

Primljen / Received: 18.3.2016.

Ispravljen / Corrected: 15.7.2016.

Prihvaćen / Accepted: 8.8.2016.

Dostupno online / Available online: 10.11.2016.

Ponašanje predgotovljenih betonskih greda prednapetih pomoću CFRP užadi

Autor:



Doc.dr.sc. **Tuğçe Sevil Yaman**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Mersin, Turska
Državno sveučilište North Carolina, SAD
tusevil@gmail.com

Izvorni znanstveni rad

Tuğçe Sevil Yaman

Ponašanje predgotovljenih betonskih greda prednapetih pomoću CFRP užadi

Korozija predstavlja ozbiljan problem u otežanim uvjetima morskog okoliša, i to naročito kod mostova. Rad istražuje primjenu užadi izrađenih od polimera armiranog ugljičnim vlaknima (eng. *carbon fiber reinforced polymer* ili CFRP) za prednapinjanje predgotovljenih betonskih nosača. Istraživanje uključuje proces prednapinjanja pomoću uobičajenih preša koje se koriste u industriji predgotovljenih proizvoda. Provedena su ispitivanja na savijanje na prednapetim betonskim T-nosačima. Analiziran je postupak proračuna, izvedba nosača, postupak ispitivanja do sloma uz razmatranje mehanizma sloma. Rezultati ispitivanja uspoređeni su sa smjernicama ACI 318.

Ključne riječi:

CFRP uže, betonski nosač, prednapinjanje, T-greda, ispitivanje na savijanje

Original scientific paper

Tuğçe Sevil Yaman

Behaviour of precast concrete beams prestressed with CFRP strands

Corrosion presents a serious problem in severe marine environments, especially for bridges. This paper explores the use of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) strands for prestressing precast concrete girders. The research includes a practical prestressing process using the prestressing jacks normally applied in the precast industry. Bending tests are made on prestressed concrete T-beams (scaled models of typical T-section). The design and casting processes, and the test set-up used to load the beams up to failure, are discussed, and failure mechanisms are reviewed. Test results are compared with the ACI 318 guidelines.

Ključne riječi:

CFRP strand, concrete girder, prestressing, T-beam, bending test

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Tuğçe Sevil Yaman

Verhalten vorgefertigter mit CFRP-Seilen vorgespannter Betonträger

Korrosion stellt bei erschwerten Bedingungen durch Meerwassereinflüsse, insbesondere bei Brücken, ein ernstes Problem dar. Diese Arbeit untersucht die Anwendung von Seilen aus kohlefaserverstärktem Polymer (eng. *carbon fiber reinforced polymer* oder CFRP) zur Vorspannung vorgefertigter Betonträger. Die Untersuchungen umfassen den Vorspannvorgang mit herkömmlichen Pressen, die bei der Herstellung vorgefertigter Elemente eingesetzt werden. Es wurden Biegeversuche an vorgespannten T-Balken aus Beton durchgeführt. Die Resultate wurden den Richtlinien gemäß ACI 318 gegenübergestellt.

Ključne riječi:

CFRP-Seil, Betonträger, Vorspannung, T-Balken, Biegeversuche

1. Uvod

Trajnost je jedno od najvažnijih pitanja u građevinskoj industriji, a na trajnost armiranobetonskih elemenata negativno utječe korozija čelika. Dobra opcija za zamjenu primjene čelika u betonu predstavljaju polimeri armirani vlaknima (eng. *fiber reinforced polymer - FRP*). Primjena takvih proizvoda je započela u dijelu armiranog betona gdje se primjenom armature od FRP-a umjesto čelika uklanja problem korozije. Jedna od mogućnosti su i kompozitni kabeli od ugljičnih vlakana (eng. *carbon fiber composite cable - CFCC*).

CFCC tvore PAN (poliakrilonitril) od neprekidnih ugljičnih vlakana, epoksidne smole kao vezivni materijal te zaštitni vanjski omotač. Osnovna svojstva CFCC-a su slična onima od polimera armiranog ugljičnim vlaknima (eng. *carbon fiber reinforced polymer - CFRP*). Konfiguracijska svojstva su mu kao kod konvencionalne čelične žice. CFCC ima razne prednosti u odnosu na čeličnu užad, primjerice ima odličnu otpornost na koroziju, malu težinu, visoku čvrstoću na vlak, visok modul elastičnosti u vlačnom području, vrlo dobru otpornost na zamor prilikom vlačnih naprezanja te fleksibilnost [1].

Budući da materijal predstavlja relativno novu tehnologiju, nužno je njegovo detaljno ispitivanje. Rezultati ispitivanja Benmokrana i dr. [2] su pokazali da se produženjem trajanja uranjanja pri višim temperaturama neznatno utjecalo na čvrstoće CFCC uzoraka. Da bi se ispitao učinak alkalnog okruženja pri izlaganju različitim temperaturama i podnošenje različitih razina vlačnog opterećenja, nužna je karakterizacija dugotrajne trajnosti CFCC-a. Degradacija FRP kompozita može se pojaviti pri izlaganju učincima okoline poput vlage, alkalnosti, požaru i/ili fizičkim učincima poput zaostalog naprezanja i zamora. Do sada nije bio u potpunosti ispitivan sinergijski učinak uvjetovanja okoline i ugrađenog naprezanja na dugoročnu trajnost FRP-a. Cilj je ovog velikog istraživačkog projekta odrediti degradacijske mehanizme i procijeniti uporabni vijek FRP armature za beton. Ovaj rad predstavlja prvu fazu istraživačkog projekta koja određuje kritične faktore naprezanja i sigurnosti za korištenje CFCC-a kao armature otporne na koroziju u prednapetim predgotovljenim betonskim elementima (kolničke ploče mostova i piloti) unutar otežanih uvjeta morskog okoliša. U radu se opisuju ispitivanja na vlak CFCC uzoraka, faze pripreme uzoraka prednapetih predgotovljenih betonskih T-greda, uključujući proces CFCC prednapinjanja, proračuna, izradu 12 CFCC uzoraka armiranih greda, proces ispitivanja i opremu korištenu za ispitivanje na savijanje dvaju predgotovljenih kontrolnih uzoraka T-grede armiranih CFCC-om. Detaljno je razmotreno ponašanje greda na savijanje, a rezultati ispitivanja uspoređeni su sa smjericama "ACI 318 Code".

2. Dosadašnja istraživanja

Enomoto i dr. [3] opisali su razvoj, korištenje i primjenu CFCC. Predstavili su i istraživanja o korištenju CFCC-a u mostovima te razmatrali produljenje vijeka trajanja prednapetih betonskih

mostova primjenom CFCC kabela i armature. Spominju jednu od prvih primjena CFCC kao kabela za prednapinjanje u prednapetom betonskom mostu na svijetu - most Shinmiya u Japanu 1988. godine. Taj je most bio oštećen korozijom zbog soli i trebalo ga je zamijeniti, iako od izgradnje nije prošlo ni dvanaest godina. Umjesto njega je izgrađen novi most gdje se CFCC koristio radi sprječavanja štete od soli. Novi most je u funkciji više od 23 godine i nema vidljivih promjena u svojim svojstvima.

Rizkalla i Tadros [4] su opisali proračun i tehnologiju građenja prvog prednapetog mosta s CFRP kablama na autocesti u Kanadi. Most je statičkog sustava kontinuiranog nosača preko dva raspona, poprečnog T-presjeka (13 nosača u svakom rasponu) od predgotovljenih prednapetih betonskih greda.

CFCC, koji je proizvela tvrtka Tokyo Rope Manufacturing Co. d.o.o. iz Japana, primijenjen je za prednapinjanje četiri nosača, a kabeli koje je proizvela tvrtka Mitsubishi Kasei iz Japana služili su za prednapinjanje preostala dva nosača. Eksperimentalni program je izveo Abdelrahman i dr. [5] radi ispitivanja ponašanja četiri prednapeta betonska T-nosača s istim odnosom raspon - visina kao i nosači na mostu. Nosači su ispitani pod statičkim i cikličkim opterećenjima kako bi se ispitala različita ograničenja ponašanja, maksimalni kapacitet i oblici sloma uzorka.

Grace i dr. [6] objasnili su procedure proračuna i izgradnje Bridge Street mosta, prednapetog betonskog mosta u SAD-u s CFRP kablama. Projekt se sastojao od dva paralelna mosta, A i B. Obje su konstrukcije imale po tri raspona. Konstrukcija A se sastojala od nove potkonstrukcije (donji ustroj mosta) i nove natkonstrukcije (gornji ustroj mosta). Imala je pet jednako udaljenih predgotovljenih betonskih I-greda u svakom od svoja tri raspona. Duž raspona postavljena je kontinuirana betonska ploča. Konstrukcija B sastoji se od četiri prednapeta nosača dvostrukog T-presjeka u svakom rasponu i od betonske ploče koja nije kontinuirana. Grace i dr. [7] su napravili eksperimentalno ispitivanje CFRP/CFCC DT užadi u punoj veličini kako bi jamčili nosivost mosta. Uže je imalo isti proračun kao i užad na mostu. Radi simulacije radnih svojstava užadi mosta, napravljeno je i ispitivanje na savijanje u četiri točke. Uz to su napravljene teoretski proračuni. Ispitivani nosač pokazao je veliku rezervu nosivosti iznad uporabnog (projektiranog) opterećenja. Analitički i eksperimentalni rezultati su bili slični, naročito kod uporabnog opterećenja.

Svojstva prionjivosti CFCC užadi korištenih za prednapinjanje betonskih greda istraživana su prema eksperimentalnom programu Domenika [8]. Svojstva prionjivosti proučavana su mjerenjem duljine sidrenja i preklapanja armature te određivanjem pripadajuće čvrstoće prionjivosti. Ispitivano je deset CFCC prednapetih betonskih greda varirajući položaj sile u rasponu. Razvijene su jednadžbe za predviđanje položaja i duljina sidrenja kod CFCC-a. Primijećeno je da su rezultati jednadžbe u savršenoj korelaciji s izmjerenim vrijednostima. Fam i dr. [9] su ispitivali I-nosače radi ponašanja CFRP-a u ulozi prednapete i poprečne armature za betonske mostove. Ispitivan je učinak konfiguracije i veličine CFRP vilica na ponašanje uslijed

posmične sile te njihov utjecaj na posmik između nosača i betonske ploče na njima.

Razmatran je i učinak trakastog postavljanja CFRP prednapetih kabela. Prednapete CFRP grede pokazale su sličnu krutost kao kod prednapetih greda s čeličnom užadi. Zaključeno je da trakasto postavljanje CFRP kabela nije utjecalo na kapacitet savijanja, ali bi se mogao pojaviti lom pri savijanju na mjestima skretanja kabela. Nije primijećeno klizanje prednapete armature. Eksperimentalno istraživanje ponašanja pri savijanju na dva identična modela sandučastog grednog mosta armiranog i prednapetog različitim vrstama CFRP tetiva/užadi proveli su Grace i dr. [10]. Prvi model je bio armiran i prednapet pomoću CFRP-DCI kabela za prednapinjanje, a drugi pomoću CFCC užadi. Na temelju rezultata ispitivanja zaključeno je da su oba mosta pokazala identično ponašanje pri savijanju do pojave prvih pukotina, tip sloma i varijacije u silama prednapinjanja.

Grace i dr. [11] ispitivali su izvedbu savijanja na tri betonska sandučasta gredna modela mosta koja su bila prednapeta i armirana CFCC-om. Istraživanje je primarno usmjereno na učinke primjene nepovezanog uzdužnog postnapinjanja. Rezultati ispitivanja su pokazali da je veća ukupna prednapeta sila odgodila razvoj pukotina te smanjila njihov broj i veličinu. Također, smanjila je i količinu zaostalog pomaka. Primijećeno je da bi elementi s većom ukupnom prednapetom silom mogli iznenada otkazati. Uz to, više je neelastične energije disipirano tijekom progresivnih nego kod naglih lomova. Zaključeno je i da se učinak prednapetosti pri prijenosu i čvrstoća betona moraju uzeti u obzir prilikom procjene duljine prijenosa.

Grace i dr. [12] su proveli eksperimentalno i analitičko istraživanje ponašanja pri savijanju dvostrukog T-nosača spregnutog s pločom, armiranog i prednapetog različitim vrstama FRP materijala. Rezultati ispitivanja su pokazali da su radna svojstva armiranih greda s CFRP kabelima ili CFCC užadi usporediva s onima kontrolne grede, prednapete i armirane konvencionalnom čeličnom užadi i šipkama, i to za granično stanje uporabivosti i granično stanje nosivosti. Ispitivane grede su pokazale visoku nosivost s velikim progibima i značajnom količinom apsorbirane energije prije loma. Zaključak je bio da se FRP-om armirani T-nosači u sprezi s kolničkom pločom mogu sigurno primijeniti kako bi se poboljšala radna svojstva te produžio rok trajanja mostova.

Poprečno ponašanje prednapetih, prethodno spomenutih, T-greda koje su imale CFCC vilice ispitivali su Grace i dr. [13]. Svrha istraživanja je bio učinak poprečnog odnosa "raspon - dubina" i transversalni tip armature na poprečnu nosivost. Četiri grede, armirane i prednapete CFCC-om ispitivane su pod poprečnim opterećenjem. Polovica raspona svake grede je imala CFCC užad, a sljedeća polovica bila je armirana čeličnom užadi. Krajevi greda s CFCC kabelima su se slomili ili zbog mrežastog lomljenja betona ili loma zbog tlačnog naprezanja u gornjoj zoni. S druge strane, krajevi greda s čeličnim kabelima su se slomili zbog poprečnog moda istezanja. Zaključeno je da se CFCC kabeli mogu koristiti kao nekorozivna opcija umjesto čeličnih kabela kod nosača mostova.

Roddenberry i dr. [14] su proveli eksperimentalno istraživanje radi ispitivanja prikladnosti korištenja CFCC materijala umjesto standardnih čeličnih užadi. Pet kvadratnih prednapetih betonskih pilota s CFCC užadi ispitivano je radi utvrđivanja radnog učinka CFCC-a. Duljina prijenosa je promatrana za svaki pilot te je uspoređena s jednadžbama za predviđanje kako bi se interpretiralo vezivno ponašanje CFCC-a. Uz to, napravljeno je i ispitivanje duljine sidrenja te ispitivanje na savijanje kako bi se detaljnije ispitao učinak CFCC-a.

Na kraju su dva pilota otpremljena na mjesto u blizini čeličnih prednapetih betonskih pilota te se promatralo njihovo ponašanje. Rezultati ispitivanja su pokazali da je ponašanje CFCC prednapetih pilota bilo usporedivo s onima od čelika. Zaključeno je da bi primjena CFCC užadi za prednapinjanje mogla smanjiti potrebe održavanja mostova te im produžiti životni vijek.

Shapack [15] je izveo istraživanje radi analize i proračuna olakšanih (šupljih) ploča prednapetih pomoću CFRP užadi i armiranih GFRP sponama. Napravljena su ispitivanja na vlak kako bi se potvrdila svojstva materijala koja su dali proizvođači FRP-a. Gredni uzorci su ispitivani da bi se usporedila svojstva vezivanja CFRP i čelične užadi. Uzorci ispitani na savijanje i poprečnu silu ispitani su radi određivanja učinka FRP-om armiranih olakšanih ploča na savijanje i posmik u odnosu na one armiranih čelikom. Rezultati ispitivanja su pokazali da FRP-om armirane šuplje ploče pokazuju isti ili bolji radni učinak u monotonom i poprečnom savijanju u usporedbi s pločama armiranih čelikom. Zaključeno je da bi, prema radnom učinku koji su pokazali dijelovi armirani s FRP-om te prema trajnosti FRP armature, predloženi proračun šupljih ploča bio učinkovito i održivo rješenje.

3. Opis materijala

CFCC užad je odabrana za ekperimentalni program zbog svoje otpornosti na koroziju. U prvom koraku projekta, kao armature za prednapinjanje prethodno izrađenih betonskih T-greda upotrijebljena je CFCC užad promjera 15,20 mm. Užad je proizvedena u Tokyo Rope Manufacturing Co. d.o.o. iz Japana. CFCC uže prikazano na slici 1. zapravo je pleteni kabel napravljen od uvijenih ugljičnih žica.



Slika 1. Prikaz CFCC užeta za prednapinjanje

Tablica 1. Standardne specifikacije CFCC užadi [16]

Presjek	Oznaka	Promjer [mm]	Efektivna površina poprečnog presjeka [mm ²]	Zajamčeno opterećenje do loma [kN]	Jedinična težina po dužinskom metru [g/m]	Modul elastičnosti [kN/mm ²]	Kritična vlačna deformacija [%]
7 žica	1x7	15,20	115,60	270,0	221,0	155,0	1,51

Pojedinačne žice su izrađene od ugljičnih vlakana i epoksidne smole. Uz to, svaka je žica bila obložena zaštitnim slojem poliesterske smole. Geometrija od sedam uvijenih žica od CFCC-a poboljšava njihovo prianjanje betonu. Standardne specifikacije proizvođača o CFCC užadi promjera 15,20 mm su prikazane u tablici 1.

4. Ispitivanje vlačne čvrstoće CFCC užadi

Shapack [15] je ispitivao šest uzoraka CFCC prednapete užadi promjera 15,20 mm pod vlačnim naprezanjem prema ASTM D7205 u Laboratoriju za materijale i konstrukcije pri Državnom sveučilištu Sjeverne Karoline. Uzorci su bili duljine 1,22 m. Kako je CFCC slab u poprečnom presjeku, nije primijenjen direktan prihvat uzoraka jer bi takav prihvat mogao oštetiti krajeve. Stoga su na krajeve uzoraka navučene čelične ovojnice duljine 0,31 m. Na takav je način osiguran kvalitetan prihvat uzorka u uređaju za ispitivanje. Primijenjene su dvije metode za mjerenje napinjanja užadi. Tijekom prve metode upotrijebljen je jednoosni elektrootporni tenzometar - EOT (uređaj za mjerenje relativne deformacije). Odabran je takav EOT senzor kako bi odgovarao svakom pojedinačnom CFCC užetu. Duljina matrice je iznosila 6,40 mm, a širina 4,32 mm. Prikaz CFCC uzorka s mjernom vrpcom (EOT senzorom) dan je na slici 2.



Slika 2. Uzorak CFCC s mjernom vrpcom - EOT [15]



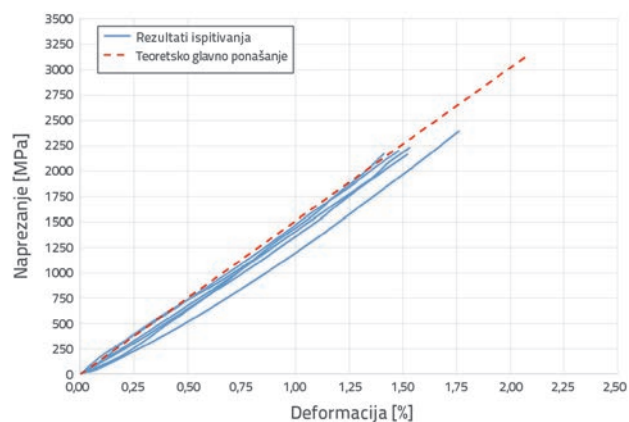
Slika 3. Ispitivanje CFCC uzorka na vlak pomoću ekstenzometra [15]

Mjerne vrpce služile su samo za ispitivanje prva dva CFCC uzorka. S obzirom na to da su se mjerne vrpce odvojile tijekom ispitivanja, u preostalim ispitivanjima je upotrijebljen ekstenzometar. No, morao je biti uklonjen kad se postiglo 70 % krajnjeg opterećenja kako se ne bi oštetio, a uzorci su stavljeni u cijev zbog mogućnosti eksplozije materijala. Podaci o naprezanju su uzeti samo za prvih 40 % do 70 % krivulje opterećenja. CFRP uzorci ispitivani su kontrolom pomaka s brzinom od 1,27 mm/min. Ispitivanje na vlak CFCC uzorka pomoću ekstenzometra prikazano je na slici 3. Kod svih uzoraka je primijećen lom u obliku pucanja. Budući da je CFCC krt, nije bilo popuštanja materijala, a ponašanje naprezanje-relativna deformacija bilo je linearno. Izgled uzorka nakon ispitivanja prikazan je na slici 4.



Slika 4. Uzorak CFCC-a nakon ispitivanja [15]

Dijagram naprezanje - relativna deformacija ispitivanja CFCC užadi na vlak prikazan je na slici 5. Pune linije prikazuju dio ispitivanja za koje su prikupljeni podaci za naprezanje. Isprekidana linija prikazuje savršeno linearno ponašanje s prosječnim modulom elastičnosti i vršnog naprezanja svih testova. Prikaz rezultata dobivenih kod ispitivanja na vlak i pripadajuće vrijednosti koju je dala tvrtka Tokyo Rope Manufacturing Co. d.o.o. prikazan je u tablici 2. Vrijednosti mehaničkih svojstava dobivenih ispitivanjem su vrlo blizu onima koje su dali proizvođači, tako da su ispitivanjem vrijednosti proizvođača potvrđene [15].



Slika 5. Dijagram opterećenja i naprezanja za ispitivanje CFCC užadi na vlak [15]

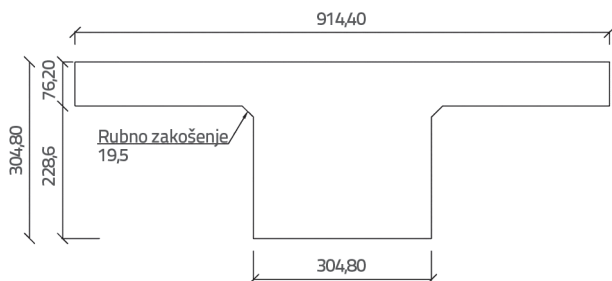
Tablica 2. Prikaz rezultata ispitivanja na vlak [15]

Broj uzorka	Sila loma [kN]	Relativna deformacija pri lomu [%]	Vršno naprezanje [MPa]	Modul elastičnosti [GPa]
#1	374,10	2,13	3238,47	151,75
#2	343,85	2,06	2977,16	144,38
#3	369,65	2,14	3201,24	149,90
#4	375,88	2,21	3254,33	147,01
#5	377,65	1,97	3256,39	165,05
#6	360,75	2,07	3124,02	151,18
Srednja vrijednost	366,98	2,10	3175,04	151,55
Podaci proizvođača	369,20	2,11	3190,20	151,00

5. Pripremanje uzoraka prednapetih predgotovljenih bentonskih T-greda

5.1. Detalji kontrolnih uzoraka

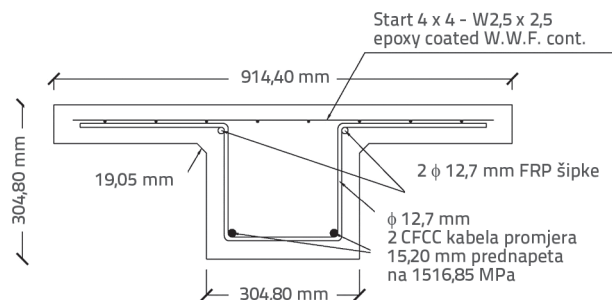
Pripremljeni su uzorci T-greda duljine 3,35 m, ukupne visine 304,80 mm, širine hrpta 304,80 mm, širine pojasnice 914,40 mm te debljine pojasnice 76,20 mm. Svi uzorci greda imaju istu geometrijsku konfiguraciju. Dimenzije uzoraka prikazane su na slici 6.



Slika 6. Dimenzije probnih uzoraka (dimenzije u "mm")

Ciljevi ovog istraživanja prve faze projekta jesu odrediti ponašanje predgotovljenih betonskih greda prednapetih pomoću CFCC užadi te usporediti rezultate ispitivanja s ACI normom za predviđanje. Nakon te prve faze, grede će biti izložene teškim uvjetima okoliša kako bi se istražilo dugoročno ponašanje. Konačni ciljevi istraživačkog projekta su istražiti degradaciju CFCC pod neprekidnim opterećenjem na vlak u visokoalkalnom okruženju, kvantificirati strukturna radna svojstva CFCC-a pod ubrzanim starenjem te vrednovati vijek trajanja FRP armature u betonu na temelju mehanizama degradacije. S obzirom na to, grede su izračunane prema ACI 318 [17] kako bi se postigle pukotine u CFCC-u i promatralo djelovanje neprekidnog opterećenja i/ili starenja, prije pucanja betona. Proračun je napravljen prema stvarnim rezultatima ispitivanja proizvođača i rezultatima koje je dobio Shapack [15], dakle ne prema jamčenim vrijednostima. Uzorak armature kontrolnih uzoraka prikazan je na slici 7. Isti detalj armature je korišten za sve kontrolne uzorke.

Prije ugradnje betona, provedno je postavljanje armature T-greda u pripremljenu oplatu, slika 8.



Slika 7. Prikaz armature ispitnih uzoraka



Slika 8. Prikaz ugrađene armature u kalupu prije ugradnje betona

5.2. Prednapinjanje CFCC užadi

Prije faze prednapinjanja napravljene su posebne pripreme. Oba kraja užadi su bila sparena s prednapetom čeličnom užadi. CFCC užad je odrezana na potrebne duljine i postavljena u oplatu uz potrebnu pripremu krajeva užadi za proces prednapinjanja. Unutrašnjost sidra za CFCC uže je poprskana suhim premazom za oplatu. Nakon toga se u sidro umeće

CFCC uže. Oko krajeva užadi prethodno je spiralno omotan zaštitni materijal i pričvršćen je izolacijskom trakom. Preko svega je navučena elastična upletena zaštitna cijev. Potom se cijev čvrsto stisne kako bi poravnao nabore i zalijepio se za uže. Zaštitni materijal i upletena elastična cijev su nanoseni kako bi spriječili kontakt između klinova i užadi da se ne ošteti užad. Kasnije su klinovi umetnuti u vodilice unutar sidra koje je postavljeno na uže. Klinovi su ručnom pumpom utisnuti u sidro, a potom su sidro i klinovi postavljeni u sklop sidrenog bloka. U čeličnu stranu spojke umetnuto je čelično uže i standardna sidrena glava je postavljena na čelično uže. Čelično uže sa sidrenom glavom povuče se unutar spojke. Potom se sidro CFCC užeta spaja sa spojkom pomoću navoja. Spojke su postavljene cik-cak, stepenasto, tako da se nisu dodirivale tijekom zatezanja. Izgled CFCC užadi prije zatezanja vidljiv je na slici 9.



Slika 9. CFCC užad prije zatezanja

Nakon pripreme faze, zatezanje je napravljeno u dva koraka. Prvi korak je zatezanje svakog užeta na 22,24 kN radi sigurnosti da CFCC užad nije omotana međusobno. Sljedeći korak je bilo zatezanje na traženo opterećenje od 175,71 kN. Svaka predgotovljena betonska T-greda je prednapeta pomoću dva CFCC užeta. Zbog nedostatka žilavosti ove vrste CFCC užadi, u vrijeme početnog prednapinjanja opterećenje je iznosilo 65 % od krajnjeg opterećenja, što je manje od 80 % vrijednosti preporučene normom za čelične kabele. Izgled CFCC užadi nakon zatezanja dan je na slici 10.



Slika 10. CFCC užad nakon zatezanja

5.3. Ugradnja betona

Nakon prednapinjanja CFCC užadi, provedena je ugradnja betona u pripremljenu oplatu. Svih 12 uzoraka T-greda izrađeno je u istoj oplati. Na slici 11. su prikazani ispitni uzorci nakon ugradnje betona. Radi utvrđivanja tlačne čvrstoće betona, ukupno su uzeta 24 cilindrična uzorka dimenzija 10,16 x 20,32 cm za 12 uzoraka greda kako bi se ispitali prema ASTM C39 [18]. Za dva kontrolna uzorka greda ispitivana su tri betonska cilindrična uzorka tijekom svakog dana ispitivanja. Rezultati ispitivanja čvrstoće betona na tlak prikazani su u tablici 3.



Slika 11. Uzorci greda nakon ugradnje betona

Tablica 3. Čvrstoća betona na tlak na dan ispitivanja

Uzorak	Čvrstoća betona na tlak [MPa]
1	74,13
2	75,55
3	77,03
Srednja vrijednost	75,57

6. Prikaz ispitivanja i mjerne opreme

Dva kontrolna uzorka prednapete predgotovljene betonske T-grede ispitivana su u laboratoriju za materijale i konstrukcije pri Državnom sveučilištu Sjeverne Karoline. Uzorci su ispitivani na savijanje u tri točke. Za pripremu ispitivanja trebalo je imati čvrstu podlogu, dva betonska bloka, klizni ležaj sa zglobom, opremu za opterećenje, mjernu opremu i sustav za prihvata podataka. Najprije su postavljeni betonski blokovi koji su korišteni za oslanjanje greda. Zglobni ležaj je postavljen na lijevi blok dok

je klizni ležaj postavljen na desni blok. Lijeva i desna strana su određene na prednjem dijelu modela grede. Nakon toga je uzorak postavljen na potpore. 45,72 cm duga čelična HSS s presjekom od 10,16 x 10,16 cm stavljena je na sredinu uzorka. Dvije čelične šipke su provučene kroz dva otvora na podu, na udaljenosti od 0,91 m jedan od drugoga i učvršćene za pod iz podruma. Poprečna greda na koju se nanosi opterećenje, duljine 1,22 m je položena na kvadratnu čeličnu HSS cijev. Dvije čelične šipke su provučene kroz dva otvora sa svake strane poprečne čelične grede. Zatim su dvije cilindrične ploče postavljene na stranama poprečne grede, a dvije doze kapaciteta 250 kN su pozicionirane na ploče kako bi se mjerilo opterećenje. Dvije podložne pločice s dvije kvadratne ploče su postavljene na doze, a na njih su stavljene dvije hidraulične dizalice kapaciteta 533,79 kN. Zatim, su dvije kvadratne ploče stavljene na hidraulične dizalice. Na kraju su postavljena dva remena kako bi se ploče učvrstile i time je završen dio koji se odnosi na postavljanje opreme vezane za opterećenje. Na taj je način omogućen prijenos opterećenja s poprečne grede na kvadratnu HSS cijev i, zatim, na svaki uzorak grede.

Slijedilo je postavljanje mjernih uređaja koji su se sastojali od dvije doze (uređaj za mjerenje sile), četiri uređaja za mjerenje pomaka i tri uređaja za mjerenje relativnih deformacija i rada pukotina. Kao što je prije bilo spomenuto, čelije za opterećenje su stavljene tijekom procesa postavljanja opreme za opterećenje tako da su preostali uređaji postavljeni u ovoj fazi. Uređaj za mjerenje pomaka (s oprugom) od 10,16 cm je stavljen na donji dio sredine raspona uzorka kako bi mjerio progib nosača. Jedan senzor za mjerenje relativne deformacije je postavljen na donju površinu, a dva su postavljena na gornju površinu grede na sredini raspona kako bi izmjerili tlačno naprezanje gornje površine i vlačno naprezanje donje površine koje uključuje i pukotine. Uz to, radi mjerenja proklizavanja užadi na lijevom kraju modela, postavljena su dva linearna senzora za mjerenje pomaka od 3,81 cm na lijevom kraju uzorka, i to jedan na kraju užeta na mreži dolje lijevo te drugi na kraju užeta na mreži dolje desno. Isto tako su dva linearna potencijometra s pomakom od 3,81 cm postavljena na desnoj strani užadi uzorka. Cjeloviti prikaz postavljanja mjerne opreme dan je na slikama 12. i 13.



Slika 12. Pogled na prednji dio pripremljenog uzorka za ispitivanje



Slika 13. Pogled iz perspektive na uzorak pripremljen za ispitivanje

7. Rezultati ispitivanja i zapažanja

7.1. Uzorak grede ST-CONTROL 1

Prvo je provedeno ispitivanje na savijanje kontrolnog uzorka, ST-CONTROL 1. Rezultati ispitivanja tog uzorka poslužiti će kao referentna vrijednost za radna svojstva preostalih deset uzoraka greda na koje će se primijeniti kontinuirano opterećenje na vlak i/ili starenje. Za početak, probni je uzorak opterećen s 223,70 kN. Prva pukotina pojavila se pri opterećenju od 126,24 kN i progibu od 2,21 mm u području sredine raspona. Progib iste točke je pri opterećenju od 223,70 kN iznosio 34,23 mm. Pri istom opterećenju, istezanje donje i gornje zone sredine raspona je iznosilo 0,012 na vlak te 0,002 na tlak. Nakon toga se moralo rasteretiti gredu. Pojavio se problem proboja u podlošku na gornjoj strani prednje čelije opterećenja. Kako bi se taj problem riješio, dodane su dvije kvadratne ploče na prednje i stražnje čelije opterećenja. Izgled probnog uzorka nakon početnog opterećenja i rasterećenja prikazan je na slici 14.



Slika 14. Probni uzorci nakon početnog opterećenja i rasterećenja

Zatim je uzorak opterećen do kritične točke pri 260,22 kN. Pripadajući progib na sredini raspona pri tom opterećenju je

iznosio 44,70 mm. Gornja i donja kritična relativna deformacija sredine raspona iznosila je 0,011 na vlak i 0,002 na tlak. Najprije su se pojavile djelomične pukotine CFCC užadi i to pri sredini raspona. Tada je primijećeno klizanje od 3,25 cm na desnom kraju prednjeg užeta. Izgled uzorka grede pri lomu dan je na slici 15., a klizanje užeta je prikazano na slici 16. Postojanje puknuća je dokazano čišćenjem krhotina na uzorku nakon ispitivanja. Slika 17. pokazuje uzorak s puknućem užeta nakon čišćenja. Dijagram opterećenje - progib sredine raspona je prikazan slikom 18. Potrebno je napomenuti da je početni progib prema gore (npr. kod grafičkog prikazivanja progiba sredine raspona grede), koji je nastao zbog prednapinjanja užeta, uzet kao nulta vrijednost za sva opterećenja. Stoga dijagram (slika 19.) počinje od nule, a ne od negativne vrijednosti nastale zbog prednapinjanja grede.



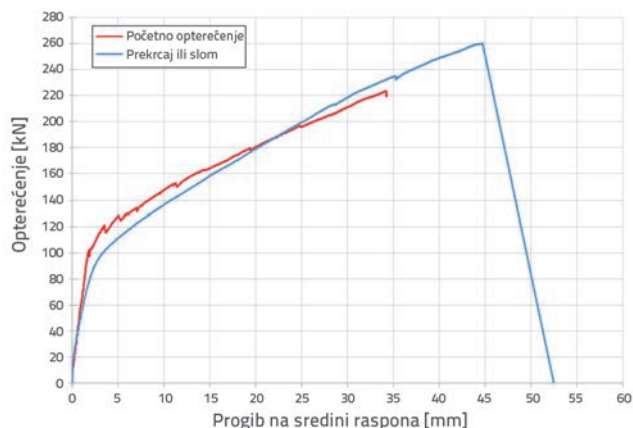
Slika 15. Uzorak grede pri lomu



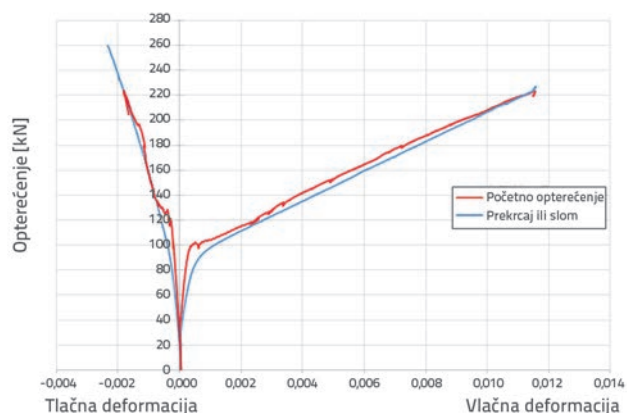
Slika 16. Klizanje na desnom kraju prednjeg CFCC užeta



Slika 17. Pogled na pucanje užeta



Slika 18. Dijagram uleknuća srednjeg raspona pri opterećenju za uzorak ST-CONTROL 1



Slika 19. Dijagram naprezanja srednjeg raspona pri opterećenju za uzorak ST-CONTROL 1

7.2. Uzorak greda ST-CONTROL 2

Drugo ispitivanje na vlak provedeno je na kontrolnom uzorku grede ST-CONTROL 2. Rezultati ispitivanja će se također koristiti kao referentne vrijednosti za svojstva preostalih deset greda. Uzorak je opterećivan sve do kritičnog opterećenja pri 262,98 kN. Prva pukotina se pojavila pri 121,54 kN s progibom srednjeg raspona od 2,19 mm. Progib srednjeg raspona pri opterećenju od 262,98 kN iznosio je 53,58 mm. Donja i gornja naprezanja srednjeg raspona pri kritičnom opterećenju iznosila su 0,035 na vlak i 0,003 na tlak. Slika 20. prikazuje uzorak tijekom ispitivanja prije trenutka loma. Najprije se pojavilo djelomično pucanje na užetu. Pucanje je lokalizirano na sredini raspona. Slijedilo je pucanje betona na gornjem području sredine raspona uzorka grede te lom uslijed savijanja. Nije primijećeno klizanje užadi. Slika 21. prikazuje uzorak grede nakon ispitivanja. Izgled uzorka nakon čišćenja krhotina je prikazan na slici 22. Grafikon na slici 23. prikazuje odnos opterećenja i progiba sredine raspona, a grafikon odnosa opterećenja i naprezanja srednjeg raspona prikazan je na slici 24.



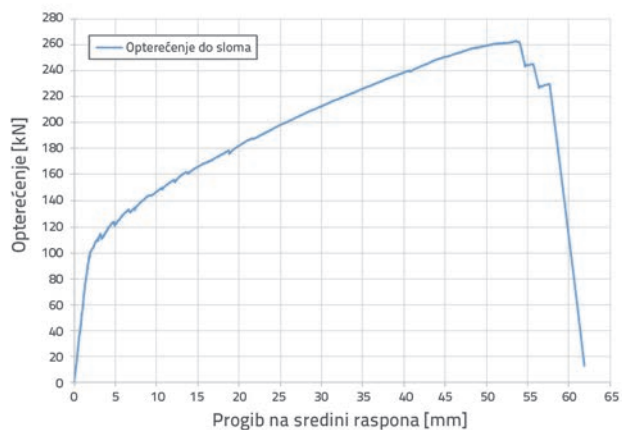
Slika 20. Uzorak ispitivanja neposredno prije loma



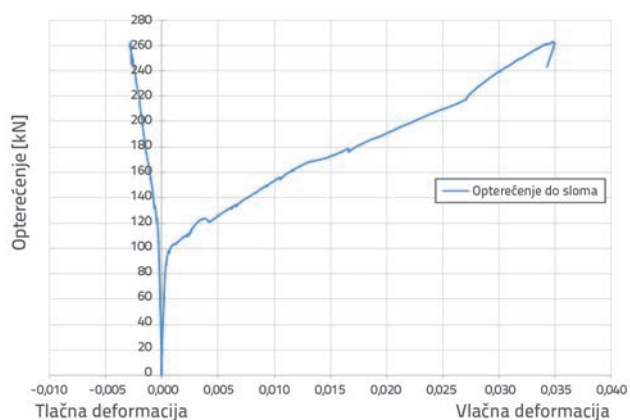
Slika 21. Uzorak grede nakon ispitivanja



Slika 22. Uzorak grede nakon čišćenja krhotina



Slika 23. Dijagram progiba sredine raspona pri opterećenju uzorka ST-CONTROL 2



Slika 24. Dijagram relativne deformacije sredine raspona pri opterećenju uzorka ST-CONTROL 2

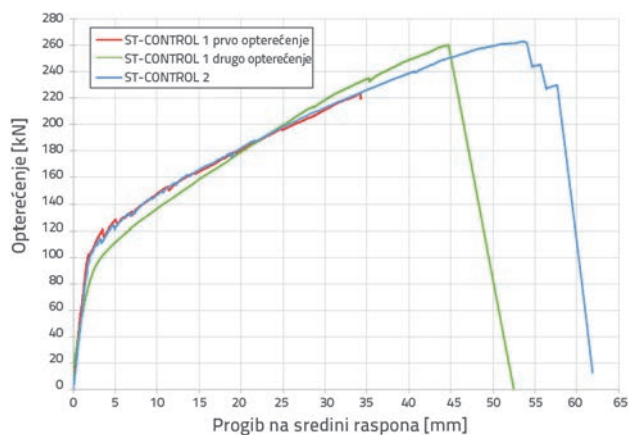
8. Rasprava i rezultati ispitivanja

Lom bilo koje prednapete betonske grede obično nastaje pucanjem betona u tlačnoj zoni. No, s obzirom na glavni cilj ispitivanja, te su grede izrađene tako da se slome pri pucanju CFCC užadi prije nego što naprezanje u tlačnoj zoni dosegne svoju maksimalnu veličinu radi ispitivanja djelovanja kontinuiranog opterećenja i/ili starenja. Izrada nije bila prema zajamčenim vrijednostima već je projektirana prema ACI 318 [17], uzimajući u obzir stvarne rezultate ispitivanja koje je priložio proizvođač i rezultate ispitivanja od Sharpacka [15]. Prilikom projektiranja uzoraka provjerena su naprezanja u gornjoj i donjoj zoni ploče tijekom faze prednapinjanja i tijekom uporabe. Nakon toga je projektirano savijanje tijekom kojeg je najprije određena lokacija neutralne osi te izračunana kompatibilnost na naprezanje. Nakon toga je izračunan kapacitet nominalnog izvijanja, a onda je napravljen poprečni proračun. U zadnjem koraku je izračunana kratkoročna i dugoročna odstupanja. Pri proračunu, prvo je tlačno naprezanje uzeto u iznosu od 55,15 MPa.

Kasnije je tlačno naprezanje povećano na 75,57 MPa prema stvarnim rezultatima ispitivanja cilindričnih uzoraka i vezanim proračunima. Za modul elastičnosti CFCC užadi je korišteno 155 GPa, a za maksimalnu relativnu deformaciju na vlak 0,021 te za naprezanje 3,24 GPa pri proračunima.

Na kraju ispitivanja prvog kontrolnog uzorka grede ST-CONTROL 1 zamiječeno je djelomično pucanje CFCC užadi. Zatim se pojavilo klizanje na desnom kraju prednjeg užeta. Pri ispitivanju drugog kontrolnog uzorka grede ST-CONTROL 2, dogodilo se djelomično pucanje užeta koje je slijedilo pucanje betona na sredini gornjeg raspona uzoraka što je prouzročilo lom uslijed savijanja. Klizanje užadi se nije pojavilo. Ponašanje uzoraka druge kontrolne grede pri lomu je potvrdilo proračun dobivanja pucanja CFCC užadi prije pucanja betona.

Kada se usporede oba dijagrama progiba sredine raspona pri opterećenju, može se primijetiti preklapanje kod linija početnog opterećenja prvog i drugog ispitivanja, što je povoljan pokazatelj. Da nije bilo problema prouzročenih pločom tijekom prvog ispitivanja i opterećenja koje se nastavilo do loma, vrlo je vjerojatno da bi se linije grafikona poklapale do kraja. Usporedni grafikoni progiba sredine raspona pri opterećenju prvog i drugog ispitivanja prikazani su na slici 25.



Slika 25. Usporedni dijagrami progiba sredine raspona pri opterećenju uzoraka ST-CONTROL 1 i ST-CONTROL 2

Kada je u proračun uzeta stvarna tlačna čvrstoća betona od 75,57 MPa, lom prednapetog armaturnog užeta pri dnu dobiven je na relativnoj deformaciji 0,038, uz pretpostavku da je relativna deformacija na gornjem dijelu dosegla vrijednost maksimalne relativne deformacije betona od 0,003. Vrijednost relativne deformacije od 0,038 CFCC užadi je viša od maksimalnog opterećenja užadi, npr. 0,021. To je jamčilo da će lom nastati zbog pucanja užadi. Ako se želi provjeriti vrijednost relativne deformacije u betonu na vrhu uzorka, uz pretpostavku da je maksimalna relativna deformacija čelika za prednapinjanje (CFCC) 0,021, što bi značilo da lom nastupa u CFCC užadi, tada relativna deformacija betona na vrhu uzorka iznosi 0,001. To je manje od maksimalne vrijednosti relativne deformacije koju

beton može podnijeti, a iznosi 0,003. Iz rezultata ispitivanja se može vidjeti da beton neće pucati za vrijeme loma užadi.

Ako bi rezultati ispitivanja bili vrednovani u smislu naprezanja, kod prvog uzorka ST-CONTROL 1 vrijednosti donjeg i gornjeg naprezanja srednjeg raspona pri kritičnom opterećenju bile bi 0,11 na vlak i 0,002 na tlak. Kod drugog uzorka ST-CONTROL 2, te bi vrijednosti iznosile 0,035 na vlak i 0,003 na tlak. Vrijednosti proračuna i prvog ispitivanja relativne deformacije nisu se dobro preklapale. Razlog tomu moglo je biti dvostruko opterećenje uzorka. S druge strane, vrijednosti proračuna su bile primjerene rezultatima iz ispitivanja naprezanja drugog uzorka koji je jednom opterećen do loma. Također se mora istaknuti da su vrijednosti pri ispitivanju donjeg naprezanja u sredini raspona pri lomu dobivene iz senzora na donjem dijelu sredine raspona uzorka, a ne iz vrijednosti naprezanja CFCC užadi. Time se smatra da je normalno imati razliku u vrijednostima dobivenim proračunom i ispitivanjem.

Kapacitet nominalnog momenta je izračunan na osnovi maksimalne čvrstoće CFCC. Uz vrijednost tlačne čvrstoće od 75,57 MPa koja je dobivena iz ispitivanja s betonskim cilindrima, predviđene vrijednosti su izračunane prema stvarnoj čvrstoći na tlak betona. Kapacitet nominalnog momenta je iznosio 184,24 kNm, a kritično opterećenje pri 241,98 kN. Vrijednost momenta pucanja je dobivena kao 90,33 kNm, a opterećenje do pucanja pri 118,50 kN.

Iz prvog ispitivanja su dobivene vrijednosti opterećenja do pucanja od 126,24 kN te kritičnog opterećenja od 260,22 kN. Iz drugog ispitivanja su te vrijednosti određene pri 121,54 kN za pucanje i 262,98 kN za lom. Vrijednosti dobivene proračunom i ispitivanjem bile su blizu te su rezultati ispitivanja potvrdili vrijednosti proračuna.

Kod prednapetih betonskih greda, odstupanje ovisi o sili prednapona vlastitim i vanjskim opterećenjima. U izračunima je uzeto u obzir odstupanje zbog deformacija pri savijanju, a poprečne deformacije su zanemarene. Kratkoročni progibi na sredini raspona grede izračunava se bilinearnom metodom koja je opisana u Nawyjevoj knjizi [19]. Kada je uzeta stvarna čvrstoća na tlak te proračunom predviđene vrijednosti opterećenja do pucanja od 118,50 kN i kritičnog opterećenja od 241,98 kN, kratkoročni progib pri srednjem rasponu određen je na 41,58 mm.

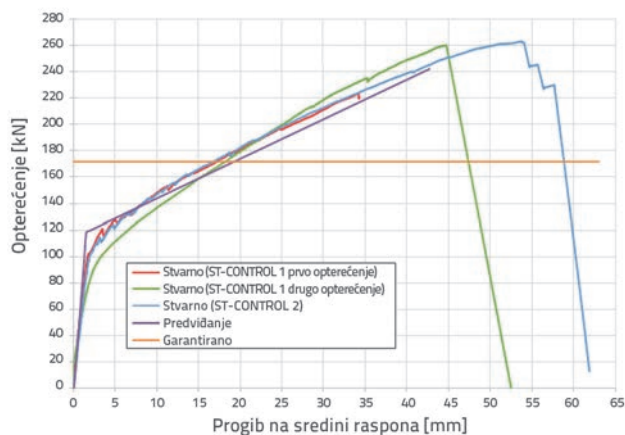
Isto tako, kada je uzeta stvarna vrijednost čvrstoće na tlak betona i vrijednosti opterećenja do pucanja od 126,24 kN i opterećenja do loma od 260,22 kN za ispitivanje prvog kontrolnog uzorka grede ST-CONTROL 1, progib od sredine raspona izračunan je na 45,21 mm. Progib srednjeg raspona pri lomu iznosio je 44,70 mm tijekom prvog ispitivanja. Razlika od 0,51 mm između dobivenih vrijednosti je dobar pokazatelj da se izračunane vrijednosti preklapaju s onima dobivenim iz ispitivanja. Nakon toga, radi provjere vrijednosti odstupanja progiba srednjeg raspona dobivenu ispitivanjem drugog kontrolnog uzorka grede ST-CONTROL 2, korištena je stvarna vrijednost čvrstoće na tlak betona i opterećenje do pucanja od 121,54 kN te opterećenje do loma od 262,98 kN. Na temelju tih vrijednosti izračunan je

Tablica 4. Usporedba vrijednosti dobivenih proračunom i ispitivanjem

	Vlačna relativna deformacija pri lomu	Opterećenje pri pojavi pukotina P_{cr} [kN]	Opterećenje pri lomu P_f [kN]	Progib sredine raspona [mm]	
Vrijednosti predviđene proračunom ($f'_c = 55,15$ MPa)	0,030	112,10	240,20	44,58	
Vrijednosti predviđene proračunom za ($f'_c = 75,57$ MPa)	0,038	118,50	241,98	41,58	45,21 (korištenjem ST-CONTROL 1 stvarne P_f vrijednosti)
					47,75 (korištenjem ST-CONTROL 2 stvarne P_f vrijednosti)
ST-CONTROL 1 stvarne vrijednosti	0,011	126,24	260,22	44,70	
ST-CONTROL 2 stvarne vrijednosti	0,035	121,54	262,98	53,59	

progib sredine raspona od 47,75 mm, dok je vrijednost progiba sredine raspona pri drugom ispitivanju iznosila 53,59 mm. To je rezultiralo razlikom od 5,84 mm između tih vrijednosti.

Sažeti prikaz rezultata dan je u tablici 4., a sastoji se od usporedbe opterećenja do pucanja, opterećenja do loma, vlačnog naprezanja pri prijelomu, vrijednosti progiba sredine raspona dobivenih proračunom i ispitivanjem. Razlike između numeričkih i izmjerenih vrijednosti se mogu pripisati modelu, različitim svojstvima materijala i učinku psmika.



Slika 26. Usporedba vrijednosti progiba sredine raspona pri opterećenju dobivene proračunom i ispitivanjima

Na slici 26. je prikazan dijagram predviđenog progiba sredine raspona pri opterećenjima koji je dobiven proračunom predviđenih vrijednosti kratkoročnih progiba sredine raspona na temelju povećanja opterećenja od 20,0 kN sve do opterećenja do loma pri 241,98 kN dobivenog iz proračuna i korištenjem stvarne tlačne čvrstoće betona. Na istoj slici su prikazani i dijagrami ispitivanja progiba sredine raspona opterećenja za ST-CONTROL 1 i ST-CONTROL 2. Zajamčeno opterećenje do loma grede izračunano je na 171,75 kN na temelju stvarne čvrstoće

na tlak betona od 75,57 MPa i maksimalnog naprezanja na vlak, vrijednosti napona od 0,015 GPa za CFCC i 2,34 GPa za ponovni proračun. Zajamčena vrijednost je također prikazana na grafikonu. Kod izračuna vrijednosti napona od 2,34 GPa za CFCC, korišteno je zajamčeno kritično opterećenje od 270,0 kN i efektivna površina poprečnog presjeka od 115,60 mm², prema podacima proizvođača. Proizvođač je dao i maksimalnu vrijednost naprezanja na vlak od 0,015. Vrednovanjem usporednog dijagrama progiba sredine raspona pri opterećenju, uočava se preklapanje rezultata dobivenih predviđanjem i ispitivanjem. Osim toga, vidljivo je da izračunano zajamčeno opterećenje do sloma greda ostaje ispod rezultata predviđanja i ispitivanja.

9. Zaključak

U ovom je radu prikazano ispitivanje CFRP užadi za prednapinjanje predgotovljenih betonskih greda. Ispitivanje je obuhvaćalo prvi dio istraživačkog projekta s ciljem da se odrede degradacijski mehanizmi i predvidi vijek trajanja FRP betonske armature. Rad daje pregled ispitivanja na vlak CFCC uzoraka, proračun, proces prednapinjanja i ugradnje betona, pripremu ispitivanja i mjernu opremu korištenu pri ispitivanju na vlak. Osim toga, dana je i diskusija o ponašanju modela greda na savijanje te su rezultati ispitivanja uspoređeni s predviđanjima prema normi ACI 318.

Uzorki za ispitivanje na vlak su izračunani na dobivanje pucanja užadi kako bi se razmotrili učinci kontinuiranog opterećenja i/ili starenja, prije pucanja betona. Radna se svojstva uzoraka greda slažu s očekivanjima proračuna. Isto tako se preklapaju početna opterećenja dobivena ispitivanjem prvog i drugog uzorka u grafikonu odstupanja srednjeg raspona pri opterećenju, što je dobar pokazatelj. Rezultati dobiveni proračunom i ispitivanjem podudaraju se kod vlačnog naprezanja pri lomu, opterećenjima pri pucanju i lomu progiba sredine raspona. Rezultati ispitivanja su potvrdili ispravnost proračunskih vrijednosti.

Budući da je prva faza istraživačkog projekta završena s dobrim rezultatima ispitivanja na savijanje dvaju prednapetih kontrolnih uzoraka T-grede, sljedeći korak je započeo na način da se rezultati ispitivanja mogu sa sigurnošću uzeti kao smjernice za ponašanje preostalih deset modela greda.

Zahvale

Autorica zahvaljuje istaknutom profesoru Samiju H. Rikzallai za vodstvo i podršku. Također, autorica izahvaljuje Omaru Khalafu Allai, studentu na doktorskom studiju, za sav trud i pomoć.

LITERATURA

- [1] Enomoto, T., Ushijima, K.: Use of CFCC Tendons and Reinforcements in Concrete Structures for Durability, The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2012), Sapporo, Hokkaido, Japan, pp. 1-8, 2012.
- [2] Benmokrane, B., Ali, A.H., Mohamed, H.M., Robert, M., ElSafty, A.: Durability Performance and Service Life of CFCC Tendons Exposed to Elevated Temperature and Alkaline Environment, Journal of Composites for Construction, 20 (2016) 1, pp. 1-13.
- [3] Enomoto, T., Grace, N.F., Harada, T.: Life Extension of Prestressed Concrete Bridges Using CFCC Tendons and Reinforcements, 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012), Rome, Italy, pp. 1-10, 2012.
- [4] Rizkalla, S., Tadros, G.: A Smart Highway Bridge in Canada, Concrete International, 16 (1994) 6, pp. 42-44.
- [5] Abdelrahman, A., Tadros, G., Rizkalla, S.: Test Model for the First Canadian Smart Highway Bridge, ACI Structural Journal, 92 (1995) 4, pp. 451-458.
- [6] Grace, N.F., Navarre, F.C., Nacey, R.B., Bonus, W., Collavino, L.: Design - Construction of Bridge Street Bridge - First CFRP Bridge in the United States, PCI Journal, 47 (2002) 5, pp. 20-35.
- [7] Grace, N.F., Enomoto, T., Abdel-Sayed, G., Yagi, K., Collavino, L.: Experimental Study and Analysis of a Full-Scale CFRP/CFCC Double-Tee Bridge Beam, PCI Journal, 48 (2003) 4, pp. 120-139.
- [8] Domenico, N.G.: Bond Properties of CFCC Prestressing Strands in Pretensioned Concrete Beams, M,Sc, Thesis, Department of Civil and Geological Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, 1995, pp. 118.
- [9] Fam, A., Rizkalla, S., Tadros, G.: Behavior of CFRP for Prestressing and Shear Reinforcements of Concrete Highway Bridges, ACI Structural Journal, 94 (1997) 1, pp. 77-86.
- [10] Grace, N.F., Enomoto, T., Sachidanandan, S., Puravankara, S.: Use of CFRP/CFCC Reinforcement in Prestressed Concrete Box-Beam Bridges, ACI Structural Journal, 103 (2006) 1, pp. 123-132.
- [11] Grace, N., Enomoto, T., Abdel-Mohti, A., Tokal, Y., Puravankara, S.: Flexural Behavior of Precast Concrete Box Beams Posttensioned with Unbonded, Carbon-Fiber-Composite Cables, PCI Journal, 53 (2008) 4, pp. 62-82.
- [12] Grace, N., Enomoto, T., Baah, P., Bebawy, M.: Flexural Behavior of CFRP Precast Prestressed Decked Bulb T-Beams, Journal of Composites for Construction, 16 (2012) 3, pp. 225-234.
- [13] Grace, N.F., Ushijima, K., Rout, S.K., Bebawy, M.: Shear Behavior of Prestressed Decked Bulb T-Beams Reinforced with CFCC Stirrups, The Fourth Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2013), Melbourne, Australia, pp. 1-6, 2013.
- [14] Roddenberry, M., Mtenga, P., Joshi, K.: Investigation of Carbon Fiber Composite Cables (CFCC) in Prestressed Concrete Piles, Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida and Florida State University, Tallahassee, Florida, 2014.
- [15] Shapack, G.L.: Analysis and Design of Cored Slabs Prestressed with Carbon Fiber Strands, M,Sc, Thesis, Graduate Faculty, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2015, pp. 129.
- [16] Tokyo Rope Manufacturing Co, Ltd., General information of CFCC: carbon fiber composite cable, standard specifications, <http://www.tokyorope.co.jp/english/products/cfcc/material/index.html>, 15.1.2016.
- [17] ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, MI, 2011.
- [18] ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [19] Nawy, E.G.: Prestressed Concrete- A Fundamental Approach, Fifth Edition Update ACI, AASHTO, IBC 2009 Codes Version, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2009.