalupe veličine $20 \times 20 \text{ cm}$ za svaki uzorak. Veličina četvrtastog uzorka betonske ploče postavljena je tako da održava vrijednost omjera duljine i debljine ispod 10 kako bi se minimizirao učinak savijanja ploče tijekom ispitivanja, ispitala sidrišta pod izravnim opterećenjem i održale dovoljne dimenzije ploče kako bi se omogućio fizički prostor za ispitivanje sidrišta. Na pripremljeni uzorak laganim pritiskom s gornje strane postavljen je sidrišni element. Slika 10.c pokazuje da će prilikom ugradnje sidrišta beton istjecati iz unutarnjih rupa, što će olakšati njegovu ugradnju u beton. Konzistencija svježeg betona održava stabilnost sidrišta. Promjer rupa od 16 mm bio je veći od duljine vlakana od 13 mm, čime se spriječio nepovoljan utjecaj na vlakna prilikom postavljanja.



Slika 10. Faze proizvodnje i ugradnja uzoraka za ispitivanje sidrišta



Slika 11. Ugradnja četverokutnih sidrišnih elemenata u beton ojačan vlaknima

Slika 11. prikazuje proizvodnju ispitnih ploča u punoj veličini u kojima je upotrijebljeno jedno sidro na $0,25 \text{ m}^2$. Ploča na slici 11.a proizvedena je od običnog cementa oznake CEM I, a ploča prikazana na slici 11.b proizvedena je od bijelog cementa za ispitivanja posebnog sustava nosača fasade, što nije obuhvaćeno ovim istraživanjem. Ove brojke pokazuju da su zadovoljeni zahtjevi za sidrište ploča unutar projektirane debljine ploče bez dodatnog ugrađenog materijala koji okružuje točke sidrišta.

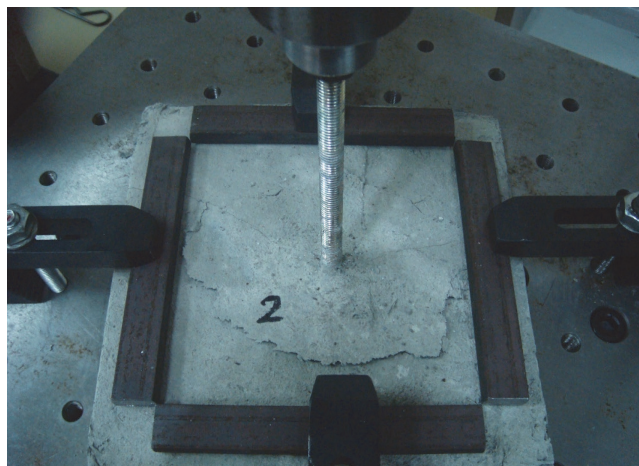
Slika 12. prikazuje postav za vlačna ispitivanja kontrolirana pomakom. Ugrađeni sidrišni elementi imaju debljinu od 5 mm. Sidrišta su ispitana pri brzini pomaka od 1 mm/min upotrebom uređaja za mjerenje sile s maksimalnim kapacitetom od 22,25 kN.

Slika 13. prikazuje krupni plan ispitivanja sidrišta koji prikazuje neispravno stanje sidrišta.



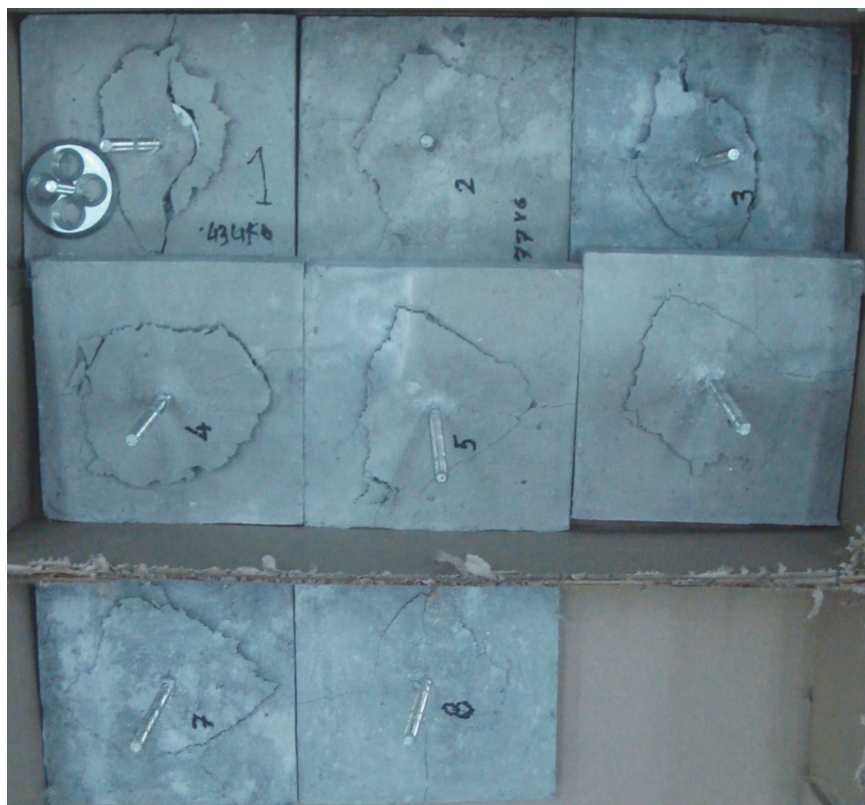
Slika 12. Ispitivanje vlačne čvrstoće ugrađenog sidrišnog elementa

Slika 14. prikazuje uzorke nakon ispitivanja sidrišta na čupanje. Sidra se nisu iščupala iz ploče kada je došlo do otkazivanja. Umjesto toga, sidrišta su ostala usidrena u okolnom betonu i prisilila su izravan vlačni lom unutarnjih stožaca, nakon čega se periferni volumen betona odvojio od betonskih ploča otprilike u obliku stošca, kao što je i predviđeno.



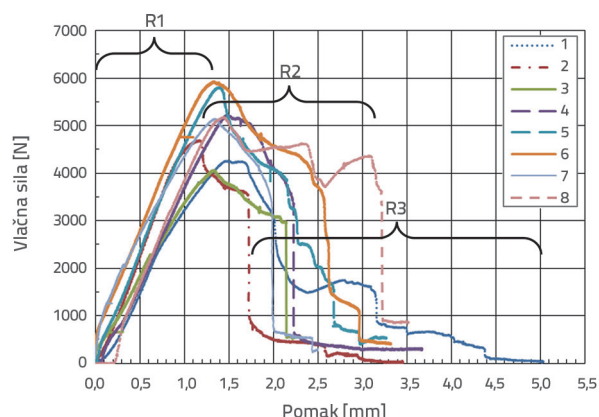
Slika 13. Prikaz vlačnog ispitivanja uzorka do sloma

Slika 15. prikazuje odziv sile i progiba ugrađenih sidrišta. Nakon početnog linearnog i elastičnog odgovora, sidrišta su pokazala očekivanu duktilnost iznad postignutih maksimalnih sila do sloma. Srednja vlačna čvrstoća osam ispitanih sidrišta je $F_t = 5$ kN. Sve sile sidrenja bile su iznad projektne čvrstoće od $R1 = 4$ kN. Dodatna čvrstoća veća od $R1$ pripisana je promjenjivoj vlačnoj čvrstoći kojoj doprinosi $R2$. Međutim, učinak klina nastalog oko oboda sidra uglavnom je pridonio duktilnosti koja se opaža nakon pomaka sidra pri najvećim vlačnim silama. Ono što bi inače završilo s najvećom silom pri danom pomaku,



Slika 14. Prikaz osam uzoraka nakon ispitivanja sidrišta na čupanje (vlačno ispitivanje)

izvedeno je mnogo dalje, iako s nižim, ali održivim otporom povlačenja.



Slika 15. Dijagram sila - pomak ispitanih uzoraka do sloma

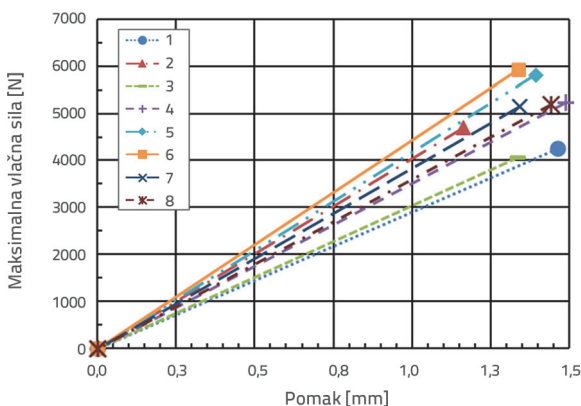
Za sve ispitane uzorke uočena su tri izrazito različita područja sile i pomaka sidrišta. Prvo područje, $R1$, pokazalo je izrazito linearno ponašanje do najveće vrijednosti sile za sve uzorke. Postojanost omjera sile i pomaka održavana je do najveće sile. Bilo je malih odstupanja od ove linearnosti pri pomaku od 0,75 mm uzoraka 1 i 3. Uzorci 3, 5, 6 i 7 imali su obilježja vrlo velike krutosti prije progiba od približno 0,1 mm nakon čega je uslijedilo niže, ali linearno ponašanje sile i pomaka do najveće vlačne sile. Uzorci 4 i 8 pokazuju lagan pad s 0,1 na 0,15 mm nakon čega

je uslijedilo aktiviranje linearno-elastične zone krutosti nakon progiba od približno 0,3 mm.

Najveće postignute vlačne sile su između 4 i 6 kN s pomacima između 1,2 i 1,5 mm. Izvan ovih granica pomaka, drugo područje sile i pomaka, $R2$, pokazuje da se čvrstoća sidrenja smanjuje za do 40 % njihovih najvećih vrijednosti za pomake između 1,7 i 2,4 mm. Nagli prekid ovog drugog raspona ponašanja dogodio se postupno u uzorcima 1 i 5, za razliku od ostalih sedam uzoraka. Samo jedan uzorak, uzorak 8, pokazao je povećanu otpornost na drugo ponašanje do pomaka od 3,2 mm. Nakon drugog područja, treće područje sile i progiba ($R3$), koje počinje na približno 1,7 mm za uzorak 2 i na 2 do 3,2 mm za uzorke 1, 3, 4, 5, 6, 7, i 8, pokazali su značajno manju sidrišnu čvrstoću. Međutim, uočen je određeni otpor i izdržljivost uslijed klizanja vlakana i povezanih progiba sidrišta, u rasponu od 3,3 do 5 mm do sloma. Slika 15. prikazuje ova područja za osam ispitanih uzoraka. Na slici je jasno vidljivo da je komponenta $R1$ osigurala čvrstoću. Ovo je više ili

manje dopunjeno komponentom R2, koja je primarno bila odgovorna za duktilnost promatranu izvan pomaka postignutog na razini vlačne čvrstoće. Stoga, slom sidara nije bilo nagli i događao se postupno.

Slika 16. prikazuje najveće sile koje postižu sidrišta i njihove odgovarajuće pomake. Najveća postignuta vlačna sila izvlačenja iznosi od 4060 do 5928 N. Nagibi vrijednosti sile i pomaka dali su vrijednosti vlačne krutosti u rasponu od 2911 do 4431 N/mm. Rezultati su pokazali srednju vlačnu čvrstoću od 5 kN i srednju vlačnu krutost od 3,7 kN/mm. Svaki od ispitanih uzoraka premašio je procijenjenu najmanju vlačnu čvrstoću konstrukcije od 4 kN.



Slika 16. Linearne i elastične karakteristike sile i pomaka ispitanih uzoraka do najvećih granica naprezanja

5. Ispitivanje duktilnosti i kapacitet apsorpcije energije sidara

Napuknuti rubovi uzoraka pokazuju kružne do poligonalne obodne karakteristike. Drugim riječima, obrasci pucanja nisu se značajno razlikovali jedni od drugih, što upućuje na homogenost u ponašanju sidrišta s obzirom na vlačne sile. Svako napuknuto sidrište, osim prvog koje se raspalo, digitalno je fotografirano, a fotografije su prebačene u program za računalno potpomognuto projektiranje, gdje su izdvojeni obrisi, kao što je prikazano na slici 17. U tablici 3. navedene su izmjerene površine prijeloma.

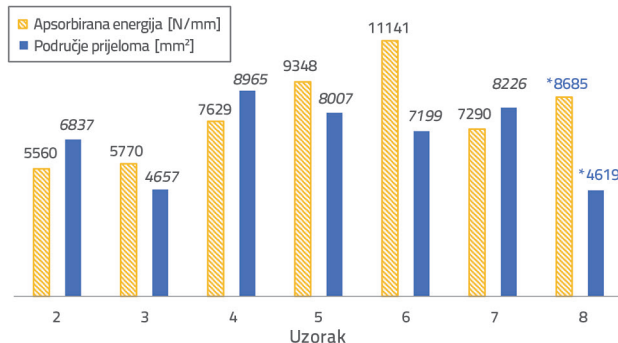


Slika 17. Obrisi slomljenog sidra za uzorke 2 do 8

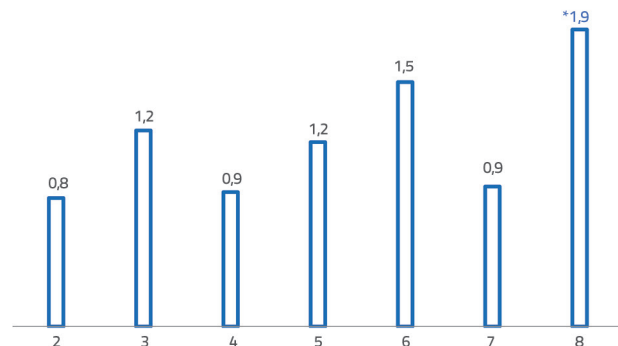
Tablica 3. Procijenjena područja sučelja napuknutih površina konusa betona sidrišta

Uzorak	2	3	4	5	6	7	8
Površina prijeloma [mm ²]	6837	4657	8965	8007	7199	8226	4619

Slika 18. prikazuje grafikon sa stupcima procijenjenih apsorbiranih energija i područja loma za svako sidrište, a slika 19. prikazuje izračunanu apsorpciju energije po jedinici površine loma. Rezultati za uzorak 8 razmatraju se u ovom odjeljku.



Slika 18. Usporedba apsorbirane energije i površina loma za svaki uzorak



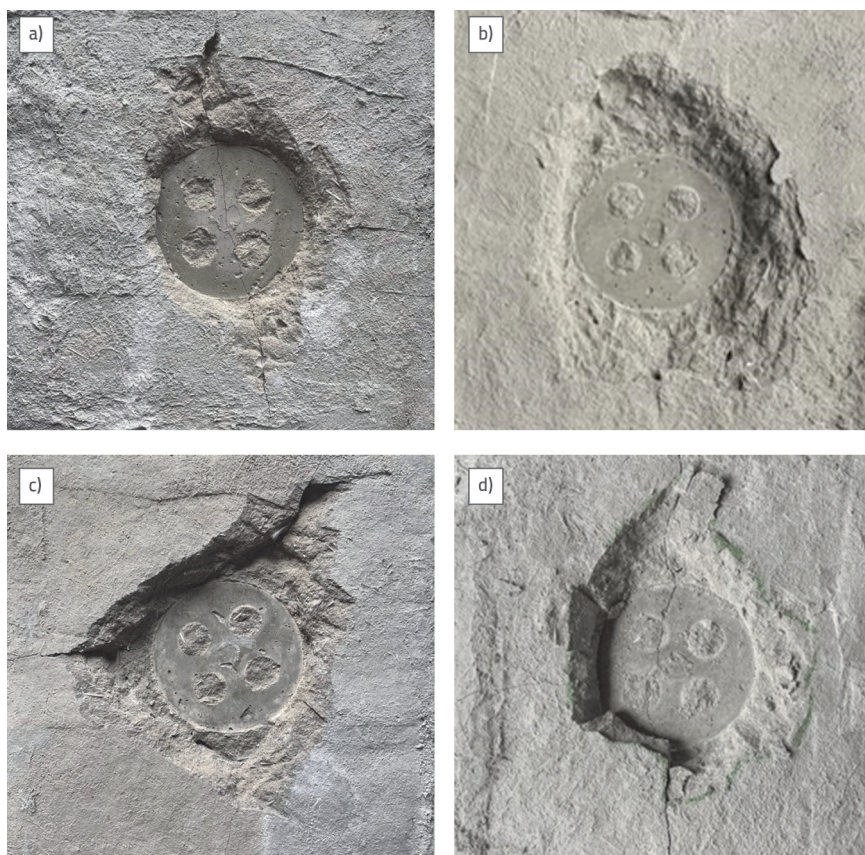
Slika 19. Apsorbirana energija po jedinici površine loma q (Nmm/mm²)

Uzorci 2, 3, 4, 5 i 7 pokazuju prosjek od 1 N/mm apsorbirane energije po jedinici površine. Uzorci 6 i 8 apsorbirali su slične energije unatoč nižoj površini loma uzorka 8, što je rezultiralo većom apsorpcijom energije po jedinici površine loma. To je zbog neobičnog dijagrama sile i pomaka uzorka 8 prikazanog na slici 15. Vlačna otpornost uzorka br. 8 naglo se povećala

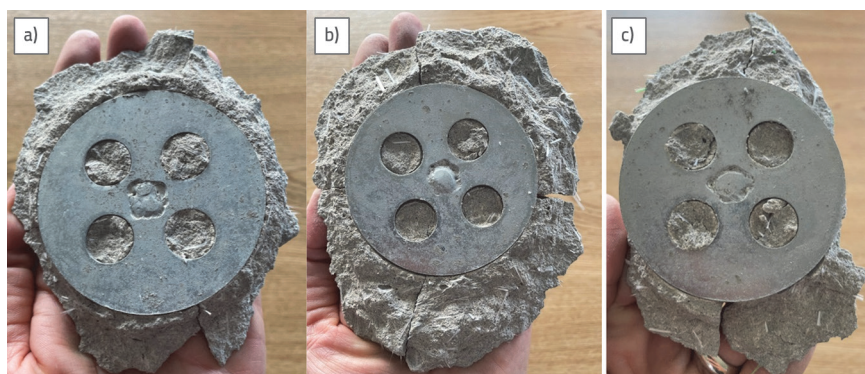
pri vrijednosti pomaka od 2,5 mm, gdje je došlo do novih intervencija vlakana, i nastavila se do pomaka od oko 3 mm, nakon čega se vlačna otpornost značajno smanjila. Ova dodatna duktilnost povećava kapacitet apsorpcije energije. Ova vrsta vlačnog opterećenja primijećena je samo u uzorku 8. Da nije promatrano ponašanje nakon progiba od 2,5 mm i da je otpor bio prekinut na vrijednosti pomaka od 2,5 mm, energija koju je ovaj uzorak apsorbirao smanjila bi se ispod 8685 N/mm, a apsorbirana energija po jedinici površine loma smanjila bi se na <1,9. Još jedno zanimljivo otkriće testa čupanja uzorka 8 bila je značajna apsorpcija energije u usporedbi s relativno malom površinom loma od 4619 mm². U tom je kontekstu uzorak 8 bio

vrlo sličan uzorku 3 u smislu površine loma, ali je imao gotovo 50 % veću apsorpciju energije i 25 % veću vlačnu čvrstoću. Uzorak 8 prikazan je u gornjim slikama kako bi se istaknula obilježja ponašanja sidrišnog sustava ojačanog vlaknima.

Slike 20.a do 20.d prikazuju slomljene temeljne ploče uzoraka 3, 4, 5 i 8. Unutarnje sidrišne točke su vidljive, a ugrađene rupe jasno pokazuju promjer slomljenog betona. Konusno širenje područja loma bilo je promjenjivo, kao što je prikazano na slici 17., i uglavnom je pridonijelo duktilnosti sidrišta. Nažalost, drugi uzorci postali su beskorisni za fotografiranje nakon pogrešnog rukovanja kada su ispalili i ozbiljno oštećeni tijekom premještanja uzoraka.



Slika 20. Uzorci pukotina unutar slomljenih temeljnih ploča uzoraka: a) uzorak 3; b) uzorak 4; c) uzorak 5; d) uzorak 8



Slika 21. Krupni kadar slomljenih sidrišta u uzorcima: a) uzorak 3; b) uzorak 4; c) uzorak 8

Slika 21. prikazuje krupni plan za uzorke sidrišta 3, 4 i 8. I ovdje je unutarnji klin pukao uslijed izravne napetosti, a lom oko vanjskog oboda sidrišta bio je očit.

6. Zaključak

Ovo istraživanje uključivalo je konstrukciju sidrišnog elementa za tanke betonske ploče ojačane vlaknima koji su osiguravali čvrstoću i duktilnost unutar ograničene dubine ugradnje od 5 mm. Geometrijske vrijednosti sidrišnih elemenata utvrđene su na temelju mehaničkih svojstava ugrađenih betonskih elemenata ojačanih vlaknima. Ispitivanja su potvrdila načela projektiranja na kojima se temelji konstrukcija sidrišta s dva klina, koja ponajprije osigurava čvrstoću putem unutarnjih klinova i duktilnost putem obodnih klinova. Konzistentnost ponašanja klina i odziva na napetost i rezultirajuće vrijednosti vlačne čvrstoće pokazale su se korisnima u osiguravanju potrebnih sila sidrenja za tanke fasadne elemente protiv negativnih pritisaka vjetra. Činjenica da je ograničena konstrukcijska debljina ploča dovoljna za sidrenje predloženim mehanizmom za sidrenje podupire cilj postizanja smanjene debljine ploča upotrebom suvremenih materijala visoke čvrstoće. Sidrišta su osigurala srednju vlačnu čvrstoću od 5 kN, što je 25 % više od vlačne čvrstoće od 4 kN. Ispitivanja su pokazala da konstrukcija sidrišta pruža znatnu duktilnost s kapacitetom apsorpcije energije sa srednjom vrijednošću od 1 N/mm, isključujući uzorak 8.

Iako je ovo istraživanje potkrijepilo ideju i potvrdilo hipotetsko ponašanje

konstruiranog sidrišta, ispitivanja konstrukcija provedena su približno šest tjedana nakon lijevanja uzoraka. Dostatnost projektiranih sidrišta također treba s vremenom ispitati, osobito s obzirom na učinke skupljanja i puzanja betona, što može dovesti do pucanja oko ograničenog područja ugradnje sidrišta. Moguće površinsko pucanje uslijed skupljanja, puzanja i promjenama u temperaturi može nepovoljno utjecati na sidrenje postignuto unutar predloženih ograničenih dubina. Ako se ne uzme u obzir, duktilnost sidrišta i čvrstoća sidrišta mogu se s vremenom smanjiti. U tu svrhu, moguća druga faza za buduća istraživanja mogla bi uključivati niz vlačnih ispitivanja unutar određenih dugoročnih intervala nakon proizvodnje uzoraka.

Drugi skup testova potrebnih za napredovanje ovog istraživanja uključuje ispitivanje sustava sidrenja pod usklađenim silama na različitim frekvencijama. Ograničena ugradnja zahtijeva

istraživanje odnosa između sidrišta i ugrađenog betona u smislu zamora betona i smanjenja duktilnosti. Učinak preokreta sila i frekvencija sila na ponašanje napetosti i progiba predloženog sidrišta mora se temeljito proučiti prije konačnog dizajna sidrišta i bilo kojeg drugog dizajna sidrišta.

Mogu se poduzeti razne mjere kako bi se poboljšala otpornost sidra na učinak vremena. Prvo, sidrišne zone takvih ploča trebaju biti stvrđnute i zaštićene od štetnih učinaka curenja vode, neovisno o zonama drugih ploča. Stoga bi područja sidrenja trebala zadržati svoju količinu vode dok se potpuno ne stvrđnu, a zatim bi se dopunila tekućim mineralnim dodacima kako bi bila potpuno otporna na vodu i vlagu. Drugo, sidrišna zona poboljšana je rešetkom od tkanine ojačane vlaknima blizu površine ploče. Ove dvije jednostavne mjere mogu zaštititi sidrišnu zonu od štetnih utjecaja skupljanja, puzanja, promjene temperature i ponavljanih djelovanja sila.

LITERATURA

- [1] Zollo, F.R.: Fibre-reinforced concrete: an overview after 30 years of development, *Cement and Concrete Composites*, 19 (1997) 2, pp. 107-122.
- [3] Zhao, C., Zhu, Z., Guo, Q., Zhan, Y., Zhao, R.: Research on fiber reinforced concrete and its performance prediction method and mix design method, *Construction and Building Materials*, 365 (2023).
- [4] Practical Design Guide for Glass Fibre Reinforced Concrete (GRC) Using Limit State Theory. The International Glassfibre Reinforced Concrete Association (GRCA), 2018.
- [5] Stathopoulos, T., Zhu, X.: Wind pressures on building with appurtenances, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 31 (1988) 2-3, pp. 265-281.
- [6] Grosso, M.: Wind pressure distribution around buildings: a parametrical model., *Energy and Buildings*, 18 (1992) 2, pp. 101-131.
- [7] Tóth, M., Bokor, B., Sharma, A.: Anchorage in steel fiber reinforced concrete – concept, experimental evidence and design recommendations for concrete cone and concrete edge breakout failure modes, *Engineering Structures*, 181 (2019), pp. 60-75.
- [8] Anil, Ö., Belgin, Ç.M.: Anchorages Effects on CFRP-to-concrete Bond Strength, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29 (2010) 2-3, pp. 539-557.
- [9] Shin, H., Kim, K., Oh, T., Yoo, D.: Effects of fiber type and specimen thickness on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to uniaxial and biaxial stresses, *Case Studies in Construction Materials*, 15 (2021).
- [10] EN 1170-5 Precast concrete products-test method for glass fibre reinforced cement-part 5: measuring bending strength, Complete bending test, method, 24.03.1999.
- [11] Le, A.T., Hoang, A.L.: Comparisons of flexural, split tensile, double punch, and direct tension tests on high-performance concrete reinforced with different fiber types, *Case Studies in Construction Materials*, 19 (2023).
- [12] Gao, D., Lv, M., Wei, D., Pang, Y., Tang, J.: Trilinear tensile stress-strain constitutive model for high ductility cementitious composite with totally recycle fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 319 (2022).
- [13] Zheng, D., Wu, R., Sufian, M., Kahla, N.B., Atig, M., Deifalla, A.F., Accouche, O., Azab, M.: Flexural Strength Prediction of Steel Fiber-Reinforced Concrete Using Artificial Intelligence, *Materials*, 15 (2022) 5194.
- [14] Hu, H., Wang, Z., Figueiredo, F.P., Papastergiou, P., Guadagnini, M., Pilakoutas, K.: Postcracking tensile behavior of blended steel fiber-reinforced concrete, *Structural Concrete*, 20 (2019) 2, pp. 707-719.
- [15] Pekgokgoz, R.K., Avcil, F.: Effect of steel fibres on reinforced concrete beam-column joints under reversed cyclic loading, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 12, pp. 1185-1194, <https://doi.org/10.14256/JCE.3092.2020>
- [16] Zerbino, R., Tobes, J.M., Bossio, M.E., Giaccio, G.: On the orientation of fibers in structural members fabricated with self-compacting fiber-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 34 (2012) 2, pp. 191-200.
- [17] EN 206: Concrete – Specification, performance, production and conformity, 2013.
- [18] EN 206 Conformity testing for concrete strength in compression, *Procedia Engineering*, 171 (2017), pp. 227-237.
- [19] Oettel, V., Schulz, M., Haist, M.: Empirical approach for the residual flexural tensile strength of steel fiber-reinforced concrete based on notched three-point bending tests, *Structural Concrete*, 23 (202), pp. 993-1004.
- [20] Natarajan, S., Murugesan, A., Dhanapal, J., Narayanan, A.: Glass fiber reinforced ultra-high strength concrete with silica fume, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 10, pp. 849-856, <https://doi.org/10.14256/JCE.3431.2021>
- [21] Choi, D., Hong, K., Ochirbud, M. et al.: Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) and Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) with Recycled Sand. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17 (2023) 67.
- [22] Istanbul Metropolitan Municipality, Istanbul High Rise Buildings Wind Load Specification, Kandilli Observatory and Seismic Research Institute, Boğaziçi University, August 2009.