

Analiza kontaktne zone čelika i betona u prednapetom betonu pod djelovanjem sile izvlačenja čeličnog užeta

Čaljkušić, Ivana

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:337733>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Ivana Čaljkusić

Split, 2017.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Ivana Čaljkusić

**Analiza kontaktne zone čelika i betona u prednapetom
betonu pod djelovanjem sile izvlačenja čeličnog užeta**

Diplomski rad

Split, 2017.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI GRAĐEVINARSTVA**
KANDIDAT: Ivana Čaljkušić
BROJ INDEKSA: 573
KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**
PREDMET: Građevinski materijali I

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Analiza kontaktne zone čelika i betona u prednapetom betonu pod djelovanjem sile izvlačenja čeličnog užeta

Opis zadatka: Zadatak kandidata je analizirati ponašanje kontaktne zone betona i čelika u prednapetom betonu. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izračunati posmično naprezanje pomoću sile izvlačenja užeta koja se dobije iz pull-out testa. Pomoću testa savijanja u tri točke potrebno je izračunati energiju sloma.

Rezultate je potrebno prikazati, ocijeniti teorijskom formulom te komentirati.

U Splitu, 17. ožujka, 2017.

Voditelj diplomskog rada:

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:

Izv. prof. dr. sc. Sandra Juradin

Doc. dr. sc. Veljko Srzić

ZAHVALA

*Posebno se zahvaljujem svojoj mentorici prof. dr. sc. **Sandri Juradin** na pomoći, strpljenju, vodstvu i izuzetnoj suradnji tijekom izrade rada te svima koji su svojim savjetima, strpljenjem i podrškom pridonijeli kvaliteti ovog rada.*

Najveće hvala mojoj obitelji i svim dragim ljudima koji su vjerovali u mene i davali mi bezuvjetnu podršku, ljubav i strpljenje tijekom ovih godina studiranja.

Analiza kontaktne zone čelika i betona u prednapetom betonu pod djelovanjem sile izvlačenja čeličnog užeta

Sažetak:

U prednapetom betonu čelik i beton zajedno se odupiru vanjskim opterećenjima, a važan dio za analiziranje je ponašanje kontaktne zone. U ovom radu korišten je pull-out test na način da je užo ugrađeno u beton te je opterećeno na jednom kraju silom, dok je drugi kraj slobodan. Mjeri se odnos između vlačne sile te pomaka užeta. Sila se povećava dok ne dođe do pucanja veze. Postoje analitičke formule koje definiraju odnos između posmičnog naprezanja kontaktne zone čelika i betona te prokliznuća šipke prilikom izvođenja pull-out testa. Veza između teorijskih formula te eksperimentalno dobivenih rezultata prikazana je u ovom radu.

Također, koristi se test savijanja kako bi se izračunala energija sloma te parametri materijala. Energija sloma je definirana kao energija potrebna za stvoriti jednu jedinicu površine pukotine.

Ključne riječi:

Prednapeti beton, samozbijajući beton, odnos naprezanja i prokliznuća, pull-out test, raspodjela posmičnog naprezanja, test savijanjem u tri točke, energija sloma

Analysis of bond stress distribution in prestressing concrete

Abstract:

Strand bond can be defined as the shearing stress at the interface between prestressing strand and the surrounding concrete. The bond guarantees the transferring of prestress force from the strand to the concrete. This paper presents an experimental research where pull-out test was used. In the pull-out test, a bar incorporated in a concrete along a defined length is strained at one end by a tensile force, the other end remaining without stress. The relation between the tensile force and the relative displacement between steel and concrete is measured. The load is increased up to failure of the bond. In this paper is shown connection between analytical formulas and experimental results.

Also, in this paper is used three-point bending test to determine fracture energy and parameters of material. The fracture energy is defined as the amount of energy necessary to create one unit of area of a crack.

Keywords:

Prestressing concrete, Self compacting concrete, stress-slip relationship, pull-out test, bond stress distribution, three point bending test, fracture energy

SADRŽAJ

1	UVOD	1
2	OPĆENITO O PREDNAPETOM BETONU	3
2.1	Povijest prednapetog betona	3
2.2	Načini prednapinjanja.....	4
2.2.1	Prema stupnju prednapinjanja.....	5
2.2.2	Prema načinu prednapinjanja	6
2.3	Prednosti i nedostaci prednapetih konstrukcija.....	7
2.4	Materijali koji se koriste kod prednapetih elemenata.....	8
2.4.1	Čelik za prednapinjanje	8
2.4.2	Beton.....	11
2.4.3	Mort za injektiranje	16
2.5	Sredstva za prednapinjanje	18
2.5.1	Preše za napinjanje natega	19
2.5.2	Oprema za injektiranje natega	19
2.5.3	Naprave za uvlačenje užadi	20
2.5.4	Hidrauličke pumpe	21
2.5.5	Sidrena glava i klinovi.....	21
3	Dosadašnja ispitivanja	23
3.1	Analiza preraspodijele naprezanja kod prednapinjanja (Analysis of bond stress distribution for prestressing strand by Standard Test for Strand Bond, Canh N. Dang, Cameron D. Murray, Royce W. Floyd, W. Micah Hale, J.R. Martí-Vargas) [12].....	23
3.1.1	Uvod	23

3.1.2	Eksperimentalni dio	24
3.1.3	Analitičko istraživanje	26
3.1.4	Eksperimentalni rezultati i diskusija	29
3.1.5	Zaključak	34
3.1.6	Pregled oznaka korištenih u studiji	34
3.2	Mehanizam spoja čelika i betona (dio iz knjige Bemessung im konstruktiven Betonbau, Konrad Zilch, Gerhard Zehetmaier) [13]	35
3.2.1	Mehanizam spoja betona i armature	35
3.2.2	Eksperimentalna testiranja	37
3.2.3	Modeliranje veze posmičnog naprezanja i deformacije	38
3.2.4	Opis problema diferencijalnom jednadžbom	39
3.3	Proračun energije sloma pjenastog betona pomoću testa savijanja u tri točke na unaprijed zarezanim gredama (Fracture energy of foamed concrete based on three-point bending test on notched beams: Marcin Kozłowskia, Marta Kadelab, Alfred Kukielkab) [20]	42
3.3.1	Sažetak	42
3.3.2	Uvod	42
3.3.3	Materijali i metode	42
3.3.4	Metode testiranja	43
3.3.5	Rezultati i diskusija	44
3.3.6	Zaključak	46
3.4	Određivanje parametara loma (K_{IC}^s i $CTOD_c$) metodom savijanja (iz knjige Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials OCR) [14]	
	47	
3.4.1	Općenito	47
3.4.2	Uzorak	48
3.4.3	Uređaj za ispitivanje	49
3.4.4	Izvođenje testa	49

3.4.5	Rezultati testa i proračun	49
3.4.6	Izvještaj testa.....	51
3.4.7	Pozadina testa.....	51
4	Eksperimentalni dio	52
4.1	Plan izvođenja eksperimentalnog dijela	52
4.2	Priprema uzorka	53
4.2.1	Priprema uzorka prednapetog betona	55
4.2.2	Priprema uzoraka obično armiranog betona	58
4.3	Ispitivanje tlačne čvrstoće betona	59
4.4	Pull - out test	63
4.4.1	Cilj testa.....	63
4.4.2	Opis uzorka za ispitivanje.....	63
4.4.3	Izvođenje testa.....	65
4.4.4	Rezultati.....	70
4.5	Ispitivanje savijanjem (Three point bending test)	77
4.5.1	Cilj testa.....	77
4.5.2	Izvođenje testa.....	77
4.5.3	Rezultati testa.....	80
5	PREGLED i ocjena rezultata.....	82
5.1	Posmično naprezanje u kontaktnoj zoni užeta i betona	82
5.2	Analitičko istraživanje	84
5.2.1	Proračun koeficijenta α	84
5.2.2	Analitički oblik dijagrama	86
5.3	Ocjena rezultata.....	87
6	Zaključak.....	91
7	Literatura	93

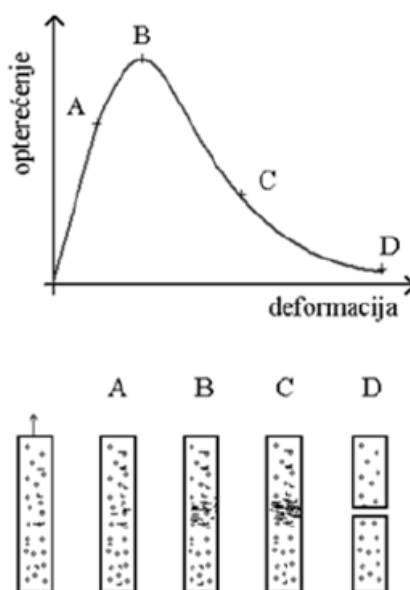
1 UVOD

Nakon drugog svjetskog rata prednapeti beton se sve više koristi kod zgrada, mostova, obalnih platformi, silosa, hala, krovnih konstrukcija. Kombinacija betona i čelika visokih čvrstoća daju mnoge prednosti kao što su: svladavanje velikih raspona uz veću vitkost i manju masu, povećana trajnost zbog izostanka pukotina, smanjeni progibi, velika otpornost na zamor (posljedica male promjene naprezanja u čeliku za prednapinjanje), sposobnost zatvaranja pukotina nakon djelovanja promjenjivih i izvanrednih djelovanja, ubrzanje i racionalizacija montažnog građenja.

Samozbijajući beton (eng. Self-compacting concrete, SCC) je inovativna vrsta betona koji tečenjem bez upotrebe vibracijskih uređaja u potpunosti zaobilazi armaturu i popunjava oplatu. Poboljšana fluidnost, dobra otpornost segregaciji komponenata tijekom tečenja, visoka čvrstoća u očvrslom stanju, lakša ugradnja i povećana trajnost samo su neke od karakteristika koje razlikuju samozbijajući beton od običnog. To je građevinski materijal koji se sastoji od cementa, agregata, vode i aditiva kao i obični beton te još nekoliko novih sastavnica kao što su koloidni silikati, pucolanski materijali, portlandski leteći pepeo (PFA), mikrosilika, metakaolin, kemijski dodaci koji doprinose posebnim zahtjevima. [2]

Samozbijajući beton zbog svog sastava postiže visoke konačne čvrstoće što u kombinaciji sa prednapinjanjem daje kvalitetan sustav koji se može upotrijebiti kod građevina s elementima velikih raspona kao što su mostovi, zgrade, montažne građevine, hale, krovne konstrukcije, silosi, bunker, te za potrebe sanacije postojećih građevina.

Beton, kao materijal ima kvazi krto ponašanje dok čelik ima elasto-plastično ponašanje što mu omogućava dosezanje velikih deformacija prilikom sloma. Prema tome, u uzorku prije dolazi do sloma u betonu nego popuštanja čelične šipke. Za materijale koji prvo imaju fazu očvršćivanja, potom fazu dostizanja nosivosti te područje omekšanja materijala kaže se da su kvazi kruti.



Slika 1.1 Radni dijagram betona pri vlačnom opterećenju [1]

Radni dijagram betona prikazan na slici 1.1 pri vlačnom naprezanju prikazuje linearno elastično područje (0-A) gdje se doseže 70-80 % vlačne čvrstoće, zatim nelinearno područje, odnosno područje očvršćenja materijala. Tu se događa razvoj mikro pukotina na mjestima gdje je beton najslabiji. Nakon što dosegne nosivost B dolazi do područja omekšanja materijala te formiranja otvorenih pukotina. Područje u kojem se materijal odupire raspucavanju zove se zona raspucavanja. To je prijelazno područje između naprezanja u otvorenoj pukotini koja su 0 te naprezanja u mikropukotinama koja su maksimalna.

U prednapetom betonu čelik i beton zajedno se odupiru vanjskim opterećenjima, a važan dio koji je potrebno analizirati je kontaktna zona.

Djelotvornost spoja ovisi o čvrstoći prijanjanja na kontaktu između injekcijske smjese i armaturne šipke. Općenito uzevši, spoj je interaktivni mehanizam koji omogućuje prijenos sile između armaturnih šipaka i okolnog betona pa stoga osigurava kompozitno djelovanje između ta dva materijala. Može se reći da otpornosti spoja doprinose tri osnovna elementa: kemijsko prijanjanje, tarni otpor i mehaničko uklještenje koje nastaje uslijed nosivog djelovanja na kontaktu između rebara šipke i betona. Do prijanjanja dolazi zbog kemijskog povezivanja cementa i šipke te zbog sile skupljanja koja se razvija tijekom njege; osim toga, stupanj prionljivosti ovisi i o svojstvima materijala kojim je šipka okružena. [18]

2 OPĆENITO O PREDNAPETOM BETONU

2.1 Povijest prednapetog betona

Beton je građevinski materijal izrađen od veziva, vode i agregata (prirodni, umjetni i reciklirani). Također, uz ove obavezne komponente u beton se mogu dodati i razni dodatci (aditivi) koji mu daju posebna svojstva (akceleratori, aeranti, plastifikatori, dodaci protiv smrzavanja, itd.). Beton se kao materijal za građenje pojavljuje 300. godine prije Krista. Iako postoje i raniji dokazi (3000 godina prije Krista Egipćani su koristili blato pomiješano sa slamom kako bi povezali osušene cigle, Kinezi su pri izgradnji Kineskog zida koristili prirodni cementni materijal, 800 godina prije Krista Babilonci su se koristili bitumenom kako bi povezali cigle i kamenje), prvi su Rimljani poznavali i koristili beton sličan današnjem (koristili su pucolanski cement iz Pozzuolija, pokraj Vezuva, a postoje i zapisi Plinija i Vitruvija o omjerima mješavine žbuke). Padom Rimskog Carstva proizvodnja betona je zaboravljena sve do 14. stoljeća kada je počela ponovna upotreba živog vapna i pucolana. Prava prekretnica u korištenju betona je spoznaja da se beton može armirati čeličnim šipkama (Francuska, Joseph Monier, 19. stoljeće). Takva spoznaja dovela je do revolucije u graditeljstvu.

Oko 1890. god. prvi zabilježeni patent prednapetog betona registrirao je američki inženjer iz San Francisca Henry Jackson izgradivši betonski nadvoj s prednapetim zategama. Nakon godinu dana nadvoj se srušio. H. Jackson nije znao za fenomen puzanja betona i relaksacije čelika, što je u konačnici rezultiralo “nestankom” prednapinjanja. Nijemac C.E.W. Doebling pokrenuo je proizvodnju betonskih greda i ploča s prednapregnutim žicama, što je također završilo neuspjehom zbog gubitka efekta prednapinjanja. Nakon početnih neuspjeha Jacksona i Doeblinga, Eugène Freyssinet 1908. godine eksperimentalno je izgradio prvi prednapeti betonski luk. Do 1928. je uspio riješiti većinu tehničkih problema te je patentirao sustav prednapinjanja, koji je komercijalnu primjenu doživio tek 1930. godine na lučnom mostu Plougastel blizu mjesta Brest u Francuskoj. Taj most s tri raspona od 186,5 m je primjer prednapinjanja betonske konstrukcije bez uporabe prednapetih natega. Na njemu je Freyssinet primijenio metodu kompenzacije luka tako što je izazvao naprezanja u rebru luka uz pomoć hidrauličkih preša stavljenih u luk. Tako je uspio neutralizirati utjecaj skupljanja, skraćanja rebra i pada temperature u luku. Freyssinet je uzeo u obzir i efekte skupljanja i puzanja betona te relaksacije čelika u vremenu, zbog kojih je dolazilo do gubitka efekta prednapinjanja, te je shvatio nužnost korištenja visokokvalitetnih materijala – betona visoke

tlačne čvrstoće i čelika visoke vlačne čvrstoće i elastičnog produljenja. U prijašnjim pokušajima prednapinjanja koristila se armatura s puno manjom maksimalnom deformacijom, što je u konačnici zbog skupljanja i puzanja rezultiralo gubitkom efekta prednapinjanja od oko 60%. Upotrebom kvalitetnije armature taj gubitak je smanjen na samo 20%. Njegovi prvi patentni do danas su nadopunjeni raznim postupcima tj. sustavima patentiranim u svim industrijaliziranim zemljama, a sama tehnologija je doživjela nagli razvoj nakon II. svjetskog rata djelomično zato jer je trebalo obnoviti i sagraditi veliki broj mostova.



Slika 2.1 Lučni most Plougastel [5]

Prva knjiga o prednapetom betonu nastala je 1943. godine, a njen autor je Mörsch. Nakon toga naziv prednapregnuti beton postaje sve popularniji te je 1952. utemeljena Međunarodna federacija za prednapinjanje (FIP - Fédération Internationale de la Précontrainte), a 1953. utemeljen Europski odbor za beton (CEB – Comité Européen du Béton). Godine 1997. udruživanjem CEB i FIP nastaje organizacija „fib“.

Prednapeti beton je još i danas u fazi intenzivnog razvoja.

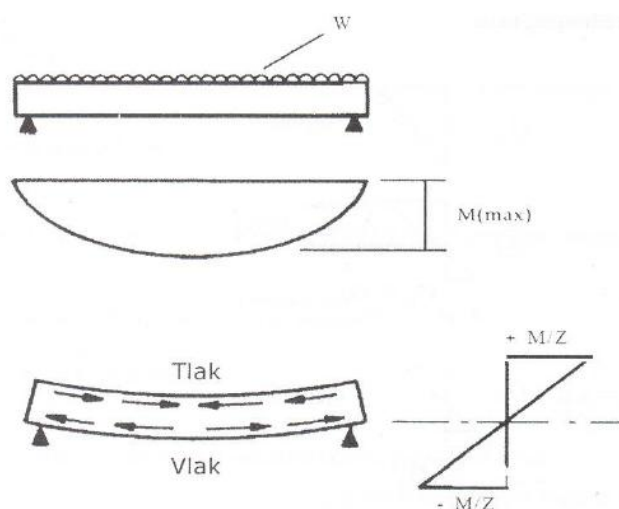
2.2 Načini prednapinjanja

Beton je materijal velike tlačne, a male vlačne čvrstoće. Vlačna naprezanja izazvana skupljanjem, temperaturom i vanjskim opterećenjem vrlo brzo dostižu vlačnu čvrstoću betona što dovodi do stvaranja pukotina. Kod armiranobetonskih konstrukcija sva vlačna naprezanja prihvaćaju se armaturom. Cilj prednapinjanja je eliminirati ili barem smanjiti vlačna normalna naprezanja u svim presjecima i to djelovanjem umjetno izazvanim silama. Te sile se nazivaju sile prednapinjanja. Tako dobivena naprezanja moraju biti manja od dopuštenih vrijednosti u

svima fazama izvedbe i uporabe građevine. Prednapeti beton je vrsta betona kod kojeg se armaturom svjesno izazivaju unutarnje sile takve veličine i raspodjele pri kojima se naprezanje uslijed vanjskog djelovanja djelomično ili potpuno eliminira. Za razliku od djelovanja armature u armiranobetonskim konstrukcijama koje je pasivno, armatura samo prenosi vlačna naprezanja od vanjskog opterećenja, prednost prednapetog betona leži u mogućnosti aktivnog mijenjanja raspodjele unutarnjih sila u konstrukciji.

Aktivna uloga prednapinjanja postaje značajnija ako se zamijeni prednapeta armatura sa sustavom sila koje djeluju uzduž nosača, čija je svrha postići ravnotežu s djelovanjem od npr. stalnog opterećenja. Princip je sličan pojavi skretnih sila kod klasičnog armiranja kada savijena armatura u uglovima zbog vlačnog opterećenja djeluje tlačnom silom na beton. Posebno je važan slučaj kada armatura ima oblik parabole jer za taj slučaj skretna sila dobiva karakter jednoliko rasprostranog opterećenja.

Za granično stanje nosivosti prednapetog betona vrijedi isti princip kao i kod armiranog betona. Vanjskoj sili i momentu suprotstavlja se par unutarnjih sila tj. rezultanti tlačnih i vlačnih naprezanja (beton, čelik) koje djeluju kao spreg sila.



Slika 2.2 Nosač opterećen uporabnim opterećenjem i pripadajući dijagram naprezanja [6]

2.2.1 Prema stupnju prednapinjanja

Prema stupnju prednapinjanja razlikujemo:

- potpuno prednapeti beton $k=1$,
- armirani beton $k=0$,
- ograničeno i djelomično prednapeti beton $0 < k < 1$,

gdje je k odnos momenta dekompresije i ukupnog momenta. Moment dekompresije je moment savijanja izazvan vanjskim opterećenjem koji je po veličini i smjeru takav da na vlačnom rubu poništi naprezanja izazvana silom prednapinjanja. [7]

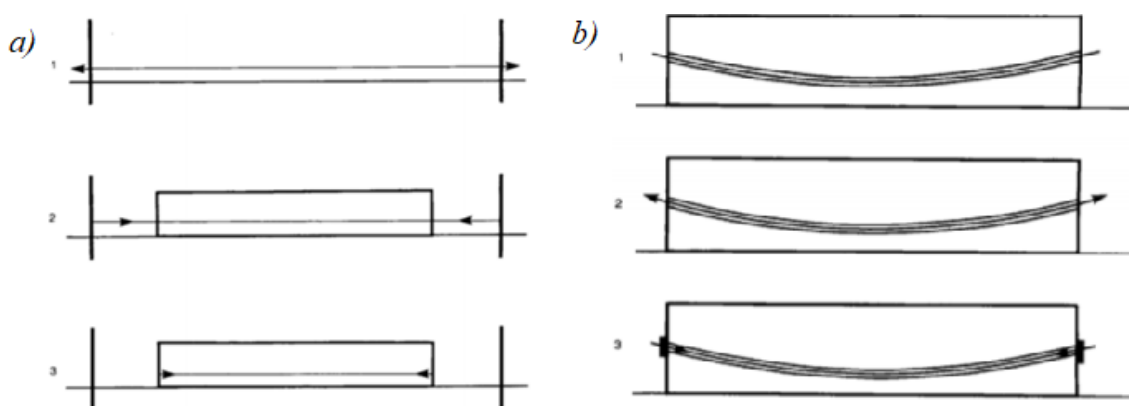
Kod potpunog prednapinjanja napinjanjem armature unesu se tlačna naprezanja u betonu kako bi se sva naprezanja u eksploataciji mogla preuzeti sudjelovanjem čitavog presjeka. Nedostaci ovakvih konstrukcija su velika potrošnja čelika za prednapinjanje, pojava nepredviđenih pukotina, nepotrebna velika sigurnost, te nemogućnost korištenja duktilnosti.

Kod djelomičnog prednapinjanja pukotine koje se otvaraju djelovanjem pokretnog opterećenja ne utječu na trajnost konstrukcije zbog njihovog kraćeg trajanja, pa nije potrebno prednapinjanje za ukupno opterećenje. Nakon prestanka djelovanja pokretnog opterećenja pukotine se zatvaraju pa su takve konstrukcije dovoljno sigurne od korozije i drugih štetnih utjecaja.

Kod ograničenog prednapinjanja za najnepovoljnije kombinacije opterećenja u tijeku građenja i eksploatacije dopuštaju se vlačna naprezanja ograničenih veličina, odnosno manjih od dopuštenih.

2.2.2 Prema načinu prednapinjanja

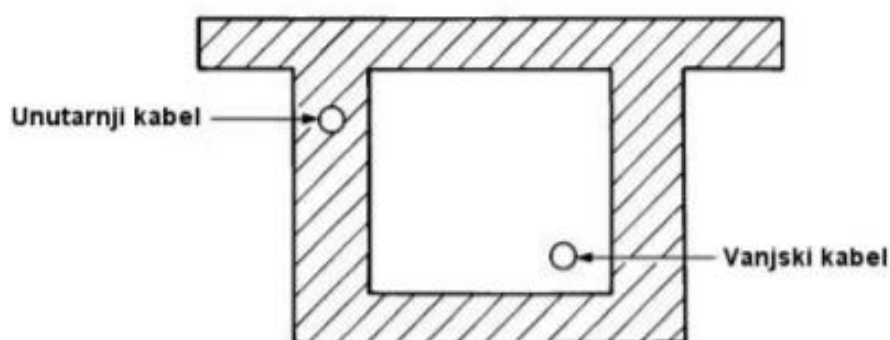
Prema načinu prednapinjanja razlikuje se predhodno (adhezijsko) prednapinjanje te naknadno (kabelsko) prednapinjanje. Kod kabelskog prednapinjanja sam proces prednapinjanja se odvija nakon stvrdavanja betona dok proces adhezijskog prednapinjanja počinje prije stvrdnjavanja betona.



Slika 2.3 Načini prednapinjanja a) Prethodno prednapinjanje b) Naknadno (kabelsko) prednapinjanje [3]

Kod prethodnog prednapinjanja sila se uvodi prije stvrdnjavanja betona. Čelične žice se rastegnu na stazi, betonira element i nakon što element postigne barem 70% čvrstoće, žice se otpuštaju tako da se sva sila iz čeličnih žica adhezijom prenosi na beton.

Naknadnim prednapinjanjem sila prednapinjanja se uvodi nakon stvrdnjavanja betona. Nakon što beton očvrstne kabeli za prednapinjanje se polažu u posebne cijevi u betonu (unutarnje prednapinjanje) ili van betona (vanjsko prednapinjanje). Čelik se u napetom stanju sidri pomoću kotvi na krajevima, te se preko kotvi prenosi na beton.



Slika 2.4 Naknadno prednapinjanje (unutarnje i vanjsko) [3]

2.3 Prednosti i nedostaci prednapetih konstrukcija

Prednosti prednapetih konstrukcija:

- značajna ušteda u betonu i mekom čeliku zbog bolje raspoređenih naprezanja u betonu na istim rasponima,
- mogućnost neprekinutog vođenja armature direktno vodi do većih raspona i vitkijih konstrukcija,
- omogućeni su veći rasponi za isti oblik konstrukcije,
- smanjeni su kratkotrajni i krajnji dugotrajni progibi konstrukcije,
- prednapeta konstrukcija se puno bolje ponaša prilikom nastajanja pukotina - zbog tlaka u betonu količina i širina pukotina je smanjena, a samim time je konstrukcija otpornija na vanjske utjecaje i koroziju, tj. dugotrajnija,
- bolje podnose znatna preopterećenja – pukotine koje pritom nastanu se potpuno zatvaraju nakon uklanjanja tereta ako naponi čelika nisu prešli granicu popuštanja,
- bolja svojstva kod ciklički promjenjivog djelovanja opterećenja, tj. zamora materijala (posljedica male promjene naprezanja u čeliku za prednapinjanje),

- zbog manjeg presjeka prednapete konstrukcije imaju manju masu, te su pogodnije u seizmičkim područjima,
- manja masa konstrukcije automatski vodi do manjih presjeka zidova i stupova, te manjih opterećenja temelja,
- etažne ploče su manje debljine,
- uz dobro planiranje gradnje naknadnim naprezanjem može se reducirati vrijeme gradnje zbog omogućenog bržeg skidanja etažne oplata,
- savladavanje velikih raspona uz veću vitkost i manju masu,
- povećana trajnost zbog izostanka pukotina,
- ubrzanje i racionalizacija montažnog građenja.

Nedostaci prednapetih konstrukcija:

- potrebna je stručna radna snaga zbog zahtjevnijih radova,
- potrebna je posebna oprema,
- velika preciznost u projektiranju i izvođenju,
- skuplji materijal.

2.4 Materijali koji se koriste kod prednapetih elemenata

2.4.1 Čelik za prednapinjanje

Čelik za prednapinjanje je osnovna nosiva armatura u prednapetim betonskim konstrukcijama. Zahtjevana svojstva čelika za prednapinjanje postižu se kemijskim sastavom i posebnim postupkom proizvodnje. Koristi se nelegirani ili niskolegirani čelik. Za razliku od čelika za armiranje, vlačna čvrstoća je povećana većim udjelom ugljika, do 0,9%. Ovisno o tehnološkom postupku, može se postići vlačna čvrstoća do 2000 MPa. Vareni čelični proizvodi nisu dopušteni za prednapinjanje betona.

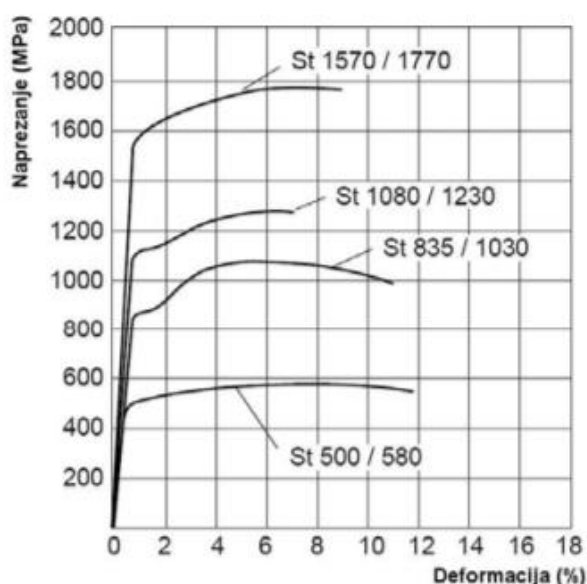
Čelik za prednapinjanje dijeli se, ovisno o veličini relaksacije, na 3 klase:

- Klasa 1: žice i užad s visokom relaksacijom
- Klasa 2: žice i užad s niskom relaksacijom
- Klasa 3: šipke

Osnovni materijal za prednapetu armaturu je toplo valjani čelik. Odgovarajućim legiranim elementima može se povećati granica popuštanja do 800 MPa, a čvrstoća do 1000 MPa. Toplo valjani čelik koristi se za proizvodnju prednapetih šipki koje su se prve rabile za prednapinjanje. Šipke mogu biti glatke ili rebraste, a proizvode se duljine od 6 do 30 m, te

promjera od 12 do 75 mm. Radi jednostavnijeg sidrenja i povezivanja, rebra rebraste šipke su u obliku navoja. Šipke većeg promjera obično se obrađuju ubrzanim hlađenjem, a zatim otpuštanjem kratkotrajnom toplinskom obradom. [3]

Žice su najčešće korištena vrsta čelika za prednapinjanje. Osnovni materijal je toplo valjani, niskolegirani čelik s visokim sadržajem ugljika. Hladno-vučena čelična žica proizvodi se hladnom obradom od toplo valjane žice. Hladnom obradom povećava se čvrstoća žice koja se kreće od 1500 MPa do 1800 MPa te karakteristično naprezanje pri zaostaloj deformaciji od 0,2% koje dostiže 75% karakteristične vlačne čvrstoće. Istodobno, duktilnost žice je smanjena, a unutarnje naprezanje pojavljuje se kao rezultat hladne obrade. Slika 2.5 prikazuje radni dijagram čelika ovisno o vrsti čelika.



Slika 2.5 Radni dijagram čelika za prednapinjanje [4]

Prednapete žice proizvode se promjera od 3 do 10 mm, a površina žice može biti glatka ili profilirana, koja je hladno proizvedena. Žice se isporučuju u kolutovima. Najčešće se koristi uže koje se sastoji od sedam žica. Uže se sastoji od središnje žice, oko koje je ostalih šest žica spiralno ovijeno. Užad se proizvodi promjera od 9 do 17,5 mm, a najčešće se koristi uže promjera 15 mm. Užad s tri žice se koristi kod nekih lagano napetih, serijski proizvedenih prethodno prednapetih stropnih ploča. Užad s 19 i 37 žica, slično oblikovane u žičano uže, su također dostupne. Užad se također isporučuje u kolutovima. Prednost užadi je jednostavnije napinjanje većeg broja žica u isto vrijeme. Pored toga, spiralnim ovijanjem žica u uže poboljšava se prionljivost između užeta i morta za injektiranje ili betona. Unutarnje naprezanje izazvano u žici uslijed hladne obrade, toplinskim postupcima ili mehanički

tijekom sukanja može se ukloniti otpuštanjem naprezanja ili temperiranjem deformacije. Kod otpuštanja naprezanja žica se zagrijava na temperaturi od 350 do 400 °C a zatim sporo hladi. Otpuštenu užad ili žice karakterizira povećana granica proporcionalnosti f_e kao i karakteristično naprezanje pri zaostaloj deformaciji od 0,2% koje dostiže do 85% čvrstoće. Otpuštanjem se djelomično smanjuje opuštanje čelika. [8]

Modul elastičnosti obično se uzima od 205 do 210 GPa za šipke, 190 do 205 GPa za žice, i 175 do 195 GPa za užad. [8]

Zahtjevi na čelik za prednapinjanje:

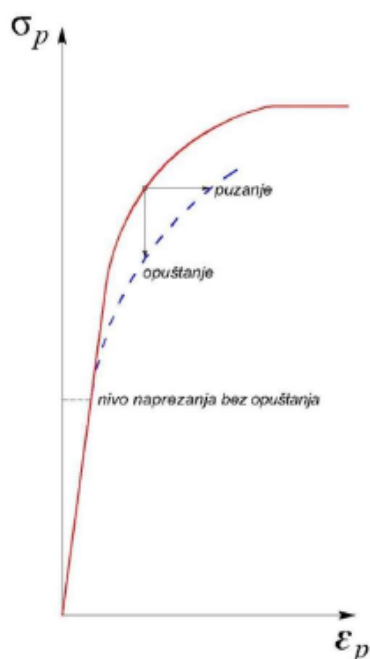
- Visoka čvrstoća,
- Niska relaksacija,
- Mogućnost oblikovanja savijanjem na hladno,
- Zavarljivost,
- Niska osjetljivost na koroziju (posebno naponsku),
- Geometrijska pravilnost,
- Velike dužine pri isporuci,
- Ponekad dobra prionjivost,
- Ponekad otpornost na zamor.

Tablica 2.1 Najmanji broj natega [7]

Vrsta natega	Najmanji broj
Pojedinačna šipka ili žica	3
Šipke i žice, skupljene u nategu ili uže	7
Natega osim užadi **	3

Tablica 2.1 vrijedi ako se pretpostavi jednak promjer svih žica, šipki ili natega. Taj zahtjev može se također smatrati ispunjenim ako element sadrži najmanje jedno uže sa sedam ili više žica (promjer žice $\geq 4,0$ mm). [7]

Vrlo važna karakteristika koja ima utjecaj na projektiranje prednapetih betonskih konstrukcija je puzanje, ili opuštanje. Puzanje se manifestira kao povećanje deformacije čelika izloženog konstantnom vlačnom naprezanju visokog inteziteta. Deformacija se s vremenom povećava. Inverzna pojava je opuštanje. Opuštanjem se smanjuju naprezanja u čeliku tijekom vremena koji je izložen konstantnom deformacijskom opterećenju tj. izduženju.



Slika 2.6 Vremenski ovisna svojstva čelika za prednapinjanje [8]

Opuštanje se manifestira smanjenjem naprezanja u čeliku za prednapinjanje nategnutom između dva mjesta (sidra) na gredi. Nakon određenog nivoa počinje opuštanje koje se povećava s povećanjem naprezanja u čeliku. Taj nivo naprezanja dostiže približno 50% karakterističnog naprezanja pri zaostaloj deformaciji od 0,2%. [3]

2.4.2 Beton

Zahtjevi na beton u prednapetim konstrukcijama su visoka tlačna čvrstoća, mali iznos skupljanja i puzanja, te trajnost.

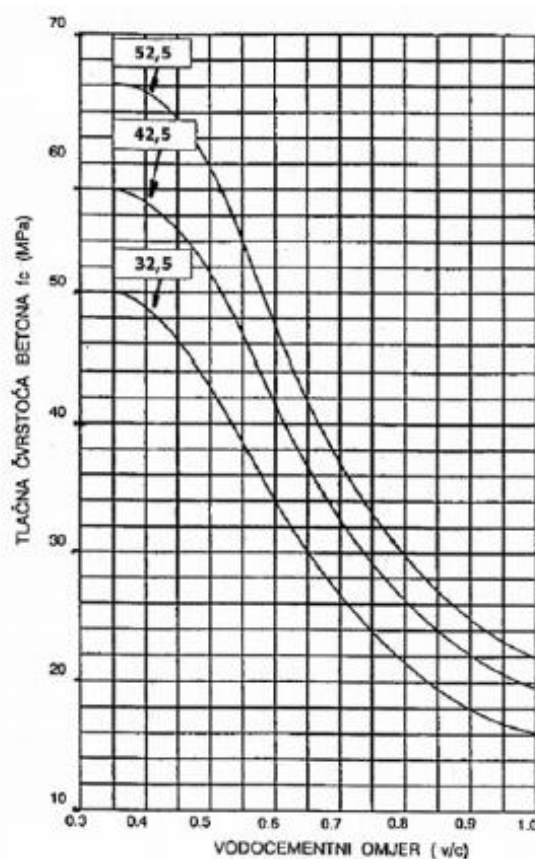
Beton je heterogeni materijal sastavljen od vapnenačkog ili silikatnog sirovog agregata (drobljena stijena ili šljunak i pijesak), portland cementa, vode i aditiva. Prednapeti beton je načinjen od kvalitetnog betona čvrstoće od 40 do 60 MPa, dok neke države također proizvode beton visoke čvrstoće s čvrstoćom od 80 do 120 MPa. Sastav betonske smjese za prednapeti beton je uvjetovan zahtjevom za visokom čvrstoćom, obradivošću, brzinom očvršćivanja i reološkim svojstvima.

Cement je glavni sastojak betona. Za prednapeti beton koristi se kvalitetan portland cement razreda čvrstoće 42,5 ili 52,5 u količini od 400 do 420 kg/m³. Veći udio cementa rezultira većom čvrstoćom betona do količine od oko 550 kg/m³, dok daljnje povećanje količine cementa više ne očvršćava beton već dovodi do većeg skupljanja i puzanja.

Količina vode u betonu je specificirana relativno u odnosu na količinu cementa preko vodocementnog v/c omjera. Postoji približno hiperbolički odnos između tlačne čvrstoće betona i vodocementnog omjera, kao što je prikazano na slici 2.7. Donja granica za vodocementni omjer je oko $v/c = 0,25$ koja predstavlja količinu vode koja je s kemijskog gledišta neophodna za hidrataciju. Veći v/c omjer smanjuje čvrstoću betona koji je dobre kvalitete glede šupljina i pora koje se formiraju u betonu dok s povećanjem v/c omjera raste propusnost, skupljanje i puzanje.

Radi postizanja zahtjevane kvalitete, agregat mora biti tvrd, bez pora, stalnog volumena i bez primjesa. Omjer krupnog i sitnog agregata treba biti oko 65:35.

Beton visoke čvrstoće sadrži uz već spomenute sastojke i mikro-agregat. Najčešći mikroagregat je silicijska prašina koja je dobivena kao nusproizvod u proizvodnji silicijskih legura ili silicijskog metala u električnoj lučnoj peći. Vrlo fina silicijska prašina sadržava uglavnom silicijski dioksid i približno je 100 puta sitnija od portland cementa te može zamijeniti oko 5 do 10 % cementa.



Slika 2.7 Ovisnost tlačne čvrstoće betona i vodocementnog omjera za različite razrede portland cementa [8]

Svojstva betonske smjese se također kontroliraju pomoću dodataka, među najvažnijima su plastifikatori i superplastifikatori koji poboljšavaju obradivost svježeg betona, te aditivi za ubrzavanje očvršćivanja. Ovisno o sastavu betonske smjese, gustoća običnog betona varira od 2200 do 2600 kg/m³. Tipična gustoća običnog betona bez armature je 2400 kg/m³, dok propisi za analizu konstrukcija od prednapetog betona uglavnom specificiraju gustoću od 2500 do 2600 kg/m³. [8]

2.4.2.1 Samozbijajući beton

Samozbijajući beton (eng. Self-compacting concrete, SCC) je inovativna vrsta betona koji tečenjem bez upotrebe vibracijskih uređaja u potpunosti zaobilazi armaturu i popunjava oplatu. Poboljšana fluidnost, dobra otpornost segregaciji komponenata tijekom tečenja, visoka čvrstoća u očvrslom stanju, lakša ugradnja i povećana trajnost samo su neke od karakteristika koje razlikuju samozbijajući beton od običnog pa se zbog toga može koristiti kod prednapetih elemenata. [2]

2.4.2.1.1 Razvoj samozbijajućeg betona

Osnovni razlozi početka intenzivnih i vrlo ozbiljnih istraživanja na planu dobivanja samozbijajućih betonskih mješavina bili su veliki problem s trajnošću armiranobetonskih konstrukcija i veliki nedostatak kvalificirane radne snage za kvalitetno ugrađivanje betona. Istraživanja su počela u Japanu oko 1983. godine. Potrebno je napomenuti da je problem trajnosti betona, odnosno betonskih konstrukcija, još mnogo ranije, negdje polovinom sedamdesetih godina, počeo ozbiljnije zaokupljati pažnju istraživača na području tehnologije betona, odnosno pažnju građevinskih inženjera.

Rješenje za navedene probleme ponudio je profesor Okamura sa Sveučilišta u Tokiju 1988. godine. Ponudio je prvi prototip samozbijajućeg betona koristeći materijale koji su već bili dostupni na tržištu. Svojstva tog betona bila su definirana kao:

- (1) u svježem stanju mora imati svojstvo samozbijanja,
- (2) u ranoj starosti traži se izbjegavanje inicijalnih defekata,
- (3) u očvrslom stanju mora biti otporan na vanjske utjecaje.

Kasnije studije razvoja samozbijajućeg betona, uključujući osnovnu studiju obradljivosti betona, iznijeli su Ozawa i Maekawa.

Krajem 90-ih godina samozbijajući se beton prema japanskim iskustvima počeo primjenjivati i u Europi. Ključni sastojak za izradu samozbijajućih betona jest nova

generacija superplastifikatora na osnovi polikarboksilnih etera koja je omogućila projektiranje sastava betonske mješavine potrebne viskoznosti i granice tečenja.

Danas su ti betoni postali gotovo standardni betoni s gledišta izvedbe armirano-betonskih konstrukcija kada se traže visoka trajnosna svojstva ili postoji otežana ugradnja.

2.4.2.1.2 Karakteristike i svojstva [9]

SCC beton, koji ima slične karakteristike kao i očvršli standardni beton po pitanju tlačnih i vlačnih čvrstoća, ima neka specifična svojstva:

- lako se ugrađuje i ekonomičan je,
- odgovara za sve primjene koje zahtijevaju vrhunsku izvedbu i završnu obradu,
- smanjuje opseg poslova koji su potrebni za stavljanje, izravnavanje i završnu obradu,
- primjeren je za teške konstrukcije i složene oplata,
- ima povećanu izvedivost i odličnu ranu čvrstoću,
- samo-izravnavanje smanjuje vrijeme potrebno za ugradnju,
- ne zahtijeva zbijanje,
- omogućuje smanjenu buku i probleme vezane za zdravlje i sigurnost (tijekom procesa ugradnje),
- glatka površina koja zahtijeva minimalnu daljnju završnu obradu,
- smanjuje propusnost i pojavu zarobljenog zraka.

2.4.2.1.3 Dizajniranje sastava

Svaki cement je manje ili više pogodan ukoliko su postignuta reološka svojstva betona. Neki cementi zbog tzv. finoće mliva su više ili manje poželjni kad je u pitanju postizanje tražene konzistencije betona.

Izbor vrste cementa prije svega ovisi i o traženim svojstvima:

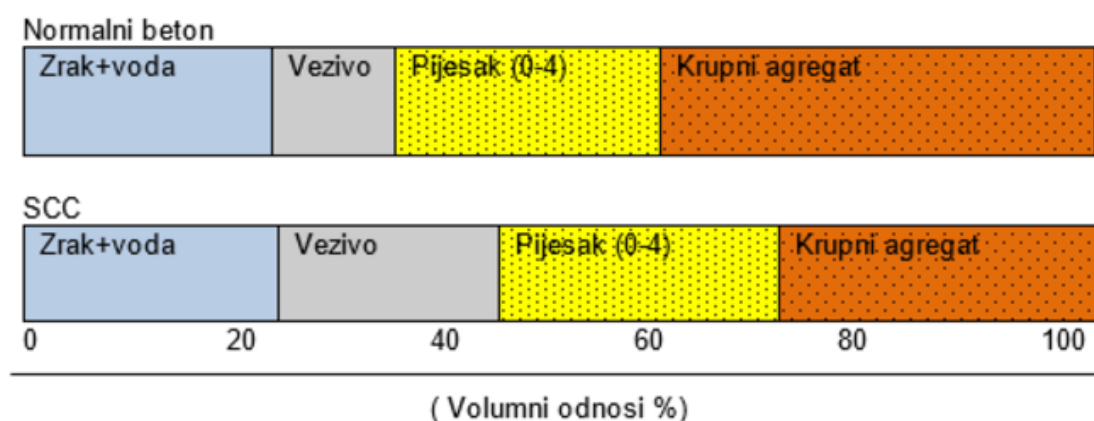
- razvoj ranih čvrstoća: primjeniti cement klase CEM I ili CEM II/A-S ili ostale cemente s visokim udjelom klinkera (preko 80%),
- otpornost na agresivne uvjete XF1-XF4: primjeniti CEM II/B-M, CEM II/A-M, CEM II/A-S,
- sulfatna otpornost: primjeniti CEM III/B SR ili CEM III/A,
- kloridna otpornost: primjeniti CEM III A,
- elementi sa adhezionim prednapinjanjem .

Pored čiste vode moguće je koristiti i recikliranu vodu, ali tada treba uzeti u obzir sitne čestice sadržane u vodi.

Agregat koji se upotrebljava mora biti sukladan svojstvima koje propisuju norme. Izbor gornje nominalne veličine agregata ovisi o:

- konačnoj tlačnoj čvrstoći,
- zaštitnom sloju armature,
- gustoći armature,
- razredu izloženosti agresivnim utjecajima.

Dimenzioniranje sastava se uglavnom bazira na već prokušanim recepturama diljem svijeta. Svim tim recepturama zajedničko je jedno: ukupna količina sitnih čestica u betonu mora biti dovoljno visoka da bi se postiglo visoko realoško svojstvo betona a da se ujedno stvori dovoljno cementne paste koja će održati na okupu krupni agregat prilikom kretanja betona kroz oplatu i armaturu.



Slika 2.8 Usporedba normalnog i samozbijajućeg betona [9]

Udio sitnih čestica među kojima su voda, vezivo te pijesak, kao što je prikazano na slici 2.8, volumno iznosi preko 70% kod SCC dok kod normalnih betona iznosi do 60%. Zbog toga je i količina veziva veća nego kod normalnih betona jer je i ukupna površina agregata veća.

U današnjoj praksi često se pod pojmom veziva kombiniraju udjeli cementa kao osnovnog veziva i mineralnih dodataka tipa I (fileri, inertni prah) ili dodataka tipa II (leteći pepeo, mikrosilika). Odabir jednog od ovih dodataka ovisi i o originalnom porijeklu agregata, ali i nekim trajnosnim svojstvima betona. Iz prakse je poznato da agregati dobiveni drobljenjem vapnenačkih ili dolomitno-vapnenačkih stijena daju veću količinu sitnih čestica

od onih dobivenih prirodnim načinom eksploatacije i separacije (riječni ili jezerski agregat). Agregati riječnog porijekla obično daju veću obradljivost betona, ali zahtijevaju i nešto veću količinu veziva. Gornja nominalna veličina agregata ne bi smjela prelaziti 11 do 20 mm. Vodo/praškasti (cement + mineralni dodatak) odnosi su u praksi vrlo niski i kreću se od 0,35 do 0,4. Zbog toga je potrebno koristiti vrlo jake superplastifikatore.

Neizbježno je koristiti kemijske dodatke – superplastifikatore. Pored njih ponekad je potrebno koristiti modifikatore viskoziteta koji pomažu kod varijacija sadržaja vlage u agregatu, sadržaju sitnih čestica te granulometrijskog sastava agregata.

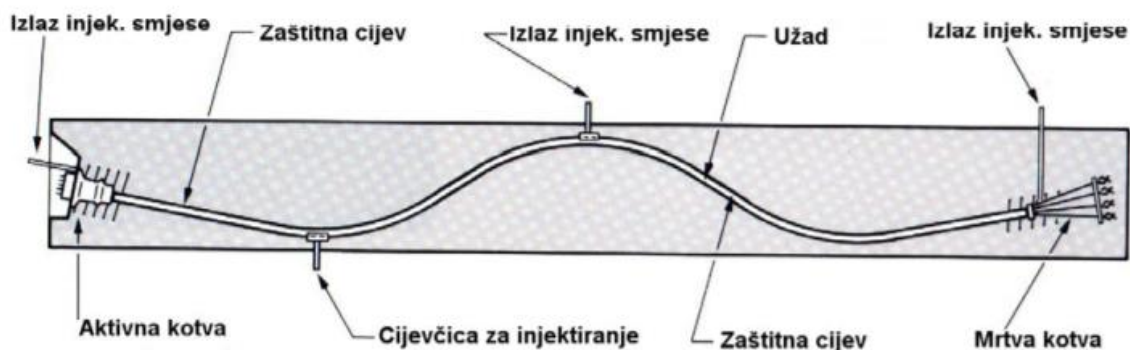
2.4.2.1.4 Primjena samozbijajućeg betona

Samozbijajući beton se koristi kod sljedećih betonskih elemenata:

- gusto armirani konstruktivni elementi kada ne postoji mogućnost vibriranja sa standardnim pervibratorima,
- složeno izvedeni elementi kada je otežana mogućnost ulijevanja betona u svaki dio tog elementa (mostogradnja, tunelogradnja...),
- betonski elementi kod kojih beton ostaje završni vidljivi dio konstrukcije zbog izgleda same površine betona.

2.4.3 Mort za injektiranje

Cementni mort za injektiranje štiti natege od korozije te osigurava sprezanje natege i konstruktivnog elementa. Kako bi se ostvarila dobra zaštita od korozije, čelik mora biti potpuno obavijen cementnim mortom dostatne gustoće. Ne smiju se pojavljivati nezapunjeni dijelovi gdje se zadržao zrak ili voda. Mort za injektiranje se pod pritiskom ubrizgava u najnižoj točki kabela, a odzračivanje i izlaz morta se događaju u najvišoj točki kao što je to prikazano na slici 2.9.

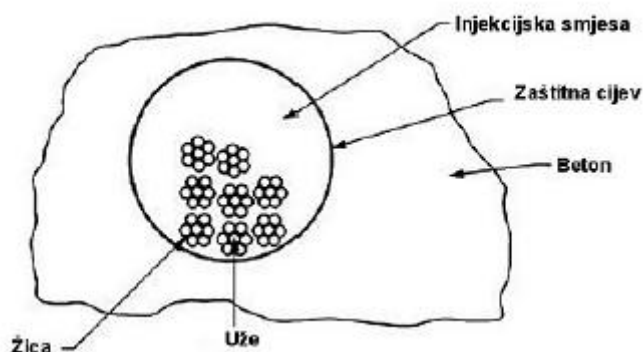


Slika 2.9 Uzdužni presjek prednapete grede [3]

Izvedba ukazuje na činjenicu da je problematično osiguranje potpune ispunjenosti zaštitne cijevi cementnim mortom bez šupljina. Najmanje šupljine mogu dovesti do korozije čelika. Cementni mort se ne smije injektirati pod velikim tlakom (2 MPa ili druga vrijednost određena postupkom injektiranja) niti velikom brzinom jer se tako onemogućuje stvaranje zračnih čepova, segregacija, oštećivanje konstrukcije, opreme i ventila, štite se radnici te se omogućuje kontrola protoka morta. [3]

Cementni mort za injektiranje mora ispunjavati posebne zahtjeve:

- malo izlučivanje vode, sedimentacija,
- kohezija u plastičnom stanju do završetka postupka injektiranja,
- malo izdvajanje cementnog morta,
- mala deformacija zbog skupljanja,
- povećanje volumena stvaranjem mikropora,
- dostatna tlačna čvrstoća i prionljivost,
- dostatna otpornost na zamrzavanje.



Slika 2.10 Poprečni presjek kabela za prednapinjanje [3]

Cementni mort ne smije biti proizveden s previše vode jer se ona ne može upiti u okolni beton zbog zaštitne cijevi. Izlučena zaostala voda povećava opasnost od korozije i pri niskim temperaturama može se zamrzavati. Ispitivanja su pokazala da se u zaštitnim cijevima s gornje strane u prvim satima, zbog sedimentacije, može stvoriti tanka mješavina cementa i vode ili mjehurići zraka. Zbog toga se kod velikih natega treba naknadno injektirati. Najveće izlučivanje u pravilu nastupa nakon 3 - 4 sata. Mjerenja treba provesti u tom vremenskom razmaku. S druge strane, cementni mort ne smije biti previše suh jer se zaštitna cijev može začepiti. Ispitivanja su pokazala da poteškoće s vodom rastu sa starošću cementa. Stoga je

potrebno ograničiti starost cementa u proizvodnji cementnog morta za injektiranje. Cement ne smije biti mlađi od 2 do 3 dana kako bi se dostatno ohladio niti stariji od tri tjedna.

Očvršćivanje cementnog morta za injektiranje može početi tek nakon potpunog injektiranja zaštitne cijevi. U nekim slučajevima može biti potrebno i nekoliko sati za dovršenje postupka injektiranja. Dulji vremenski periodi postižu se dodacima koji ne smiju sadržavati kloride. Kod dodataka treba paziti na činjenicu da njihovo djelovanje ovisi o temperaturi. Najbolje vrijednosti bez dodataka postižu se pri temperaturi morta od oko 15 °C. Cementni se mort injektira uz ispunjene uvjete za temperaturu zraka, konstrukcijski element i cementni mort.

Kod izdvajanja cementnog morta može doći do zarobljene vode ili velikih promjena volumena tijekom perioda očvršćivanja. Stoga je potrebno birati malu vrijednost vodocementnog omjera v/c. U isto vrijeme mort mora biti i dostatno plastičan te se stoga v/c omjer treba birati u rasponu 0,40 do 0,44.

Svojstva cementnog morta za injektiranje u postupku potvrđivanja sukladnosti ispituju se normiranim postupcima (HRN EN 446), a ispituju se kohezija, izlučivanje vode, promjena volumena te čvrstoća. [3]

Promjer zaštitne cijevi kabela ovisi o broju užadi. Prostor između natege i zaštitine cijevi može se ispuniti i s drugim materijalima kao što su mast, ulje ili vosak. Takva natega (unbonded) nije spojena s presjekom i kod nje postoji drugačiji tretman kod dokaza na slom (proračun uzdužne armature). Kod natege injektirane injekcijskom smjesom na bazi cementa (bonded) dolazi do promjene deformacija od djelovanja ostalih opterećenja. Kod bonded natege iz tog razloga dobivamo manje armature iz dokaza na slom.

2.5 Sredstva za prednapinjanje

Sastavni dijelovi natege su žice, užad te šipke. One se ugrade u element te se prednapinju pomoću opreme koju sačinjavaju:

- preše za napinjanje natega ,
- oprema za injektiranje natega,
- naprave za uvlačenje užadi ,
- hidrauličke pumpe.

2.5.1 Preše za napinjanje natega

Postoje preše za prednapinjanje pojedinačnih užadi te preše za prednapinjanje kablova.



Slika 2.11 Preše za napinjanje natega a) za pojedinačna uža b) za kablove [10]

Preše za prednapinjanje pojedinačnih užadi su opremljene sa crijevima visokog pritiska i brzim spojnicama za povezivanje na hidrauličnu pumpu. Postoji više modela ovih preša ovisno o kapacitetu, hodu preše i vrsti natega koja se napinje. Preša za prednapinjanje pojedinačnog užeta prikazana je na slici 2.11a).

Preše za prednapinjanje kablova razlikuju se po svojim karakteristikama, prije svega po kapacitetu. Opremljene su crijevima visokog pritiska i brzim spojnicama za povezivanje na hidrauličnu pumpu. Metalni držač preše fiksiran je za dva kružna oslonca koji omogućavaju okretanje tijela preše u odnosu na uzdužnu os za 350° čime je značajno olakšano postavljanje užadi u prešu. Baždare se u paru sa odgovarajućom hidrauličnom pumpom na osnovu čega se izdaje potvrda koja vrijedi šest mjeseci. Preša za napinjanje kablova prikazana je na slici 2.11b).

Napinjanje se može izvoditi u više faza ukoliko jedan hod preše nije bio dovoljan te tijekom napinjanja treba provoditi razna mjerenja kako bi se odredila stvarno prenesena sila. Njena vrijednost se dobije preko tlaka ulja u cilindrima hidrauličke preše. Treba paziti da ne dođe do blokiranja natega u cijevi, što se kontrolira mjerenjem izduženja natega. Također, treba spriječiti preveliko proklizavanje klina.

2.5.2 Oprema za injektiranje natega

Oprema za injektiranje natega mora zadovoljiti:

- Mješalica mora biti upravljana mehanički,
- Ukoliko je mješalica premalena da bi popunila cijev iz jednog mješanja potrebno je koristiti mehanički agitator,
- Pumpa mora biti pod pritiskom od minimalno 10 bara,

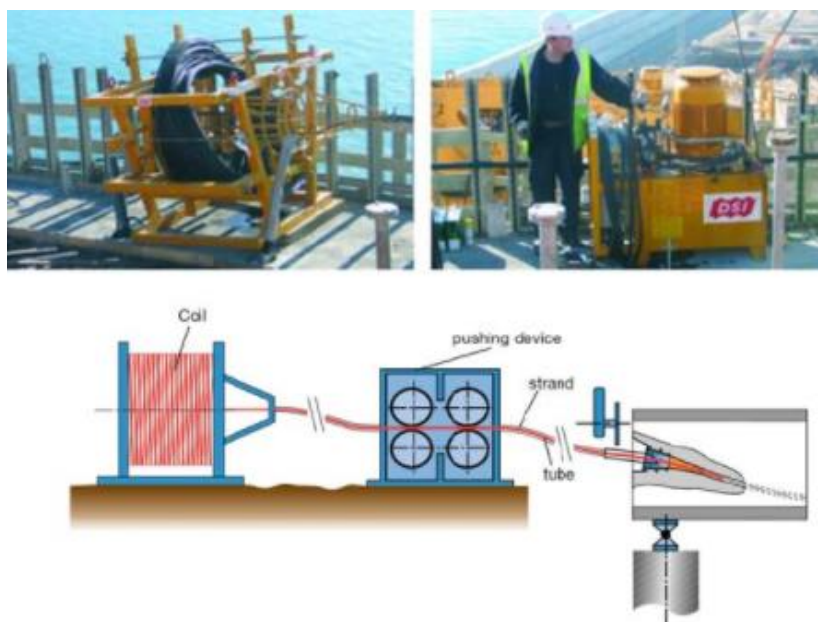
- Treba postojati sigurnosni ventil koji sprječava prelazak razine tlaka preko 20 bara,
- Hidraulički krugovi trebaju imati brtvene spojeve.



Slika 2.12 Oprema za injektiranje [11]

2.5.3 Naprave za uvlačenje užadi

Naprave za uvlačenje užadi proizvode se sa definiranom maksimalnom brzinom guranja užadi u cijev te maksimalnom dužinom koju je moguće uvući. Princip rada prikazan je na slici 2.13.



Slika 2.13. Uvlačenje užadi [11]

2.5.4 Hidrauličke pumpe

Hidrauličke pumpe se proizvode u više modela koji se razlikuju po karakteristikama i predviđenoj upotrebi. Svi uređaji imaju tri radna kola: za zatezanje, umetanje i vraćanje. Operativna kola imaju regulacijske i sigurnosne ventile za zaštitu od prekoračenja dozvoljenog pritiska. Pogon preša se vrši preko tri izlazna hidraulična priključka. Kod nekih pumpi upravljanje radom vrši se pomoću upravljačke jedinice koja je povezana kabelom.



Slika 2.14 Hidraulička pumpa [10]

2.5.5 Sidrena glava i klinovi

Sidrene glave ili usidrenja ovisno o sustavu prednapinjanja čine:

- adhezijska sidra na osnovi prijanjanja,
- sidra s navojem,
- sidra na osnovi klina i čahure ,
- sidra na osnovi glavice.



Slika 2.15 Sidro kabela za prednapinjanje [3]

Sidra su mehaničke naprave koje se koriste za prijenos sile prednapinjanja iz natege u beton pomoću koncentriranog pritiska ispod sidrene ploče. Sidrena ploča je obično postavljena u armaturni koš prije betoniranja i pričvršćena vijcima na oplatu sa strane lica betonskog elementa. Sidro mora biti postavljeno u istoj osi kao i cijev natege, a sidrena glava mora biti okomita na os cijevi. Za sidra nagnutih natega oblikuje se udubljenje ili sidreni džep na čelu grede, koji predstavlja prostor između sidrene ploče i vertikalne ravnine kraja grede.

Klinovi su dijelovi sidra koji služe za sidrenje užadi u sidrenu glavu i rade se od visokokvalitetnog čelika. Obično se sastoje od dva ili tri dijela, ovisno o sustavu koji se koristi. Nakon što se sastave ostavljaju otvor za užu u sredini klina. Jednim klinom se mogu usidriti do tri užeta. Prikazani su na slici 2.16.



Slika 2.16 Klinovi za sidrenje [11]

3 DOSADAŠNJA ISPITIVANJA

3.1 Analiza preraspodijele naprezanja kod prednapinjanja (Analysis of bond stress distribution for prestressing strand by Standard Test for Strand Bond, Canh N. Dang, Cameron D. Murray, Royce W. Floyd, W. Micah Hale, J.R. Martí-Vargas) [12]

3.1.1 Uvod

Kontaktna zona čelika i betona može se definirati kao posmično naprezanje između prednapetog čelika i betona koji ga okružuje. Veza omogućuje prijenos sile prednapinjanja na beton te osigurava zajedničko odupiranje betona i čelika vanjskom opterećenju. Ako se djeluje silom u određenom smjeru tada će i naprezanje biti u tom smjeru. Ukoliko veza nije dovoljno dobra može se pojaviti klizanje između čelika i betona. Janney je prikazao 3 mehanizma povezanosti čelika i betona, a to su adhezija, Hoyerov učinak te mehaničko povezivanje. Adhezija je kemijska veza između čelika i betona. Nakon što jednom dođe do prokliznuća ona je oslabljena, te se ne može vratiti čime se gubi prijanjanje. Hoyerov učinak je posljedica zatezanja i otpuštanja čeličnih kabela. Mehaničko povezivanje je otpor koji se javlja između čelične šipke i betona.

Do sada je napravljen velik broj pull-out testova kako bi se definirala veza između čelika i betona. Moustafa Pull-out Test je najstarije napravljeni test te se u njemu šipka izvukla iz betona. Drugi test je Post Tensioning Institute (PTI) Bond Test u kojem se šipka izvlačila iz cementnog morta, a proveden je kako bi se ispitale šipke korištene kod sidrenja. North American Strand Producers (NASP) Bond Test izveden je iz PTI Testa tako što je korišten mort kako bi se smanjilo skupljanje. Test je proveden u četiri kruga ispitivanja, a suvremena metoda istog testa je poznata kao Standard Test for Strand Bond (STSB) koja je razvijena u svrhu procjene površinskih uvjeta prednapinjanja. STSB mjeri silu izvlačenja na dnu uzorka koja odgovara klizanju od 0,1 inča, odnosno 2,5 mm. Prosječna vrijednost 6 ispitanih uzoraka smatra se vrijednosti STSB koja je korištena da prikaže kvalitetu veze između čelika i betona. Također, može se mjeriti sila kod klizanja od 0,1 inča, odnosno 0,25 mm. Ta vrijednost se smatra prvim prokliznućem u prednapregnutom elementu. Unatoč tome, vrijednosti sile i prokliznuća nisu proporcionalne, odnosno prosječna vrijednost posmičnog naprezanja iz te sile nije linearno proporcionalna sa izmjerenim prokliznućem.

Mjerenje prokliznuća šipke je lakše od mjerenja prokliznuća između betona i čelika jer se prokliznuće šipke prikazuje kao pomak izmjeren na kraju. Za naprednapeti model veza između čelika i betona je objašnjena u *fib Model Code for Concrete Structures 2010* dok za prednapeti beton još nije istražena do kraja.

3.1.2 Eksperimentalni dio

3.1.2.1 Materijal

U ovoj studiji su korišteni nisko otpuštajući čelik 270, promjera 0,6 inča (15,2 mm) te 0,7 inča (17,8 mm). Svojstva zadovoljavaju normu ASTM A416. Napravljeno je 18 uzoraka 0,6 inča (15,2 mm) te su skladišteni u laboratoriju *Inženjerskog istraživačkog centra sveučilišta Arkansas (UARK)* na način da se spriječe utjecaji okoline.

Ostali podaci uzeti su iz prethodne studije.

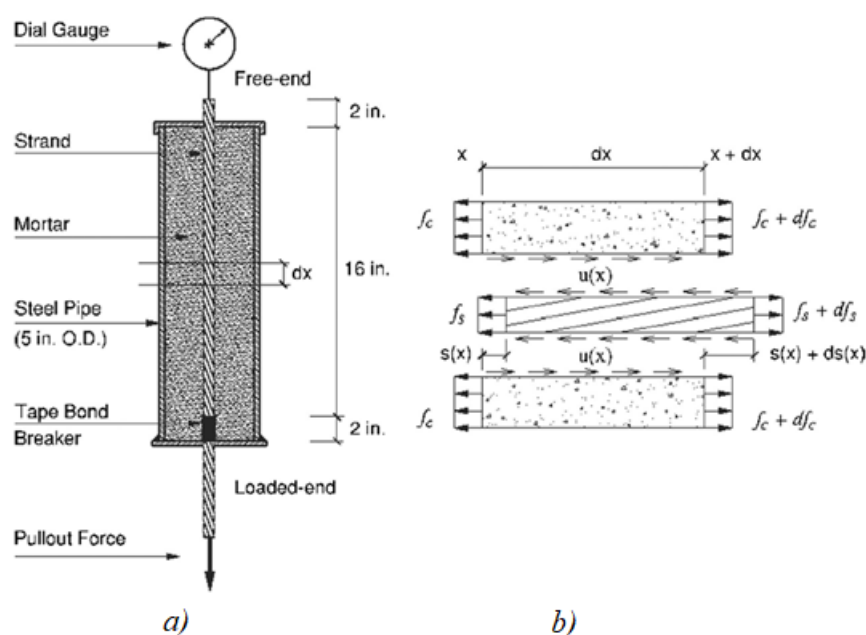
3.1.2.2 STSB

STSB je standardni test koji pruža pouzdane i reprezentativne procjene kvalitete prednapetog čelika. Uzorak se sastoji od užadi čelika promjera 12,5 mm, dužine 450 mm, čelične cijevi promjera od 125 mm te čelične ploče 150 mm. Šupljina promjera 17,2 mm se nalazi na sredini čelične ploče koja je zavarena na kraj čelične cijevi kako bi osigurala injektiranje morta i ravnu površinu. Uže je postavljeno u sredinu čelične ploče te prolazi kroz šupljinu.



Slika 3.1 Uređaj za ispitivanje [12]

UARK test je proveden pomoću uređaja prikazanog na slici 3.1 sa mogućnosti nanošenja sile od 445 kN. Vlačno opterećenje se nanosi na užu brzinom $0,100 \text{ in./min} \pm 0,005 \text{ in./min}$ odnosno $2,54 \text{ mm/min} \pm 0,0127 \text{ mm/min}$. Pomak je mjereno sa LVDT uređajem DCT1000A, a praćen pomoću MTS sistema. Za svaki uzorak je zabilježeno prokliznuće slobodnog kraja od 0,01 in. odnosno 0,25 mm te 0,1 inč (2,5 mm) te pripadna sila koja je zabilježena za pomak od 2,5 mm je postala STSB vrijednost. Te vrijednosti su korištene kako bi prikazale vezu između prokliznuća i posmičnog naprezanja između čelika i betona. Postavke izvođenja testa su prikazane na slici 3.2a).



Slika 3.2 a) postavke izvođenja testa b) sile na elementu duljine dx [12]

ASTM A1081 ne prikazuje minimalne raspone za STSB vrijednosti, ali s obzirom na dosadašnja ispitivanja postoje preporučene vrijednosti. Za promjer uža 15,2 mm preporuča se prosječna sila od 12 600 lbf (56 kN) sa donjom granicom svakog testa od 10 800 lbf (48 kN). Užadi promjera 17,8 mm zadovoljavaju silu od 14 700 lbf (65,4 kN), sa donjom granicom od 12 600 lbf (56 kN).

STSB podaci se sastoje od 6 uzoraka koji imaju promjer šipke 15,2 mm te 3 uzorka s promjerom šipke od 17,8 mm. Označeni su S06-1 do S06-6 za 0,6 in. (15,2 mm) te S07-1 do S07-3 za 0,7 in. (17,8 mm) promjere užadi.

Tablica 3.1 STSB vrijednosti za užad promjera 0,6 in. (15,2 mm) te 0,7 in. (17,8 mm) [12]

Test	d_b (in.)	f_c (psi)	N	STSB at slip of 0.01 in.		STSB at slip of 0.1 in.		Ratio of STSB at 0.01 in. and 0.1 in. slip	α
				Average (lb)	STD (lb)	Average (lb)	STD (lb)		
S06-1 ^a	0.6	3650	6	14,590	1170	22,230	3300	0.656	0.183
S06-2 ^a	0.6	4120	6	14,270	1670	20,590	2580	0.693	0.159
S06-3 ^b	0.6	5000	6	14,490	1720	19,180	2110	0.755	0.122
S06-4 ^c	0.6	4770	6	14,500	NA	19,300	1120	0.751	0.124
S06-5 ^c	0.6	4780	6	12,890	NA	20,230	1240	0.637	0.196
S06-6 ^c	0.6	4880	6	13,540	NA	18,900	1340	0.716	0.145
S07-1 ^c	0.7	4780	4	14,560	NA	21,250	550	0.685	0.164
S07-2 ^c	0.7	4880	4	14,100	NA	22,560	2450	0.625	0.204
S07-3 ^c	0.7	5000	4	13,890	NA	22,300	1850	0.623	0.206

Rezultati su prikazani u tablici 3.1. Za promjer od 15,2 mm STSB vrijednosti se kreću u rasponu od 18 000 lbf (80,1 kN) do 23 000 lbf (102,3 kN) dok kod promjera od 0,7 inči (17,8 mm) STSB vrijednosti su u rasponu od 21 000 lbf (93,4 kN) do 23 000 lbf (102,3 kN). Svi uzorci imaju prihvatljive vrijednosti te su zadovoljili minimalne pragove.

3.1.3 Analitičko istraživanje

3.1.3.1 Odnos naprezanje - prokliznuće čelika

Analitička veza između posmičnog naprezanja te prokliznuća između čelika i betona je uzeta iz *fib Model Code for Concrete Structures 2010* koji je izvorno razvijen za neprednapeti čelik. Za ovo istraživanje, koeficijenti su određeni iz STSB podataka. Kao što je objašnjeno, STSB podaci su mjereni za prokliznuće od 0,01 inč (0,25 mm) te 0,1 inč (2,5 mm) na slobodnom kraju. Prosječno posmično naprezanje je dobiveno iz sile povlačenja te se koristi u jednadžbi naprezanje - prokliznuće.

$$u(x) = u_{01} \left(\frac{s(x)}{s_{01}} \right)^\alpha \quad [3.1]$$

Eksponencijalni koeficijent α predstavlja oblik dijagrama. Vrijednost α koja odgovara 1,0 je korištena u studiji Abrishami i Mitchell te prikazuje linearnu vezu između posmičnog naprezanja i prokliznuća u zoni između čelika i betona. Za ovo istraživanje, vrijednost α izvedena je za dvije STSB vrijednosti; prosječno posmično naprezanje koje odgovara prokliznuću od 0,01 in. (0,25 mm) te 0,1 in. (2,5 mm), kao što je to prikazano u jednadžbi 3.2.

$$\alpha = \frac{\ln(u_{001}/u_{01})}{\ln(s_{001}/s_{01})} \quad [3.2]$$

gdje je:

u_{001} - posmično naprezanje za prokliznuće od 0,01 in. (0,25mm),

u_{01} - posmično naprezanje za prokliznuće od 0,1 in. (2,5mm),

s_{001} - prokliznuće od 0,01 in. (0,25 mm),

s_{01} - prokliznuće od 0,1 in. (2,5mm).

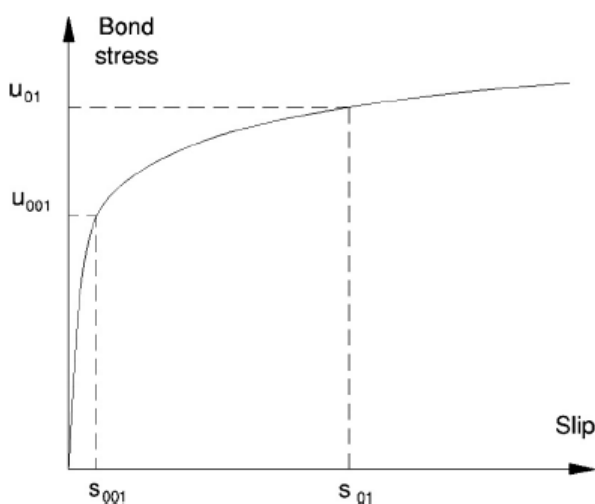
$$\alpha = \frac{\ln(P_{001}/P_{01})}{\ln(0.1)} \quad [3.3]$$

gdje je:

P_{001} - vrijednost sile za prokliznuće od 0,01 in. (0,25mm),

P_{01} - vrijednost sile za prokliznuće od 0,1 in. (2,5mm).

Numeričke vrijednosti α kreću se u vrijednosti od 0,12 do 0,21.



Slika 3.3 Veza posmičnog naprezanja i klizanja [12]

Na slici 3.3 je prikazan oblik krivulje posmično naprezanje- prokliznuće za vrijednosti STSB. Različite STSB vrijednosti daju različite vrijednosti dijagrama.

3.1.3.2 Raspodjela naprezanja

Na slici 3.2b) prikazani su detalji sila koje djeluju na element duljine dx koje su korištene za definiranje jednačbe. Prokliznuće $s(x)$ je relativan pomak između prednapetog čelika i betona.

$$\frac{ds(x)}{dx} = \frac{df_s}{E_s} - \frac{df_c}{E_c} \quad [3.4]$$

$$u(x)C_s dx + A_c df_c = 0 \quad [3.5]$$

$$-u(x)C_s dx + A_s df_s = 0 \quad [3.6]$$

Dane jednadžbe prikazuju jednadžbe ravnoteže u izdvojenom elementu prikazanom na Slici 3.2b). Sila trenja između betona i čelične cijevi djeluje kao kemijski spoj koji nastaje stvrdnjavanjem betona. U ovoj studiji ta sila je zanemarena.

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} = \left(\frac{C_s}{E_s A_s} + \frac{C_s}{E_c A_c} \right) u(x) \quad [3.7]$$

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} - \left(\frac{C_s}{E_s A_s} + \frac{C_s}{E_c A_c} \right) \left(\frac{u_{01}}{s_{01}^x} \right) s^x(x) = 0 \quad [3.8]$$

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} - k s^x(x) = 0 \quad [3.9]$$

$$k = \left(\frac{C_s}{E_s A_s} + \frac{C_s}{E_c A_c} \right) \left(\frac{u_{01}}{s_{01}^x} \right) \quad [3.10]$$

Jednadžba 3.7. se dobije diferenciranjem jednadžbe 3.4 te uvođenjem zamjena iz jednadžbi 3.5 i 3.6 te prikazuje vezu između naprezanja i prokliznuća na mjestu x . Kao što je rečeno, posmično naprezanje je funkcija prokliznuća pa se može koristiti zamjena jednadžbe 3.1 u 3.7. Pojednostavljeno, mogu se zapisati kao dvije jednadžbe. Jednadžba 3.9 je druga diferencijalna jednadžba klizanja između betona i čelika duž ugrađene duljine, s konstantnim koeficijentom k koji je prikazan u jednadžbi 3.10.

Potrebno je definirati rubne uvjete na temelju STSB vrijednosti. U STSB sila izvlačenja je sila koja odgovara klizanju od 2,5 mm na slobodnom kraju. Prvi rubni uvjet je izmjereno prokliznuće od 2,5 mm dok je drugi rubni uvjet izveden iz jednadžbe 3.1. U matematičkoj terminologiji nazivaju se Dirichletovi i Neumannovi rubni uvjeti. Analitički oblici graničnih uvjeta prikazani su u nastavku:

$$\begin{cases} s(0) = s_{01} \\ s'(L) = \frac{P_{01}}{E_s A_s} - \frac{P_{01}}{E_c A_c} \end{cases} \quad [3.11]$$

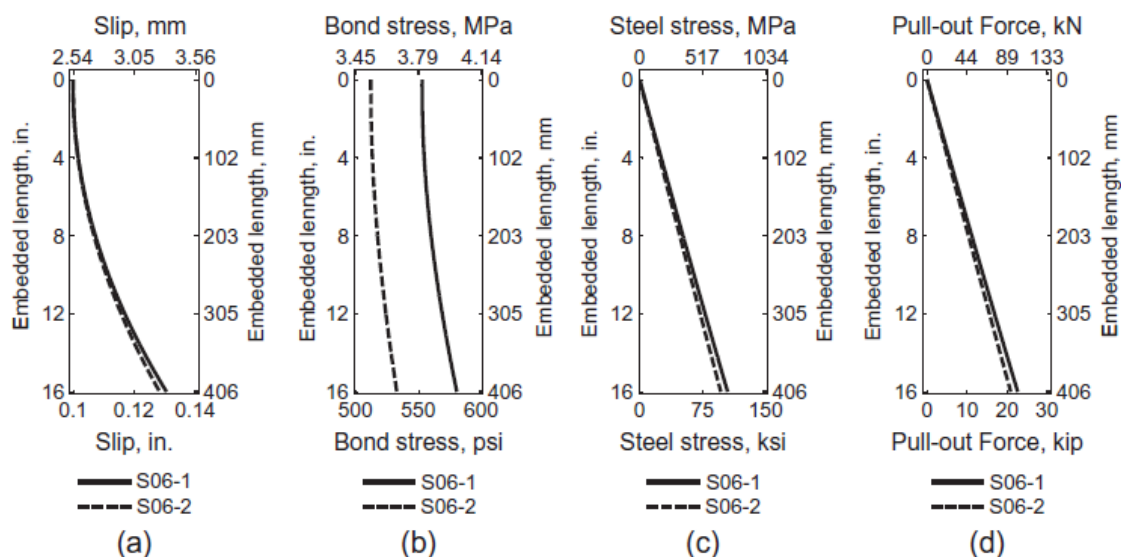
Jednadžba 3.9 je nelinearna druga obična diferencijalna jednadžba sa miješanim rubnim uvjetima, Dirichletovim i Neumannovim, kao što je prikazano u jednadžbi 3.11. Njeno rješenje je složeno pa je umjesto analitičke metode korišten numerički model. Kombinacijom „*Block Method*“ te modificirane Eulerove metode, koju je predložio *Majid et al.* dobiveno je približno rješenje. Da bi se poboljšala točnost rješenja Eulerova metoda je zamjenjena metodom *Runge - Kutta* sa iterativnim korakom od 1/500.

Veza između posmičnog naprezanja i prokliznuća analizira se pomoću STSB podataka po sljedećim koracima:

- Korak 1: Izračuna se prosječno posmično naprezanje za prokliznuće od 0.01 in. (0.25 mm) te 0.1 in. (2.5 mm).
- Korak 2: Izračuna se α u jednadžbi 3.1 koristeći jednadžbu 3.3
- Korak 3: Riješi se jednadžba 3.9 kako bi se odredilo prokliznuće prednapregnutog čelika
- Korak 4: Kombinacijom jednadžbi 3.1 i 3.3 dobije se odnos posmičnog naprezanja i prokliznuća
- Korak 5: Izračunaju se analitičke vrijednosti sile povlačenja pomoću odnosa dobivenog u koraku 4 te jednadžbe 3.6.
- Korak 6: Odredi se postotak pogreške između analitičke sile te sile dobivene pomoću pull-out testa.

3.1.4 Eksperimentalni rezultati i diskusija

Prokliznuće promatrano na duljini od 18 in. (460 mm) može se prikazati nelinearnom krivuljom kao na slikama 3.4 i 3.5. Dio šipke duljine 51 mm prekriven je zaštitnim slojem kako bi se smanjila koncentracija naprezanja na čeličnoj ploči prilikom izvođenja pull-out testa stoga stvarna duljina iznosi 16 in. (406 mm). Pomak šipke se povećava od slobodnog kraja prema opterećenom kraju. Na slobodnom kraju pomak je jednak onome izmjerenom STSB metodom od 0,1 in (2,5 mm) dok na opterećenom kraju se mijenja ovisno o sili izvlačenja šipke, veća sila daje veći pomak. Ta veza se može primijetiti i u jednadžbi 3.4 gdje pomak ovisi o produljenju prednapregnutog užeta koje je linearno proporcionalno sa silom izvlačenja.

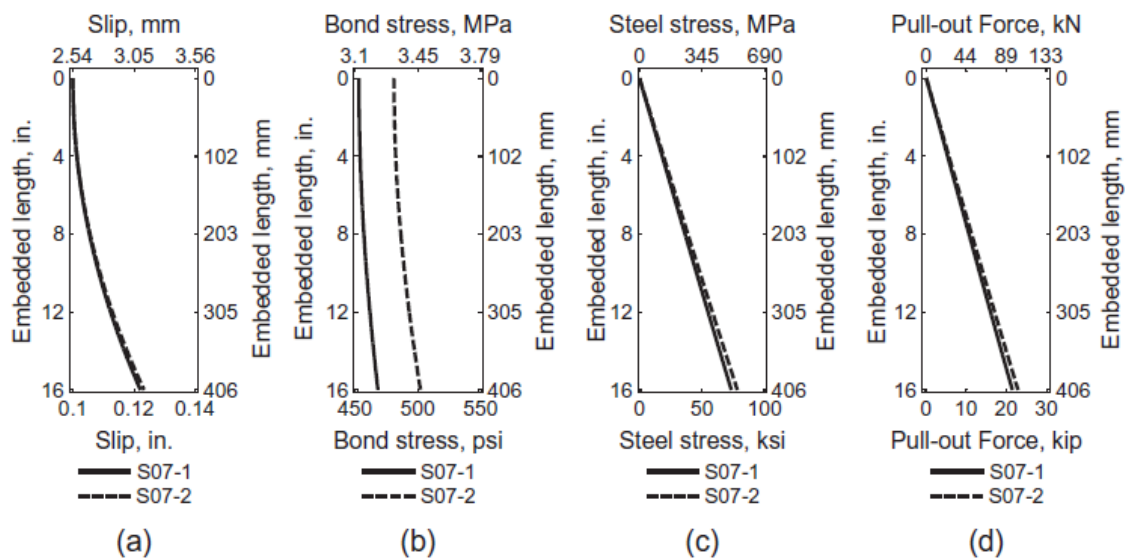


Slika 3.4 Analitički rezultati za uzorke S06-1 i S06-2 a) klizanje b) posmično naprezanje c) naprezanje čelika d) sila izvlačenja [12]

Uža od 0.6 in. (15.2 mm) te 0.7 in. (17.8 mm) imaju sličnu krivulju klizanja jer oba su napravljena od sedam žica te imaju nisku razinu otpuštanja.

slike 3.4b) i 3.5b) prikazuju kako posmično naprezanje nije jednako duž promatrane duljine zbog nelinearne veze posmičnog naprezanja i prokliznuća. U određenoj točki prokliznuće je izračunato pomoću Formule 3.1. U STSB metodi minimalna vrijednost posmičnog naprezanja je na slobodnom kraju dok je maksimalna na opterećenom kraju. Bolje vrijednosti duljine sidrenja se postižu nelinearnim odnosom posmičnog naprezanja nego kada postoji linearna veza od slobodnog do opterećenog kraja.

Sila izvlačenja i naprezanje u čeliku su izračunati pomoću jednadžbe 3.6 i prikazani na slikama 3.4c),d) i 3.5c),d). Oni su nelinearni parametri koji ovise o posmičnom naprezanju. U ovoj studiji, naprezanje u čeliku iznosi 100 ksi (690 MPa) što je blizu granice popuštanja za čelik Grade 270. Sile izvlačenja su približno jednake kao eksperimentalne vrijednosti prikazane u tablici 3.2. Sila izvlačenja koja odgovara prokliznuću od 0,01 in. (0,25 mm) je jednaka onoj izmjerenoj u STSB dok sila koja odgovara klizanju od 0,1 in. (2,5 mm) je sa pogreškom od 2%.



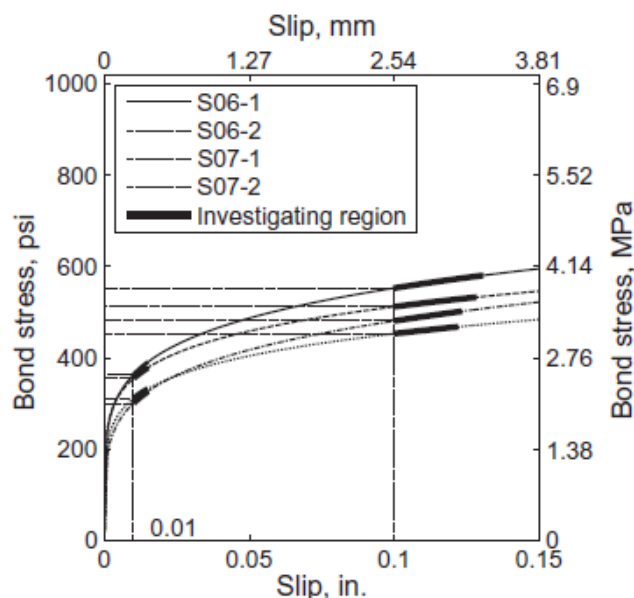
Slika 3.5 Analitički rezultati za uzorke S07-1 i S07-2 a) klizanje b) posmično naprezanje c) naprezanje čelika d) sila izvlačenja [12]

Tablica 3.2 Usporedba eksperimentalnih i analitičkih rezultata za STSB vrijednosti promjera 0,6 in. (15,2 mm) i 0,7 in. (17,8 mm) [12]

Test	STSB at slip of 0.01 in.			STSB at slip of 0.1 in.		
	Experimental (lb)	Analytical (lb)	Percent error	Experimental (lb)	Analytical (lb)	Percent error
S06-1	14,590	14,600	0.0	22,230	22,630	1.8
S06-2	14,270	14,260	0.0	20,590	20,900	1.5
S06-3	14,490	14,480	0.0	19,180	19,390	1.1
S06-4	14,500	14,490	0.0	19,300	19,520	1.1
S06-5	12,890	12,890	0.0	20,230	20,590	1.7
S06-6	13,540	13,540	0.0	18,900	19,140	1.3
S07-1	14,560	14,550	0.0	21,250	21,510	1.2
S07-2	14,100	14,100	0.0	22,560	22,920	1.6
S07-3	13,890	13,890	0.0	22,300	22,650	1.6

Note: 1 lb = 4.448 N; 1 in. = 25.4 mm.

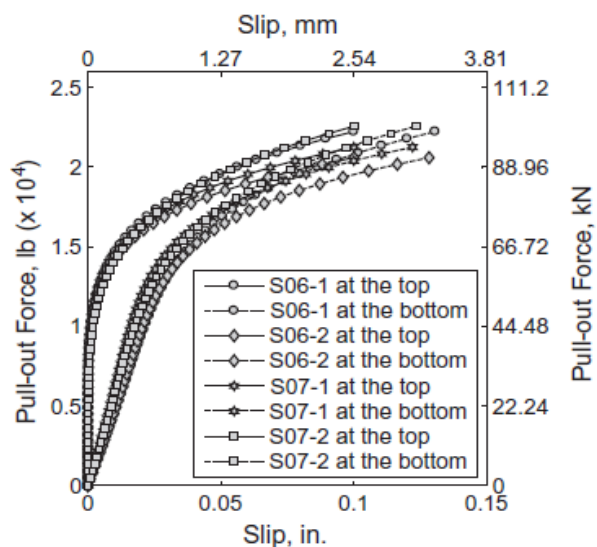
Kao što je i očekivano, veza posmičnog naprezanja i prokliznuća se mijenja ovisno o različitim uzorcima koji su korišteni kao STSB vrijednosti. Na slici 3.6 prikazano je područje u kojem je analitički dobivena sila izvlačenja povezana s klizanjem od 0,01 in. (0,25 mm) i 0,1 in. (2,5 mm). Područje počinje sa pomakom na slobodnom kraju te završava sa pomakom na opterećenom kraju. Za određeni STSB uzorak, također, je prikazano to područje te se može primijetiti kako se dobro podudara sa analitičkim rezultatima.



Slika 3.6. Veza posmičnog naprezanja za S06-1, S06-2, S07-1 i S07-2 [12]

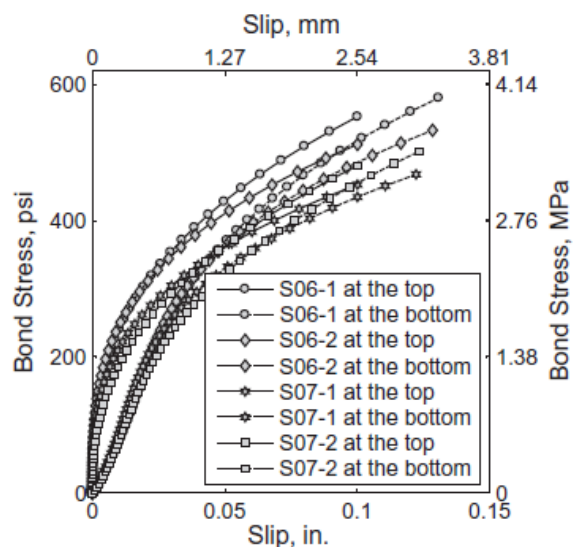
Odnos sile izvlačenja i prokliznuća između čelika i betona prikazan je na slici 3.7. Opterećeni kraj je više osjetljiv na pomak nego slobodan kraj. Na opterećenom kraju klizanje se pojavljuje odmah s djelovanjem sile te raste linearno do klizanja od 0,03 in. (0,75 mm). Nakon te točke klizanje raste brže. Slobodan kraj nema pomaka dok sila ne naraste na 10 000 lbs (44,5 kN). Prvi zabilježeni pomak je 0,01 in. (0,25 mm) na slobodnom kraju te odgovara sili izvlačenja P001.

Pozolo i Andrawes promatrali su pomicanje prednapetih užadi za vrijeme izvođenja pull - out testa te su primijetili da samo mali dio natege koja se nalazi kraj opterećenog kraja prihvaća energiju koja se dalje prenosi na okolni beton. To objašnjava zašto se prvi pomak pojavljuje na opterećenom kraju dok slobodni kraj nema pomaka. Porastom sile izvlačenja veći dio natege prihvaća energiju. Nakon što se dosegne određena sila cijela ugrađena dužina natege prihvati energiju te se na opterećenom kraju događa zaokret.



Slika 3.7 Odnos sile izvlačenja i klizanja na vrhu i dnu uzoraka S06-1, S06-2, S07-1 i S07-2 [12]

Na slici 3.8 prikazan je odnos posmičnog naprezanja na krajevima za po dva uzorka sa promjerima natege 0,6 in. (15,2 mm) te 0,7 in. (17,8 mm) koji su reprezentativni za ostale uzorke. Za jednake natege prokliznuće na opterećenom kraju je veće od prokliznuća na slobodnom kraju pa su dijagrami razdvojeni, dok za različite natege oblik dijagrama ovisi o odnosu posmičnog naprezanja i prokliznuća koji je prikazan na slici 3.2. Može se primijetiti kako se veza posmičnog naprezanja i klizanja u svakoj točki duž ugrađene duljine lako opisuje prikazanim modelom.



Slika 3.8 Odnos posmičnog naprezanja i klizanja na vrhu i dnu uzoraka S06-1, S06-2, S07-1 i S07-2 [12]

3.1.5 Zaključak

Model posmičnog naprezanja i klizanja je važan parametar za definiranje posmičnog naprezanja iz danog pomaka. Ova studija predlaže novi model za prednapeto uže koji je definiran pomoću STSB vrijednosti. Rezultati ispitivanja potvrđeni su STSB vrijednostima 6 uzoraka od 0,6 in. (15,2 mm) te 3 uzorka sa promjerom 0,7 in. (17,8 mm). Eksperimentalni i analitički rezultati se podudaraju sa pogreškom od 2 %.

Razvijena je nelinearna diferencijalna jednačba kako bi se prikazale vrijednosti klizanja. Jednačba, osim analitičkog, sadržava i vrijednosti koje se unose iz eksperimenta pa dobro opisuje odnos posmičnog naprezanja i klizanja.

Odnos posmičnog naprezanja i klizanja preko STSB vrijednosti je istražen u ovoj studiji, a rezultati prikazuju kako odnos nije linearan. On raste od slobodnog kraja prema opterećenom kraju prednapetog užeta.

Razumijevanje oblika i vrijednosti posmičnog naprezanja su temelji za bolji napredak određivanja dužine sidrenja prednapetog čelika.

3.1.6 Pregled oznaka korištenih u studiji

α - eksponencijalni faktor za model odnosa posmičnog naprezanja i klizanja

d_b - nominalni promjer

f_s - vlačno naprezanje prednapetog užeta

f'_c - tlačna čvrstoća morta starog 1 dan

f_c - tlačna čvrstoća morta

k - nelinearna konstanta obične diferencijalne jednačbe

$u(x)$ - posmično naprezanje na mjestu x

u_{01} - prosječna vrijednost posmičnog naprezanja za vrijednost pomaka od 0,1 in. (2,5 mm)

u_{001} - prosječna vrijednost posmičnog naprezanja za vrijednost pomaka od 0,01 in. (0,25 mm)

u - posmično naprezanje uzduž ugrađene duljine

$s(x)$ - klizanje čelika na mjestu x

s_{01} - klizanje koje odgovara STSB vrijednosti 0,1 in. (2,5 mm)

s_{001} - klizanje koje odgovara STSB vrijednosti 0,01 in. (0,25 mm)

s - klizanje uzduž ugrađene duljine

x - koordinate

A_c - površina betona

A_s - površina poprečnog presjeka natege

C_s - opseg natege

E_c - modul elastičnosti betona

E_s - modul elastičnosti užeta

L - ugrađena duljina za STSB, 16 in. (410 mm)

P_{01} - sila izvlačenja užeta koja odgovara klizanju od 0,1 in. (2,5 mm)

P_{001} - sila izvlačenja užeta koja odgovara klizanju od 0,01 in. (0,25 mm)

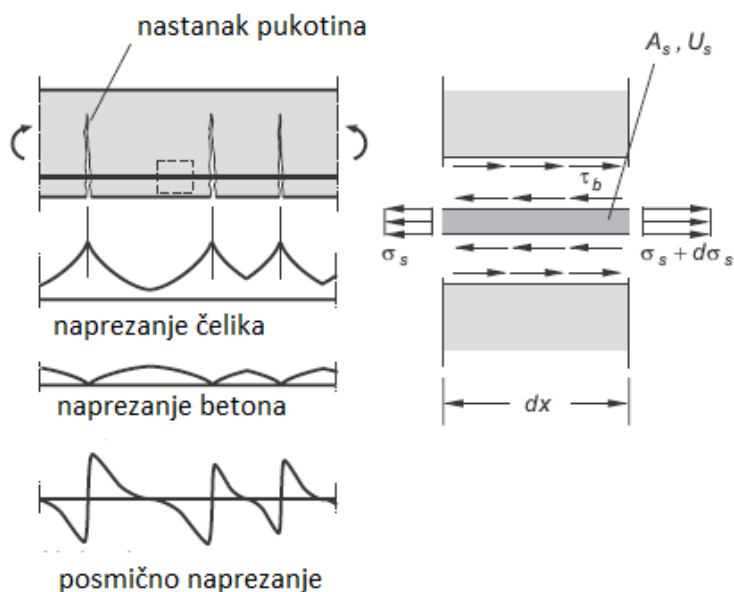
P - sila izvlačenja užeta koja odgovara klizanju s

3.2 Mehanizam spoja čelika i betona (dio iz knjige *Bemessung im konstruktiven Betonbau*, Konrad Zilch, Gerhard Zehetmaier) [13]

Armirani beton kompozitni je materijal dobiven zajedničkim djelovanjem betona i armature. Budući da beton može preuzeti samo mala vlačna naprezanja, u većini konstruktivnih elemenata, u kojima se obično javljaju takva naprezanja, ugrađuje se čelična armatura. Ona ih u potpunosti preuzima, a beton ostaje opterećen samo tlačnim naprezanjima koja izvrsno podnosi.

3.2.1 Mehanizam spoja betona i armature

Beton i armatura djeluju kao kompozitni materijal te se događa prijenos sile između njih. Može se izdvojiti diferencijalni element duljine dx kao na slici 3.9 kako bi se prikazale sile u kontaktnoj zoni armaturne šipke i betona.



Slika 3.9 Naprezanja u betonskom elementu (lijevo) te diferencijalni element (desno) [13]

Na elementu je uspostavljena ravnoteža te vrijedi:

$$A_s d\sigma_s = U_s \tau_b dx \quad [3.12a]$$

$$\Rightarrow \tau_b = \frac{d\sigma_s}{dx} \cdot \frac{d_s}{4} \quad [3.12b]$$

gdje je:

A_s - površina poprečnog presjeka armaturene šipke,

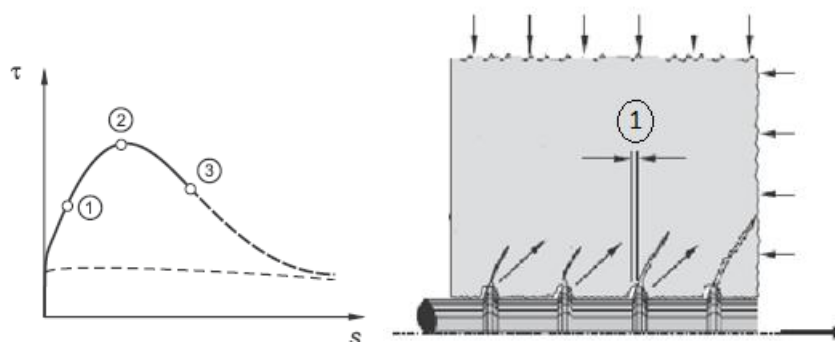
U_s - opseg šipke,

σ_s - naprezanje,

τ_b - posmično naprezanje promatrano na diferencijalnom elementu duljine dx .

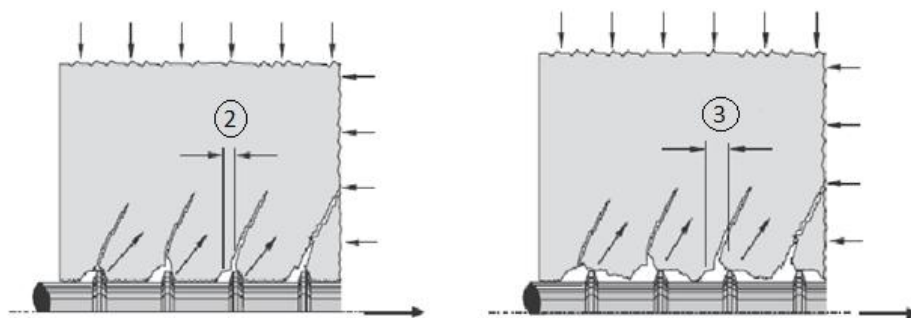
Između armaturene šipke i betona javlja se trenje i mehanička veza. Ukoliko dođe do vanjskih utjecaja na šipku beton će se odupirati slobodnom izvlačenju šipke. Taj proces je najlakše prikazati pomoću odnosa posmičnog naprezanja i relativnog pomaka šipke.

Povećavanjem vanjske sile koja djeluje na armaturnu šipku naprezanja u zoni rastu te dolazi do gubitka prionjivosti zbog raspucavanja betona koji obavija šipku. Ukoliko se promatra odnos prokliznuća i posmičnog naprezanja mogu se uočiti tri značajne točke. Na početku se događa linearna deformacija do točke 1 prikazanoj na slici 3.10. To ujedno predstavlja pojavu prve pukotine gdje dolazi do gubitka prionjivosti između betona i čelika.



Slika 3.10 Odnos posmičnog naprezanja i klizanja armaturene šipke (lijevo), nastanak prve pukotine (desno) [13]

Kao što je prikazano na slici 3.10 prva pukotina se stvara na mjestu gdje su izraženi nabori na čeličnoj šipki. Nakon toga dolazi do nelinearnog ponašanja odnosa posmičnog naprezanja i prokliznuća do točke 2. Pukotine se šire sa rebra čelične šipke na okolnu zonu (slika 3.11).



Slika 3.11 Područje 2 i 3 [13]

U tom području posmično naprezanje je maksimalno, kao i sila koja je potrebna za izvlačenje šipke iz uzorka. U sljedećoj fazi naprezanje se smanjuje, slabi veza u kontaktnoj zoni te je potrebna manja sila povlačenja. Točka 3 na slici 3.10 predstavlja područje gdje su se pukotine proširile između rebra armature te dolazi do međusobnog spajanja samih. To je ujedno početak plastične deformacije.

3.2.2 Eksperimentalna testiranja

Promatra se ponašanje armiranog betonskog uzorka na djelovanje vanjske sile izvlačenja. Za vrijednost sile može se izračunati posmično naprezanje,

$$\tau = \frac{F}{d_s \cdot \pi l_b} \quad [3.13]$$

gdje je:

τ - posmično naprezanje

F- sila izvlačenja

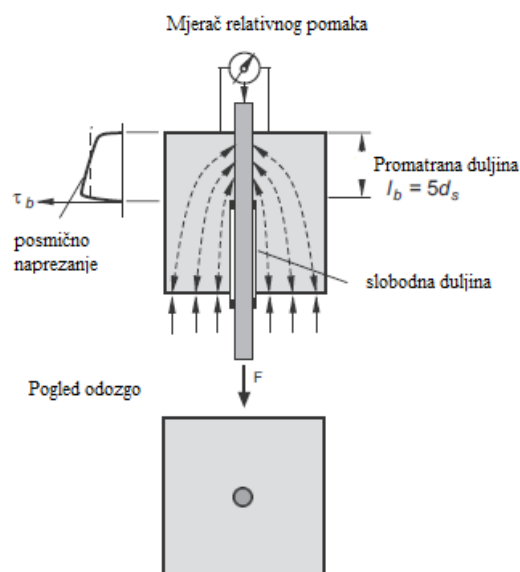
d_s - promjer šipke

l_b - promatrana duljina.

U testovima (Janović 1979; RILEM 1994) je kao reprezentativna duljina promatranja uzeta $l_b=5d_s$. Kraće duljine od te mogu dovesti do varijacije rezultata jer je moguć utjecaj velikih zrna agregata neposredno prije rebara ili pojava šupljina u betonu. Također, dimenzije ispitnog uzorka su predložene u Rilem (1994).

Na test izvlačenja šipke znatno utječu:

- tlačna čvrstoća betona,
- položaj šipke prilikom betoniranja,
- naprezanje okomito na os šipke,
- dugotrajno ili cikličko opterećenje.

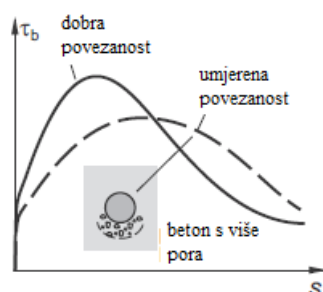


Slika 3.12 Postavke pull- out testa prema RILEM-u [13]

Tlačna čvrstoća betona utječe na krajnje rezultate testa jer je kod betona većih čvrstoća teže izvući šipku. Noakowski 1988 utjecaj f_c opisuje izrazom:

$$\tau_{b, \max} \sim f_c^k \quad [3.14]$$

Gdje je $k=2/3$, dok u istraživanjima Eligehausem u.a 1983 k iznosi $1/2$.



Slika 3.13 Utjecaj sastava betona na vezu posmičnog naprezanja te prokliznuća [13]

3.2.3 Modeliranje veze posmičnog naprezanja i deformacije

Zbog nedostatka posebnih formula za razne vrste armaturnih šipaka, potreban je analitički opis za određivanje veze između armaturne šipke i okolnog betona. Ta analitička metoda može se opisati odnosom naprezanja prijanjanja i proklizavanja, čime se uvodi rješenje problema. Analitička formula je preuzeta iz modela CIB/FIB (1993) te opisuje posmično naprezanje za betonski uzorak te vezu između betona i čelične šipke u njemu, pod djelovanjem sile izvlačenja šipke koja je korištena u pull - out testu.

$$\tau_b(s) = \begin{cases} \tau_{b,\max} \cdot \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha & 0 \leq s \leq s_1 \\ \tau_{b,\max} & s_1 < s \leq s_2 \\ \tau_{b,\max} - \frac{\tau_{b,\max} - \tau_f}{s_3 - s_2}(s - s_2) & s_2 < s \leq s_3 \\ \tau_f & s_3 < s \end{cases} \quad [3.15]$$

gdje je:

$\tau_{b,\max}$ - maksimalno naprezanje prijanjanja,

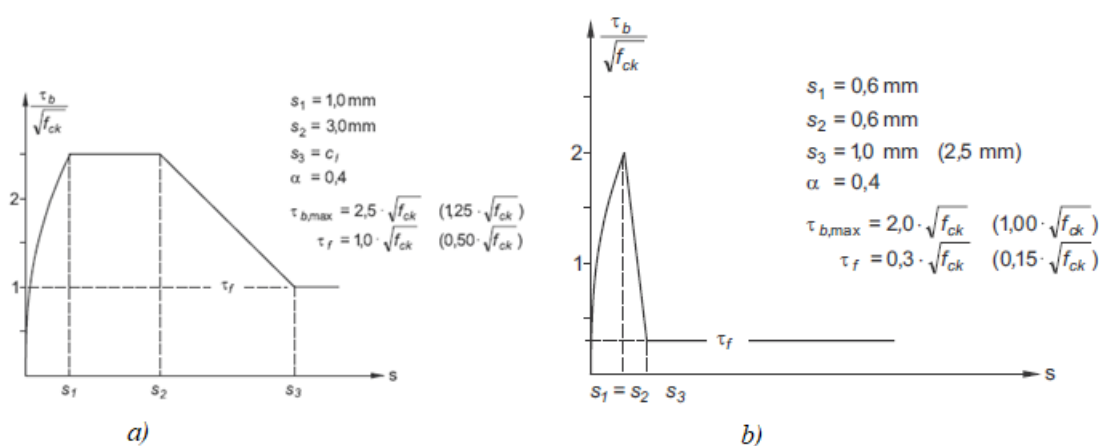
s_1 - proklizavanje koje odgovara maksimalnom naprezanju prijanjanja,

s_2 - vrijednost kada dolazi do pada naprezanja kao što je prikazano na slici 3.14,

s_3 - vrijednost pojave konstantnog naprezanja τ_f ,

α - parametar podešavanja krivulje.

Na slici 3.14 prikazan je odnos posmičnog naprezanja prema relativnom pomaku šipke. Rezultati su preuzeti iz CEB/FIB (1993) za promatrani dio dužine $5d_s$.



Slika 3.14 Idealizirana veza posmičnog naprezanja i relativnog pomaka a) promatrano područje $> 5d_s$ b) promatrano područje $= 1 d_s$ [13]

Norme DIN 1045-1 i DIN EN 1992-1-1 opisuju postupak za izračunavanje dozvoljenih širina pukotina i deformacija te služe za određivanje duljine sidrenja, kao i za određivanje dozvoljenog zakretanja. Ipak, u ovom istraživanju ti odnosi nisu se dodatno proučavali.

3.2.4 Opis problema diferencijalnom jednačbom

Promatra se diferencijalni element prikazan na slici 3.15. Napetost štapa je potrebno uzeti u obzir tako što se proučava posmično naprezanje τ_b koje djeluje po obodu armaturne šipke opsega U_s .

$$\tau_b(s) \cdot U_s \cdot dx = d\sigma_s \cdot A_s = -d\sigma_c \cdot A_c \quad [3.16a]$$

$$\Rightarrow \frac{d\sigma_s}{dx} = \tau_b(s) \cdot \frac{U_s}{A_s} \quad [3.16b]$$

$$\Rightarrow \frac{d\sigma_c}{dx} = -\tau_b(s) \cdot \frac{U_s}{A_c} \quad [3.16c]$$

Klizanje između armature i betona može se prikazati kao razlika pomaka čelika i betona:

$$s = u_s - u_c \quad [3.17]$$

Ako se ponašanje čelika i betona ponaša kao linearno - elastično pod uvjetom iz jednadžbe 3.17 diferencijalna jednadžba promatrana po x osi se može zapisati:

$$\frac{ds}{dx} = \frac{du_s}{dx} - \frac{du_c}{dx} \quad [3.18a]$$

$$= \varepsilon_s - \varepsilon_c \quad [3.18b]$$

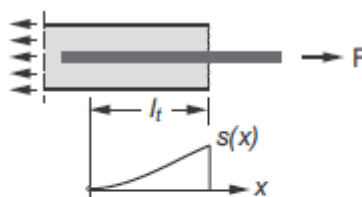
$$= \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{\sigma_c}{E_c} \quad [3.18c]$$

Ukoliko se jednadžba 3.18c uvede u jednadžbe 3.16b i 3.16c može se izraziti diferencijalna jednadžba drugog stupnja:

$$\frac{d^2s}{dx^2} = \tau_b(s) \cdot \frac{U_s}{E_s A_s} + \tau_b \cdot \frac{U_s}{E_c A_c} \quad [3.19a]$$

$$\Rightarrow s'' - \tau_b(s) \cdot \left(\frac{U_s}{E_s A_s} + \frac{U_s}{E_c A_c} \right) = 0. \quad [3.19b]$$

Jednadžba 3.19b daje matematički izraz u kojem su nepoznanice posmično naprezanje i relativni pomak. Za njeno rješenje potrebno je definirati rubne uvjete kao što je prikazano na slici 3.15.



$$\text{RB 1: } s(x=0) = 0$$

$$\text{RB 2: } \varepsilon_s(x=0) - \varepsilon_c(x=0) = 0$$

Slika 3.15 Definiranje rubnih uvjeta za izdvojeni diferencijalni element [13]

$$\text{RB 1 } s(x=0) = 0,$$

$$\text{RB 2 } \varepsilon_s(x=0) - \varepsilon_c(x=0) = 0$$

Prvi rubni uvjet RB1 definira relativni pomak na početku koji je jednak 0. To znači da nema klizanja između betona i armaturne šipke. Drugim rubnim uvjetom RB 2 definirana je razlika deformacija između čelika i betona na mjestu $x=0$.

Za područje rasta dijagrama koji prikazuje odnos posmičnog naprezanja i relativnog pomaka na slici 3.14a) jednadžba se rješava pomoću izraza 3.15 za vrijednost s od 0 do s_1 . Može se zapisati opći oblik:

$$s(x) = C \cdot x^n \quad [3.20]$$

Koeficijent C i eksponent n definirani su:

$$C = \left[\frac{\tau_{b,\max}}{s_1^\alpha} \cdot \left(\frac{U_s}{E_s A_s} + \frac{U_s}{E_c A_c} \right) \cdot \frac{(1-\alpha)^2}{2+2\alpha} \right]^{1/(1-\alpha)} \quad [3.21]$$

$$n = \frac{2}{1-\alpha} \quad [3.22]$$

U izrazu 3.21 krutost $E_c A_c$ je puno veća od opsega armaturne šipke pa se njihov omjer može zapisati $U_s/E_c A_c=0$.

Metoda za rješavanje diferencijalne jednadžbe nije opisana u ovom radu, ali se može naći u dodatnoj literaturi u.a. Noakowski (1978); Krips (1984).

3.3 Proračun energije sloma pjenastog betona pomoću testa savijanja u tri točke na unaprijed zarezanim gredama (Fracture energy of foamed concrete based on three-point bending test on notched beams: Marcin Kozłowskia, Marta Kadelab, Alfred Kukielkab) [20]

3.3.1 Sažetak

U ovom radu izvršen je niz testova savijanjem u tri točke kako bi se odredila svojstva loma pjenastog betona. Grede dimenzija 100x100x840 mm prethodno su zarezane po sredini. Na njima je izvršen test savijanja u tri točke. Nakon toga, preostale polovice greda su ponovo testirane na isti način, ali sa smanjenom udaljenosti između oslonaca uređaja za testiranje.

Kapacitet opterećenja hidrauličkog stroja za ispitivanje iznosi 5 kN. Osim mjerenja opterećenja i pripadnih pomaka praćeno je pomicanje otvora kod otvaranja šupljina (CMOD). Na temelju krivulje opterećenje-pomak izračunate su vrijednosti energije sloma.

Na kockama dimenzija 150x150x150 mm ispitana je tlačna čvrstoća betona.

3.3.2 Uvod

Pjenasti beton sastoji se od cementa pomiješanog s visokim volumenom zraka. Poznat je po svojoj malog težini te izvrsnim zvučnim i toplinskim svojstvima. Lagan je te jednostavan za transport. Služi kao izvrstan izolacijski materijal.

Zbog svojih povoljnih svojstava provedene su mnoge studije s ciljem istraživanja njegove čvrstoće, mehaničkih, zvučnih te toplinskih karakteristika. Međutim, u tim studijama nije istražena energija sloma koja je glavni parametar za proučavanje nastanka oštećenja te mehanizma prijeloma.

Glavni cilj ovog rada bio je odrediti energiju sloma i mehanička svojstva pjenastih betona različite gustoće.

3.3.3 Materijali i metode

U ovom istraživanju korišten je obični Portland cement (CEM I 42.5 R) te svježa, pitka voda. Pjena je dobivena miješanjem sredstva za pjenjenje i vode u unaprijed određenim omjerima. U mješalici je zamiješana s cementom. Nakon lijevanja u čelične kalupe uzorci su pokriveni i ostavljeni u laboratoriju pri $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ i 95 % vlažnosti.

U ovom radu korištene su četiri različite betonske mješavine koje rezultiraju različitim gustoćama kao što je prikazano u tablici 3.3.

Tablica 3. 3. Količine sastojaka korištene u pojedinoj mješavini, gustoća te tlačna čvrstoća uzoraka [20]

Specimen type	Cement (c) [kg/m ³]	Water (w) [dm ³ /m ³]	Foaming agent [dm ³ /m ³]	w_{eff}/c^*	Density (ρ) [kg/dm ³]	Compressive strength [MPa]
A	750	300	30	0.44	1024 ± 1.0	5.9 ± 0.2
B	634	241	38		882 ± 0.5	4.4 ± 0.2
C	514	190	36		662 ± 2.0	2.4 ± 0.3
D	386	143	27		488 ± 0.5	0.6 ± 0.2

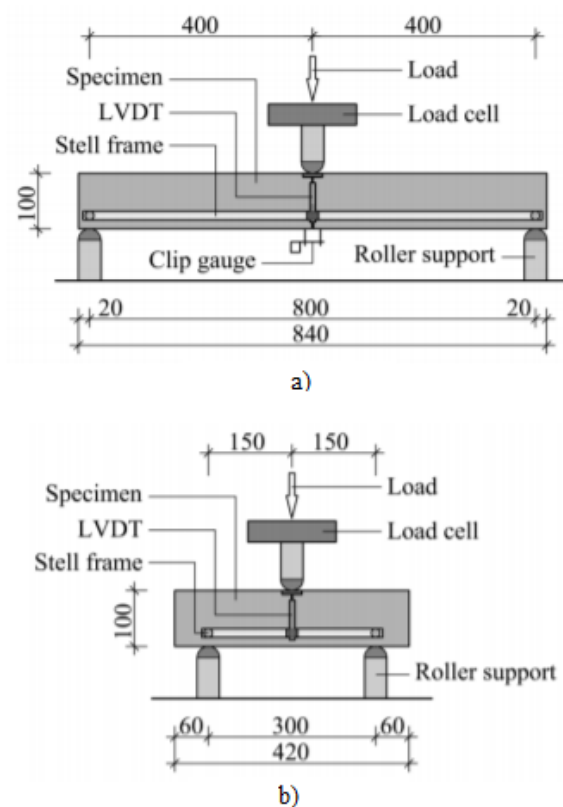
* – w_{eff}/c includes foaming agent in a liquid state

Proizvedena su 32 uzorka, od kojih je 5 greda te 3 kocke za svaku mješavinu. Dimenzije greda su 100x100x840 mm te je na sredini napravljen urez dubine 42 mm, a širine 3 mm.

Kocke za ispitivanje tlačne čvrstoće su dimenzija 150x150x150.

3.3.4 Metode testiranja

U ovoj studiji provedena su dva postupka ispitivanja. U prvom testu provedeno je ispitivanje savijanjem u tri točke na zarezanim gredama sa svrhom određivanja energije sloma i maksimalnog naprezanja. U drugom testu ispitane su dvije polovice uzoraka koje su dobivene završetkom prvog testa. Udaljenost oslonaca je bila 800 mm kao što je prikazano na slici 3.16a). Sila opterećenja djeluje po sredini uzorka brzinom 0,1 mm/min. Također, mjeren je CMOD pomoću ekstenzometra s duljinom promjera 5 mm.

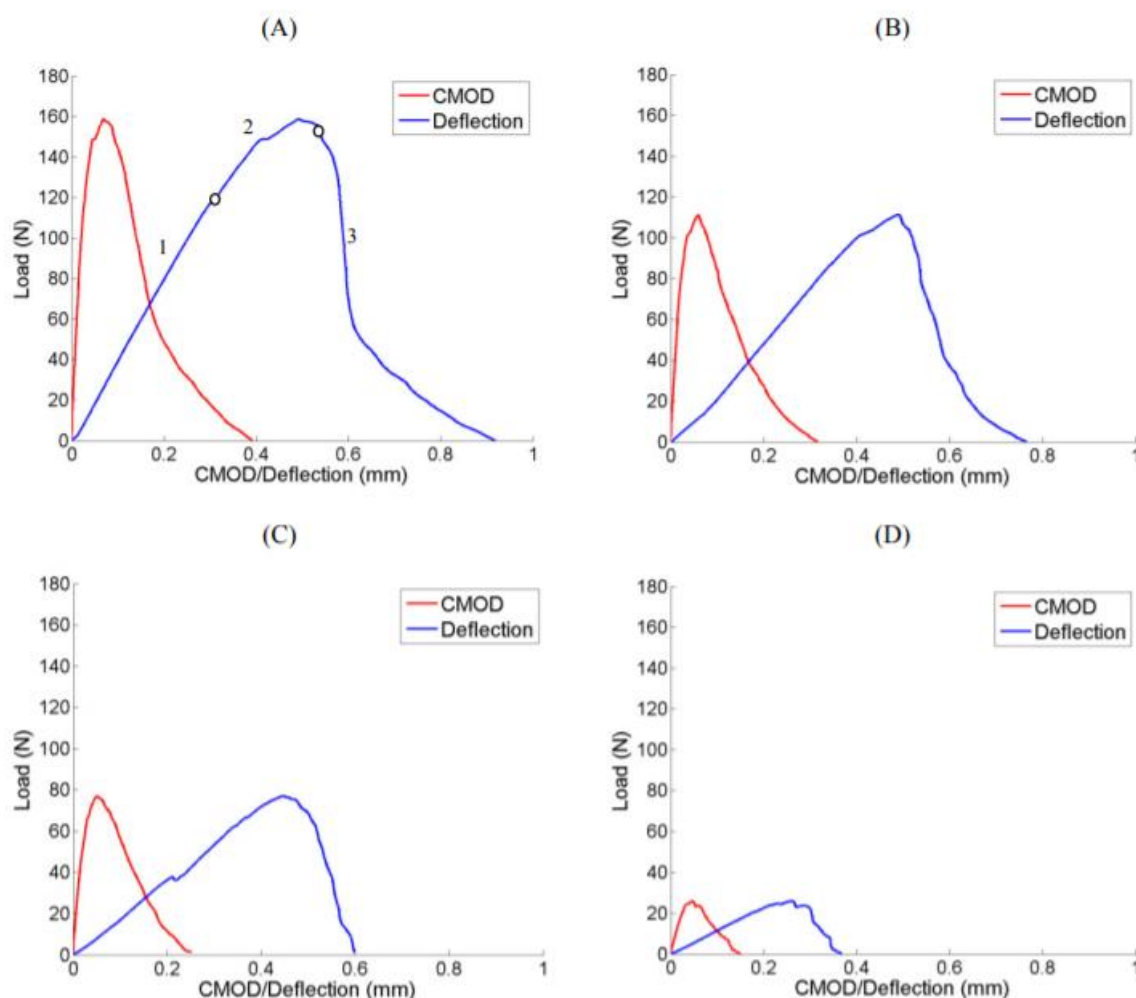


Slika 3.16 a) Postavke testa 1; b) Postavke testa 2 [20]

Test 2 se proveo na nezarezanim gredama dimenzija 100x100x420. Udaljenost nosača postavljena je na 300 mm. Ostale postavke testa jednake su onima u testu 1, a prikazane su na slici 3.16b).

3.3.5 Rezultati i diskusija

Glavni cilj ove studije bio je istražiti utjecaj gustoće pjenastog betona na energiju loma.



Slika 3.17 Odnos opterećenja te pomaka za uzorke A, B, C i D [20]

Slika 3.17 prikazuje odnos opterećenja i pomaka za uzorke A, B, C i D. Mogu se primijetiti tri stupnja ponašanja betona. U prvoj fazi pomak se linearno povećava s opterećenjem do nastanka prve pukotine. U drugoj fazi se razvija proces sloma pojavom mikropukotina te njihovim širenjem. Treća faza poznata je kao faza omekšavanja te je očigledan porast pukotina.

Energija sloma je izračunata kao ukupno potrošena energija podijeljena s površinom poprečnog presjeka iznad usjeka.

$$G_F = \frac{W_0 + m \cdot g \cdot \delta}{(d - a) \cdot b} \quad [3.23]$$

gdje je:

W_0 – površina ispod krivulje opterećenje pomak,

m – masa grede između oslonaca,

g – gravitacija,

a – dubina izreza,

δ – pomak zabilježen pri slomu (krajnji pomak).

Maksimalno naprezanje dobiveno je sljedećom jednadžbom.

$$f_t = \frac{3 \cdot P_{\max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot (d - a)^2} \quad [3.24]$$

gdje je:

$P_{\max}$ – maksimalno zabilježena sila,

l – duljina grede,

b – širina,

d – visina,

a – dubina izreza.

Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 3.4.

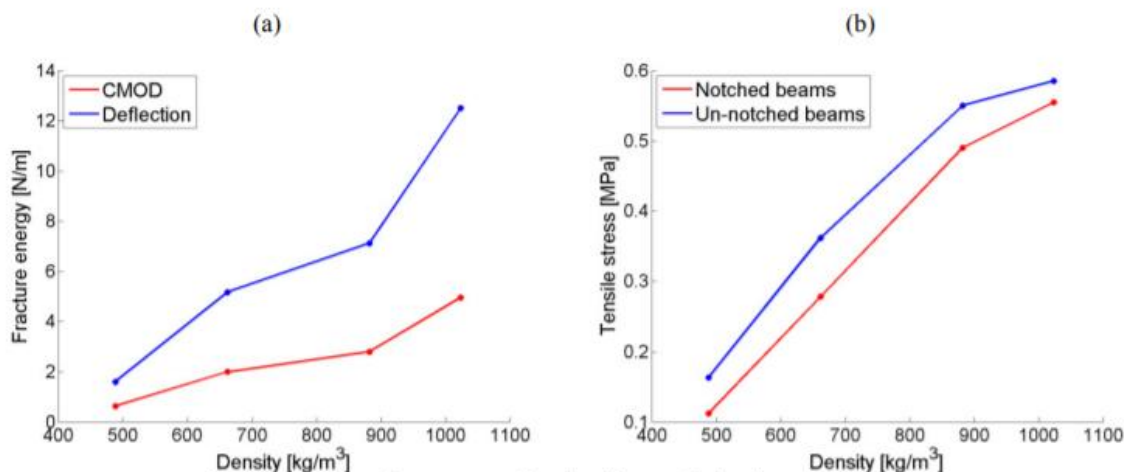
Tablica 3.4 Energija sloma te naprezanje za pojedini uzorak [20]

Specimen type	$G_F(u)$ [N/m]	σ_c [MPa]	f_t [MPa]
A	12.54 ± 0.21	0.555 ± 0.01	0.585 ± 0.37
B	6.55 ± 0.42	0.350 ± 0.01	0.550 ± 0.22
C	4.95 ± 0.08	0.278 ± 0.01	0.362 ± 0.24
D	1.39 ± 0.12	0.112 ± 0.01	0.163 ± 0.09

Kao što je i očekivano, povećanje gustoće dovodi do veće energije sloma. F_t je izračunat za nezarezane grede. Povećanje gustoće uzrokuje povećanje čvrstoće na savijanje pjenastog betona.

3.3.6 Zaključak

Eksperimenti su provedeni kako bi se odredila energija loma i mehanička svojstva pjenastog betona pomoću testa savijanja u tri točke.



Slika 3.18 Odnos gustoće i energije loma [20]

Povećanje gustoće doprinosi povećanju energije loma te povećanju vlačnog naprezanja kao što je prikazano na slici 3.18.

3.4 Određivanje parametara loma (K_{IC}^S i $CTOD_c$) metodom savijanja (iz knjige *Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials OCR*) [14]

3.4.1 Općenito

Ovaj rad je napravljen sa ciljem određivanja kritičnog faktora intenziteta naprezanja K_{IC}^S te kritičnog pomaka kod otvaranja pukotina $CTOD_c$ žbuke i betona pomoću metode savijanja na unaprijed zarezanim betonskim elementima. Kritični faktor naprezanja definira se kao faktor naprezanja izračunat na kritičnoj efektivnoj pukotini koristeći maksimalno izmjereno opterećenje. Kritični pomak otvora pukotine definiran je kao pomak na vrhu izrezanog dijela uzorka dobiven pomoću maksimalnog opterećenja i kritične efektivne dužine pukotine.

Kritični faktor intenziteta naprezanja i kritični faktor otvaranja pukotina, zajedno s Youngovim modulom elastičnosti E dovoljni su za definiranje otpornosti materijala i energije sloma u betonu.

3.4.2 Uzorak

3.4.2.1 Dimenzije

Dimenzije uzorka prikazane su u tablici 3.5 za agregate, čije maksimalno zrno ne prelazi 50 mm (2 in.).

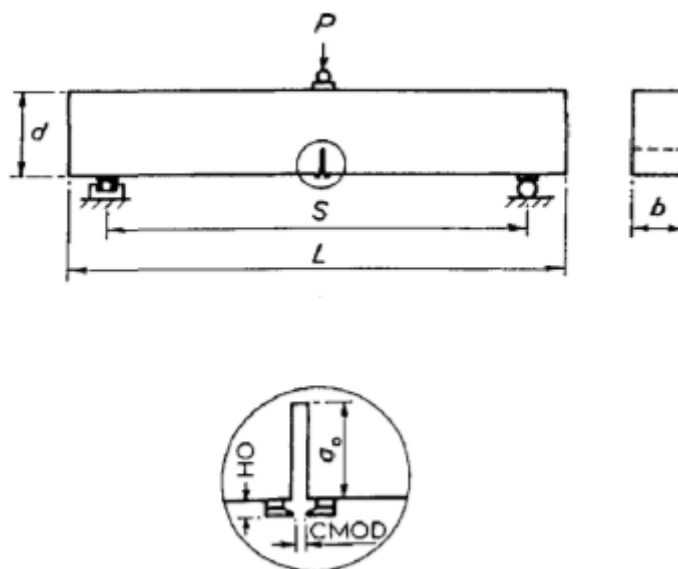
Tablica 3. 5 Dimenzije uzorka [14]

$D_{\max}$ (mm)	Depth, d (mm)	Width, b (mm)	Length, L (mm)	Span, s (mm)
1 to 25	150 ± 5	80 ± 5	700 ± 10	600 ± 5
25.1 to 50	250 ± 5	150 ± 5	1100 ± 10	1000 ± 5

Potrebno je zarezati element, kao što je prikazano na slici 3.19, tako da širina izreza bude manja od 5 mm. Početni omjer a_0/d treba biti jednak $1/3$ gdje je d visina grede, a a_0 duljina proreza.

Potrebno je izvršiti test na najmanje 4 uzorka za svaku grupu materijala.

Ukoliko je maksimalna veličina agregata veća od 50 mm potrebno je povećati veličinu uzorka. U pravilu, omjer širine i dubine mora biti veći od 4.



Slika 3.19 Postavke testa i dimenzije uzorka [14]

3.4.2.2 Izrada uzorka

Nakon ugradnje betona, uzorci moraju biti čuvani u laboratorijskim uvjetima, pokriveni mokrim pokrivnim sredstvom, ili čuvani u prostoru sa 100 % relativnom vlažnosti

tijekom prvih 24 sata. Drugog dana mogu se transportirati u drugu prostoriju, koja zadovoljava laboratorijske uvjete, gdje se čuvaju do dana ispitivanja.

3.4.3 Uređaj za ispitivanje

Stroj za ispitivanje je napravljen sa uređajem za očitavanje pomaka otvaranja pukotina.

Preporučeno je izmjeriti masu uzorka prije izvođenja testa. Ukoliko uređaj za mjerenje pomaka pukotina nije dostupan moguće je koristiti LVDT senzor, kao zamjenu. Kako bi se izbjegle moguće pogreške prilikom mjerenja, preporuča se što manja duljina LVDT-a.

CMOD se mjeri u sredini proreza kako bi se smanjile moguće pogreške uzrokovane ekscentritetom.

Podupirači i ostala oprema moraju biti namješteni tako da je sustav statički određen.

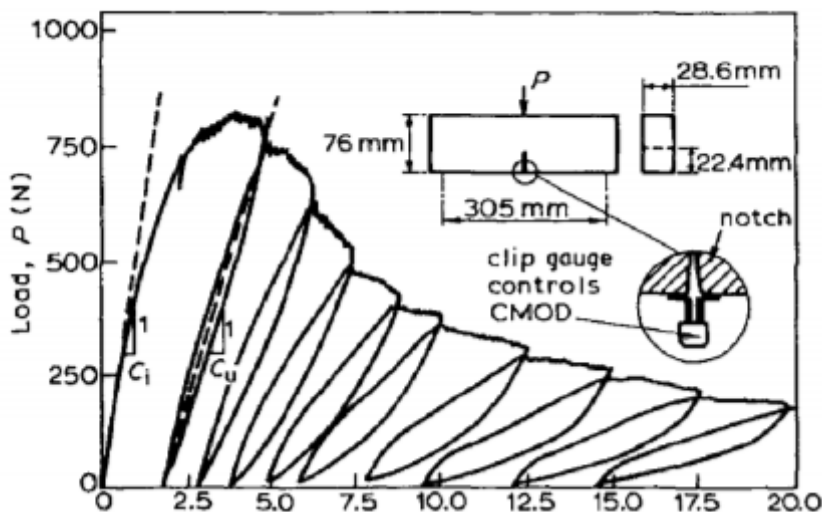
3.4.4 Izvođenje testa

Brzina nanošenja opterećenja je konstantna jer povećanje brzine doprinosi mogućnosti otvaranja dodatnih pukotina. Vršno opterećenje se postiže nakon 5 minuta.

Upotrebjeno opterećenje se može ručno smanjiti nakon što se dosegne maksimalno opterećenje, a najbolje je to napraviti nakon što se dosegne 95 % vršnog opterećenja. Nakon što se sila djelovanja svede na 0 dolazi do rasterećenja. Utjecaj opterećenja i rasterećenja ne moraju biti uvijek isti, a svaki ciklus pojedinačno se završi za jednu minutu. Za ova test je dovoljno napraviti samo jedan ciklus.

3.4.5 Rezultati testa i proračun

Rezultati testa prikazani su na slici 3.20. Na temelju toga može se izračunati Youngov modul elastičnosti, kritični faktor naprezanja te kritični faktor otvaranja pukotina.



Slika 3.20 Rezultati testa [14]

Youngov modul elastičnosti se računa pomoću sljedeće jednadžbe:

$$E = \frac{65 \cdot a_0 \cdot V_1(\alpha)}{C_i \cdot d^2 \cdot b} \quad [3.25]$$

Gdje je C_i vrijednost izračunata sa rezultata testa kao što je prikazani na slici 3.17., a $V_1(\alpha)$ je definiran sljedećom formulom:

$$V_1(\alpha) = 0,76 - 2,28 \cdot \alpha + 3,87 \cdot \alpha^2 - 2,04 \cdot \alpha^3 + \frac{0,66}{(1-\alpha)^2} \quad [3.26]$$

Gdje je $\alpha = (a_0 + HO)/(d + HO)$.

Kritična efektivna duljina pukotine a_c ($a_c = a_0 +$ porast pukotine pri vršnom opterećenju) se može izraziti koristeći jednadžbu Youngovog module elastičnosti E (3.23) te faktora C_u koje je definiran na slici 3.17. Tada jednadžba glasi:

$$E = \frac{65 \cdot a_c \cdot V_1(\alpha)}{C_u \cdot d^2 \cdot b} \quad [3.27]$$

Gdje je $\alpha = (a_0 + HO)/(d + HO)$, a C_u je definiran na slici 3.17.

Kritični faktor naprezanja K_{IC}^S se računa koristeći sljedeću jednadžbu:

$$K_{IC}^S = 3 \cdot (P_{\max} + 0,5 \cdot W) \frac{S(\pi \cdot a_c)^{\frac{1}{2}} F(\alpha)}{2 \cdot d^2 \cdot \alpha} \quad [3.28]$$

$F(\alpha)$ je definiran jednadžbom 3.27.

$$F(\alpha) = \frac{1,99 - \alpha(1 - \alpha)(2,15 - 3,93\alpha + 2,7\alpha^2)}{\sqrt{\pi^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{2\alpha} \right) (1 - \alpha)^{\frac{3}{2}}}} \quad [3.29]$$

Gdje je $\alpha = a_c/d$, $P_{\max}$ maksimalno zabilježena sila u N, $W = W_0 S/L$ [N], a W_0 težina grede [N].

Kritični pomak otvaranja pukotina, $CTOD_c$ se računa pomoću jednadžbe:

$$CTOD_c = \frac{6P_{\max} \cdot S \cdot a_c \cdot V_1(\alpha)}{E \cdot d^2 \cdot b} \left[(1 - \beta)^2 + (1,081 - 1,149 \cdot \alpha)(\beta - \beta^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad [3.30]$$

$\alpha = a_c/d$, a $\beta = a_0/a$.

Za one laboratorije koji ne mogu osigurati stabilno izvođenje testa savijanja, vrijednost C_u se može izračunati približno tako što se uzme da se krivulja rasterećenja vraća do glavne krivulje. Vrijednosti K_{IC}^S i $CTOD_c$ dobivene na taj način su 10 do 25 posto veće od onih izračunatih na unaprijed opisan način.

3.4.6 Izvještaj testa

Izvještaj testa treba sadržavati:

- Dimenzije uzorka, težinu, recepturu betonske mješavine, broj i oznaku uzorka te datum ispitivanja,
- Krivulju odnosa sile opterećenja sa pomakom, vrijednost vršnog opterećenja $P_{\max}$, C_i i C_u ,
- Youngov modul elastičnosti E , a_c , kritični faktor naprezanja K_{IC}^S , kritičnu vrijednost otvaranja pukotina $CTOD_c$ za svaki uzorak,
- Zapažanja tijekom trajanja pojedinog testa.

3.4.7 Pozadina testa

Sa ova dva parametra moguće je predvidjeti maksimalno opterećenje uzoraka te strukturu pojedine geometrije pukotine. Pukotina dane dužine (a_0 može biti jednak 0) se širi kada se dosegne kritična efektivna dužina pukotine a_c . Za definiranje a_c potrebna su dva parametra, K_{IC}^S te $CTOD_c$.

Ova metoda testiranja je jedinstvena na način da se svi parametri materijala (K_{IC}^S , $CTOD_c$, E) mogu odrediti iz pojedinog testa.

Kritična proširenja pukotina dobivena iz ova dva parametra se smanjuju sa povećanjem čvrstoće betona te sa povećanjem utjecaja opterećenja. Također, ova dva parametra dobro opisuju reakciju loma kvazi - lomljivog materijala kao što je beton.

4 EKSPERIMENTALNI DIO

4.1 Plan izvođenja eksperimentalnog dijela

U eksperimentalnom dijelu rada izvodi se pull – out test, s ciljem proučavanja ponašanja betona i čelika u njihovoj kontaktnoj zoni. Svrha navedenog testa je odrediti posmično naprezanje kontaktne zone u odnosu na relativan pomak između betona i užeta. U ovom radu testiraju se uzorci prednapetog betona, kao i onog koji nije prednapet već je u uzorak samo postavljeno čelično uže.

Osim prizmi koje se koriste za pull – out test rade se prizme za test savijanjem u tri točke (three point bending test).

Kocke dimenzija 150 x 150 x 150 mm korištene su u ispitivanju vrijednosti tlačne čvrstoće betona, za svaku mješavinu.

Plan izvođenja testova te broj elemenata koje je potrebno izraditi dati su u tablici 4.1.

Tablica 4.1 Plan izvođenja testova te broj uzoraka po pojedinom testu

Starost betona	Datum betoniranja uzorka	Datum testiranja	Broj uzoraka po pojedinom testu				Ukupno
			$G_{F,BZ}$ 100x100x400 prizma	β_D 150x150x150 kocka	pull-out 200x200x600 prizma, nije prednapet	pull-out 200x200x600 prizma, prednapet	
7d	pon 27.03.17	Pon 03.04.17 - Sri 05.04.17	3	4	5	-	12
7d	sri 29.03.17	Pon 05.04.17 - Pet 07.04.17	3	4	-	5	12
28d	pon 27.03.17	Pon 24.04.17 - Sri 26.04.17	3	4	3	-	10
28d	sri 29.03.17	Sri 26.04.17 - Pet 28.04.17	3	4	-	5	12
56d	pon 27.03.17	Pon 22.05.17 - Sri 24.05.17	3	4	5	-	12
56d	sri 29.03.17	Sri 24.05.17 - Pet 26.05.17	3	4	-	3	10
Ukupno			18	24	13	13	68

Uzorci su betonirani u tvornici Oberdorfer dana 27. 03. 2017. (prednapeti beton) te 29.03. 2017. (običan beton). Sila prednapinjanja je 120 kN. Dimenzije uzoraka određene su s obzirom na potrebe testova. Za pull – out test radi se 13 prizmi dimenzija 200 x 200 x 600 (mm) u koje je ugrađeno čelično uže (prednapeti sustav) te 13 prizmi istih dimenzija sa čeličnim užetom koje nije prednapeto. Ispitivanje savijanjem izvodilo se na 18 prizmi dimenzija 100 x 100 x 400 (mm), dok je tlačna čvrstoća dobivena ispitivanjem na 24 kocke dimenzija 150 x 150 x 150 (mm).

Svi testovi se ponavljaju pri starosti betona od 7, 28 i 56 dana.

4.2 Priprema uzorka

Uzorci za testiranje su pripremljeni u tvornici Oberdorfer koja se nalazi u mjestu Garmas Kamp, Austrija, u neposrednoj blizini od Beča (slika 4.1). Tvornica je poznata po proizvodnji najčešće korištenih predgotovljenih elemenata u građevinarstvu, kao što su: temelji, stupovi, armirano- betonske grede, zidne ploče, lagane krovove. Također, bavi se proizvodnjom stropnih i zidnih sustava te predgotovljenih podruma.



Slika 4.1 Tvornica Oberdorfer u kojoj je pripremljen uzorak [15]

Sastav betona određen je prema recepturi tvornice Oberndorf te je pripremljen samoozbijajući beton marke SCC50/60 s ciljem postizanja visoke čvrstoće prednapetog elementa.

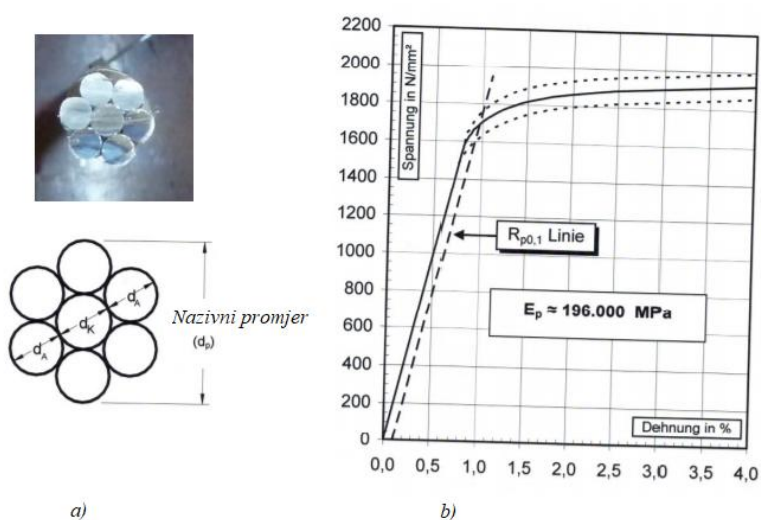
Čelik koji se koristi pri izradi uzoraka ima pojedinačne glatke žice marke St 1660/1860, a njegov dijagram prikazan je na slici 4.3 b).



Slika 4.2 Karakteristike čeličnog užeta

Čelično uže sastoji se od sedam isprepletenih žica čelika kao što je prikazano na slici 4.3a), a njegove karakteristike su:

- promjer $d=12,5$ mm,
- površina poprečnog presjeka $A=93$ mm²,
- masa po metru dužnom $m=726$ g/m'.



Slika 4.3 a) poprečni presjek užeta; b) karakteristike čelika St 1660/1860 [16]

Betonska mješavina napravljena je u tvornici, te je do sale za betoniranje transportirana pomoću košare koja je nošena dizalicom ABUS čija je nosivost do 16 tona. Navedena dizalica, kao i košara prikazane su na slici 4.4.



Slika 4.4 Priprema betonske mješavine te transport

4.2.1 Priprema uzorka prednapetog betona

U tvornici se postavlja kabel, te se prednapinje silom od 120 kN na oba svoja kraja. Navedeni kabeli s naglavkom prikazani su na slici 4.5 a), dok su na slici 4.5 b) prikazani kalupi oblika prizme u koje će se ugraditi svježa betonska mješavina.



a)



b)

Slika 4.5 Priprema prednapetih uzoraka a) sidrenje kabela b) kalupi

Proces prenaprezanja izvršen je sa hidrauličkim uređajem za prednapinjanje marke „Paul“, koji je prikazan na slici 4.6. Pomoću hidrauličke pumpe na uređaju izvršeno je prednapinjanje.

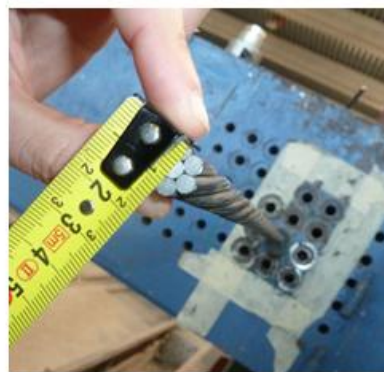


Slika 4.6. Hidraulički uređaj za prednapinjanje

Na slici 4.7b) je prikazano užje promjera 12,5 mm koje je pričvršćeno klinom kako ne bi došlo do gubitka sile prednapinjanja (slika 4.7a)).



a)



b)

Slika 4.7 a) klin za prednapinjanje b) promjer užeta

Plastična cijev duljine 14 centimetara postavljena je na visini 10 centimetara od dna kalupa, kako bi se osiguralno pravilno izvođenje pull-out testa te spriječila koncentracija naprezanja kod čelične ploče koja se koristi u istom testu. Na slici 4.8 prikazano je pozicioniranje navedene cijevi u kalup.



Slika 4.8 Plastična cijev te dimenzije kalupa

Beton je pomoću dizalice transportiran do mjesta ugradnje. Nije ga potrebno vibrirati jer se radi o samozbijajućem betonu. Neposredno nakon ugradnje betona u kalupe površinu je potrebno zagladiti, te adekvatno njegovati beton. Uzorci su ostavljeni 24 sata u laboratorijskim uvjetima, na temperaturi od $20 \pm 2^\circ\text{C}$.



Slika 4.9 Betonirani uzorci

Prednapeti uzorci nakon stvrđavanja betona i preuzimanja sile prednapinjanja režu su u skladu sa dimenzijama definiranim za testiranje. Na strani gdje se nalazi plastična cijev dužina užeta je 30 cm, a s druge strane 15 cm, te su spremni za transport. Svi uzorci su izvađeni iz kalupa, označeni te skladišteni u vlažnu komoru s temperaturom od $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ i relativnom vlažnošću zraka $> 95\%$.

Uzorci su nakon tjedan dana transportirani u laboratorij na sveučilište BOKU u Beču gdje su čuvani u laboratorijskim uvjetima do dana testiranja.

4.2.2 Priprema uzoraka obično armiranog betona

Kako bi se usporedili rezultati testova i razlike između prednapetog betona i onog koji nije prednapet rade se uzorci običnog betona. Napravljeni su u istoj tvornici, sa jednakom recepturom betona kao za prednapeti beton. Također, postupak izrade uzoraka je isti za betonske kocke te prizme. Razlikuje se izrada prizmi koje se koriste kod pull – out testa, na način da je u uzorke prethodno postavljeno uže. Ono nije prednapeto, kao što je to bio slučaj kod pripreme uzorka prednapetog betona. Geometrija postavljanja užeta je ista. Na jedan kraj se postavi plastična cijev te duljina užeta koja izlazi iz uzorka iznosi 30 cm na toj strani, dok je na drugoj 15 cm. Nakon toga uzorci su betonirani.



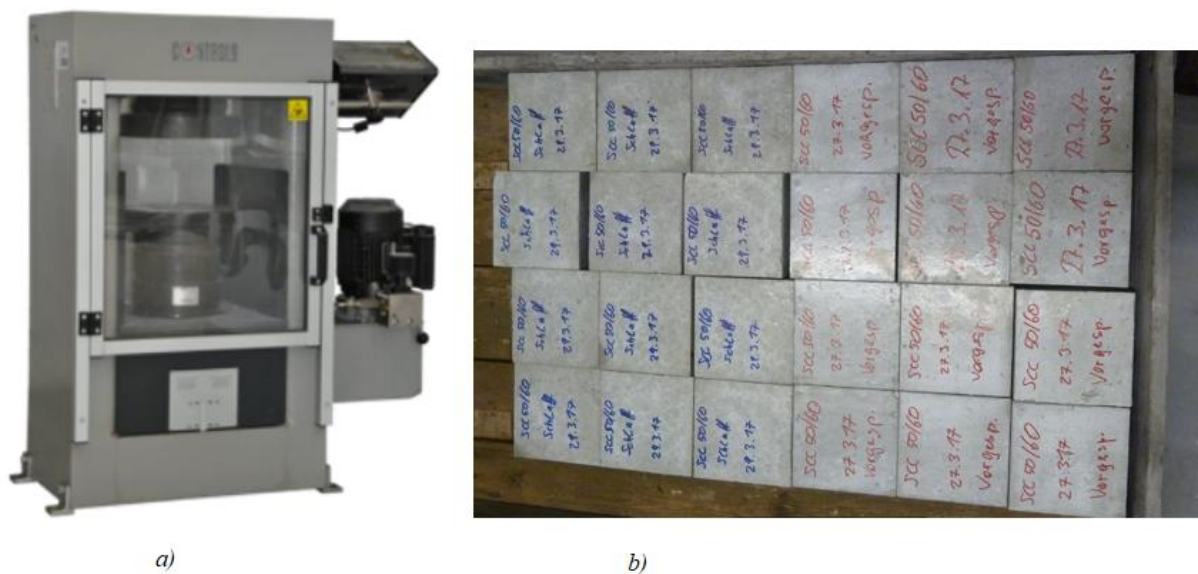
Slika 4.10 Uzorci betona koji nije prednapet

Nakon betoniranja, površina betona se zagradi te se njeguje prema za to propisanim uvjetima.

Napravljeni uzorci se transportiraju u laboratorij sveučilišta BOKU u Beču te se skladište u laboratorijskim uvjetima s temperaturom od $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ i relativnom vlažnošću zraka $> 95\%$ do dana testiranja.

4.3 Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

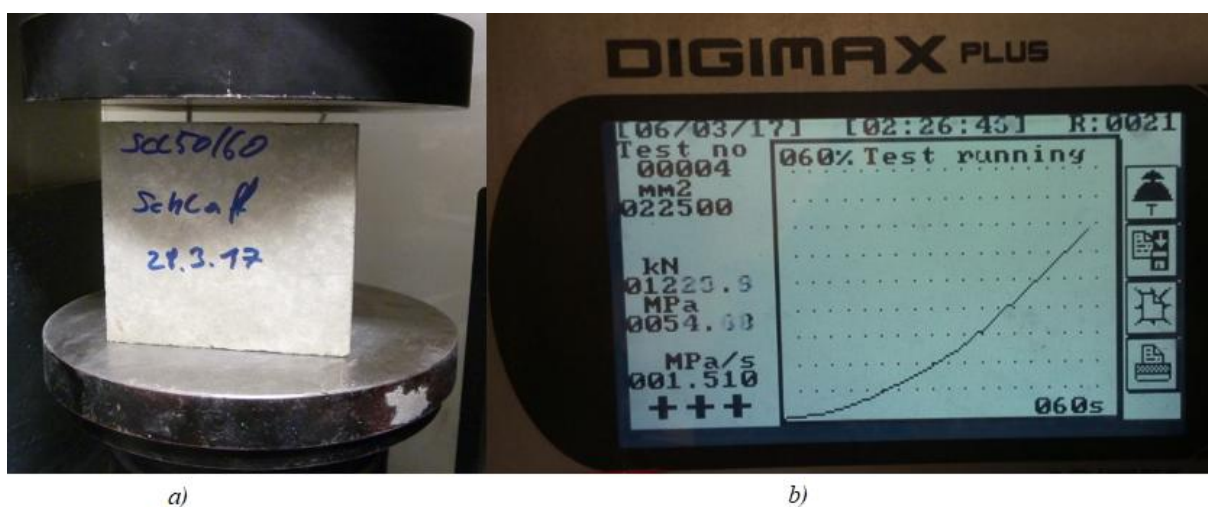
Ispitivanje tlačne čvrstoće betona vrši se na uzorcima oblika kocke s bridom 15 cm. Kalupi moraju biti čvrsti, te od materijala koji ne upija vodu (čelik, polimer), te se u njih ugrađuje i zbija beton po propisanoj proceduri. Beton se zadržava u kalupu 24 sata, u prostoriji propisane temperature i vlažnosti, a potom se vadi iz kalupa i ostavlja do dana ispitivanja u istim uvjetima ili se stavlja u vodu. Ispitivanje na pritisak vrši se pomoću preše koja je prikazana na slici 4.11a). Preciznost preše, kao i ravnost pritisnih ploča definiraju se standardom. Probno tijelo mora biti u vodom zasićenom stanju, no njegove površine moraju biti suhe. Mjeri se masa i dimenzije probnog tijela, te se na temelju dobivenih podataka izračuna volumna masa betona. Tijelo se potom pozicionira u preši i opterećuje do pojave loma.



Slika 4.11 a) preša za ispitivanje tlačne čvrstoće betona [17] b) betonske kocke

Rezultat ispitivanja je tlačna čvrstoća:

$$f_{ck} = \frac{F}{A} [\text{Mpa}] \quad [4.1]$$



Slika 4.12 a) kocka u preši b) zaslon preše tijekom pokrenutog testa

U tablicama 4.2 i 4.3 prikazani su rezultati mješavine samozbijajućeg betona SCC50/60 starosti od 7, 28 te 56 dana, koje su se koristile za prednapete i neprednapete uzorke.

Ispitane su po četiri probne kocke te je izračunata srednja vrijednost i varijacijski koeficijent koji je omjer standarne devijacije rezultata tlačne čvrstoće i srednje vrijednosti prikazan postotkom.

Tablica 4. 2 Mješavina SCC-a koji se ugradio u prednapete uzorke

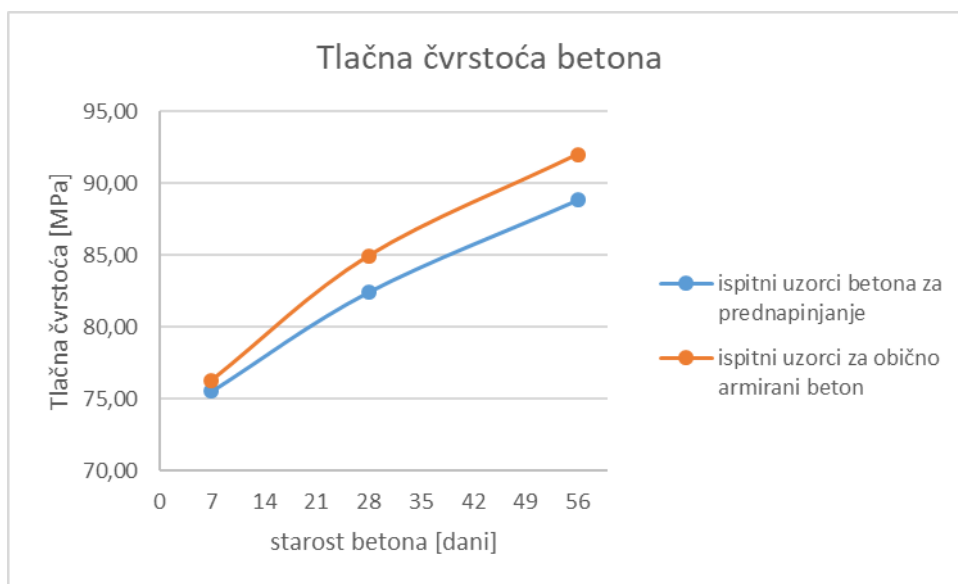
Starost betona	Masa kocke [kg]	Tlačna čvrstoća [Mpa]
7 dana	8,15	76,49
7 dana	8,15	72,32
7 dana	8,15	74,20
7 dana	8,15	79,25
Srednja vrijednost		75,57
Varijacijski koeficijent		3,96%
28 dana	8,10	83,42
28 dana	8,20	83,78
28 dana	8,15	81,27
28 dana	8,10	81,33
Srednja vrijednost		82,45
Varijacijski koeficijent		1,62%
56 dana	8,10	87,18
56 dana	8,15	87,97
56 dana	8,20	90,19
56 dana	8,15	90,02
Srednja vrijednost		88,84
Varijacijski koeficijent		1,69%

Tablica 4.3 Mješavina SCC-a za obične (armirane) uzorke

Starost betona	Masa kocke [kg]	Tlačna čvrstoća [Mpa]
7 dana	8,30	76,62
7 dana	8,15	76,62
7 dana	8,25	76,00
7 dana	8,10	76,00
Srednja vrijednost		76,31
Varijacijski koeficijent		0,47%
28 dana	8,15	78,71
28 dana	8,20	87,89
28 dana	8,15	88,29
Srednja vrijednost		84,96
Varijacijski koeficijent		6,38%
56 dana	8,25	89,83
56 dana	8,15	91,86
56 dana	8,15	93,60
56 dana	8,25	92,77
Srednja vrijednost		92,02
Varijacijski koeficijent		1,76%

Napomena: Kod mješavine običnog betona, čiji su rezultati prikazani u tablici 4.3, došlo je do oštećenja na ispitnoj kocki starosti 28 dana te su njeni rezultati zanemareni i nisu korišteni pri izračunu srednje vrijednosti tlačne čvrstoće betona od 28 dana.

Starost betona doprinosi povećanju tlačne čvrstoće. Na slici 4.13 vidljiv je porast tlačne čvrstoće sa starenjem betona. Tako beton nakon 28 dana pokazuje oko 70 % konačne tlačne čvrstoće. Do razlike u čvrstoći između ispitnih uzoraka betona za prednapinjanje te ispitnih uzoraka za obično armirani beton došlo je jer uzorci nisu betonirani istog dana.



Slika 4.13 Tlačna čvrstoća betona

Kako se radi o samozbijajućem betonu koji postiže visoku tlačnu čvrstoću ploha loma prolazi kroz zrna agregata.



Slika 4.14 Ploha loma

4.4 Pull - out test

4.4.1 Cilj testa

Cilj pull - out testa je prikazati vezu između posmičnog naprezanja te relativnog pomaka betona i čeličnog užeta, odnosno prokliznuće u prednapetom betonu. Djelotvornost spoja ovisi o čvrstoći prijanjanja na kontaktu između betona i užeta. Općenito uzevši, spoj je interaktivni mehanizam koji omogućuje prijenos sile između armaturnih šipaka i okolnog betona pa stoga osigurava kompozitno djelovanje između ta dva materijala. Može se reći da otpornosti spoja doprinose tri osnovna elementa: kemijsko prijanjanje, tarni otpor i mehaničko uklještenje koje nastaje uslijed nosivog djelovanja na kontaktu između rebra šipke i betona. Do prijanjanja dolazi zbog kemijskog povezivanja cementa i šipke te zbog sile skupljanja koja se razvija tijekom njege; osim toga, stupanj prionljivosti ovisi i o svojstvima materijala kojim je šipka okružena. [18]

Adhezija i nosivo djelovanje aktiviraju se nakon popuštanja kemijske prionljivosti. Adhezija na kontaktu između šipke i betona, koja se suprotstavlja proklizavanju, pojačava se ako na bočnoj površini šipke postoji radijalni pritisak. [18]

Očvršćenje koje se javlja u zoni veznog sidrenja značajno doprinosi čvrstoći prijanjanja. Očvršćenje se može postići nanošenjem normalnog pritiska u smjeru okomitom na osnu silu u armaturnim šipkama. [18]

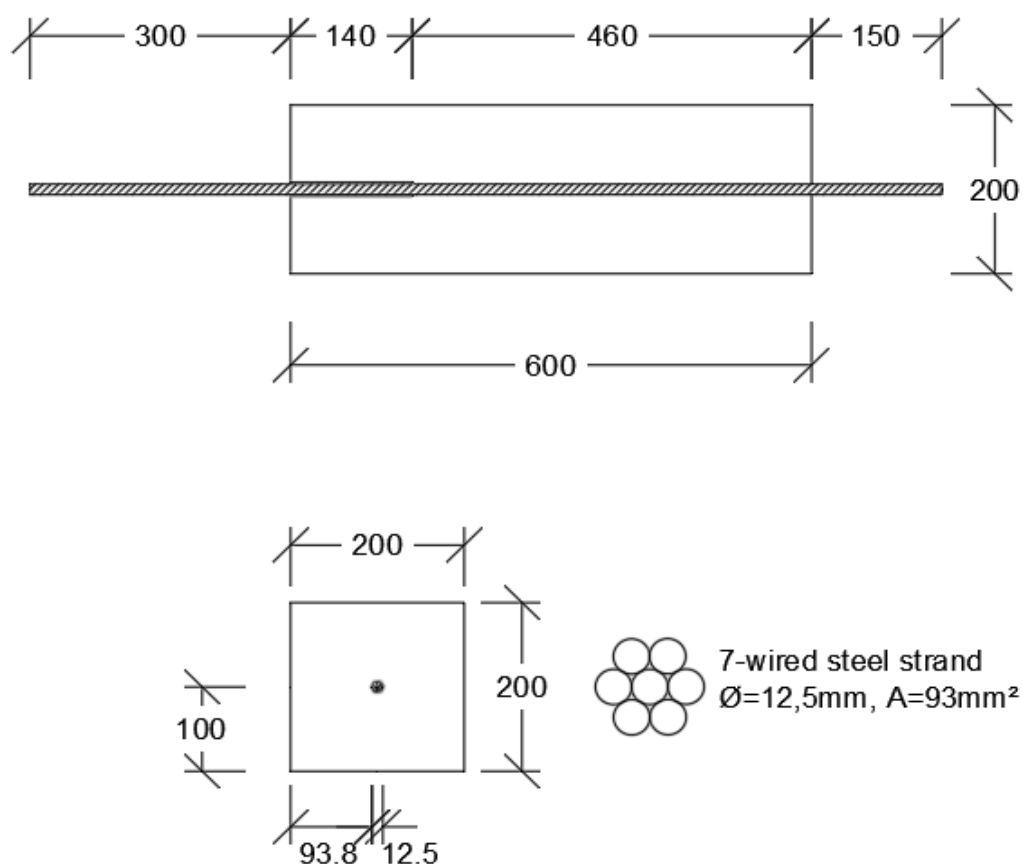
Čelično uže je ugrađeno u beton te je opterećeno na jednom kraju silom dok je drugi kraj slobodan. Mjeri se odnos između vlačne sile te pomaka čeličnog užeta. Sila se povećava dok ne dođe do pucanja veze.

4.4.2 Opis uzorka za ispitivanje

Promatra se uzorak betona u koji je ugrađeno čelično uže sa geometrijom kao što je prikazano na slici 4.15. Sve dimenzije su u milimetrima (mm). Od ukupne duljine betonske prizme koja iznosi 600 mm, efektivna duljina je 460 mm, jer 140 mm iznosi duljina plastične cijevi koja je postavljena radi pravilnog izvođenja testa. Uže koja se testira proteže se kroz uzorak tako da slobodni kraj izlazi s jedne strane uzorka u duljini od 150 mm, te na drugoj strani u duljini od 300 mm. Uzorak je okrenut tako da se duža strana užeta izlaže djelovanju sile. Plastična navlaka duljine 140 mm postavljena je prije betoniranja na uže kako bi se omogućilo pravilno izvođenje testa, odnosno smanjila koncentracija naprezanja na vrhu

uzorka na kojeg se postavlja čelična ploča prema postavkama testa. Plastična cijev postavlja se sa odstupanjem od 1 mm te je preporučeno da njena debljina ne prelazi 2 mm.

Uzorci prednapetog i običnog betona koji se koriste napravljeni su u tvornici Oberndorfer kao što je to opisano u poglavlju 4.2 *Priprema uzorka* te skladišteni u laboratoriju sveučilišta BOKU do dana ispitivanja.



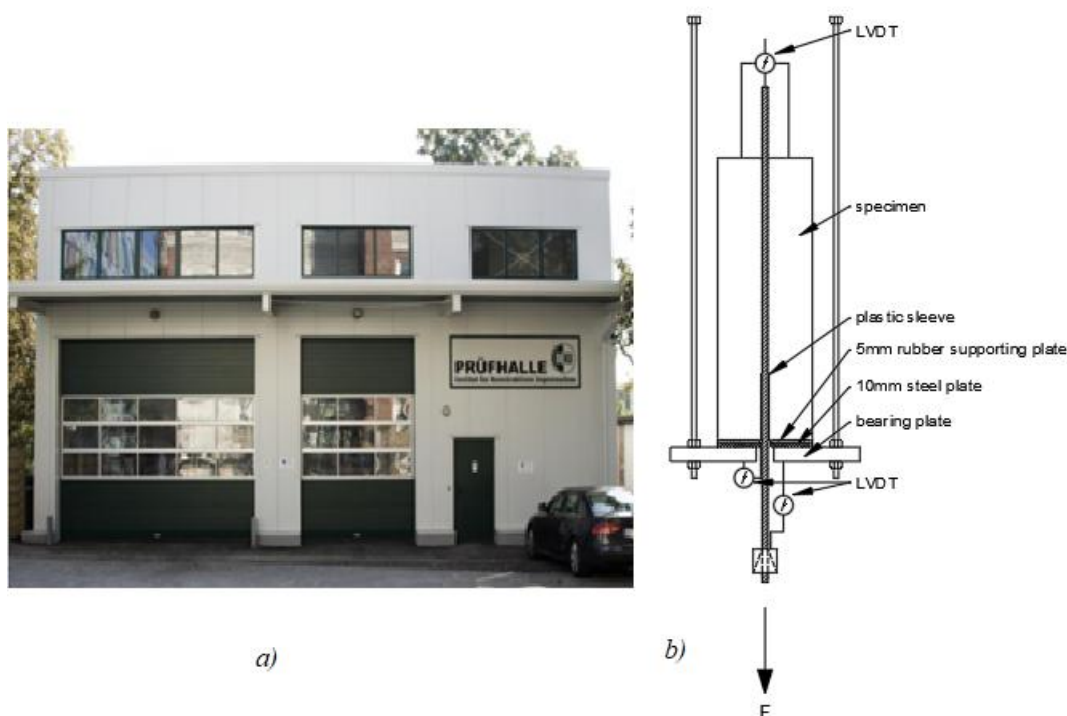
(dimensions in mm)

Slika 4.15 Prikaz uzorka za testiranje

4.4.3 Izvođenje testa

U ovom radu provođen je pull – out test na uzorcima starosti 7, 28 i 56 dana u laboratoriju sveučilišta BOKU pomoću hidrauličnog stroja za ispitivanje IKI-02. Postavke testa prikazane su na slici 4.16b).

Oznake uzoraka prednapetog betona su od P1 do P13, te UP1 do UP13 za neprednapeti beton.



Slika 4.16 a)laboratorij [17] b) postavke testa

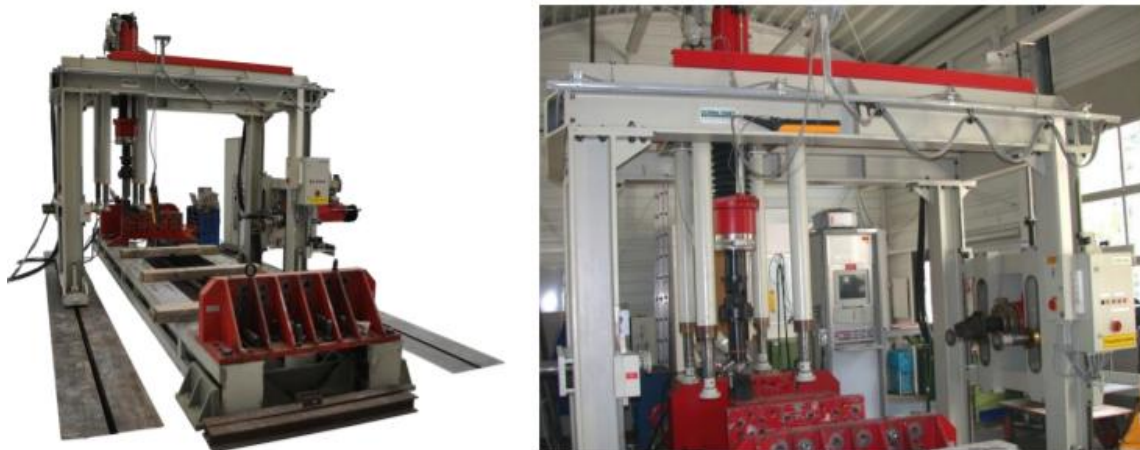
Stroj može provoditi statičke i dinamičke testove sa sljedećim rasponima opterećenja:

Slučaj 1: vertikalna sila – 630 kN

Slučaj 2: horizontalna sila – 630 kN

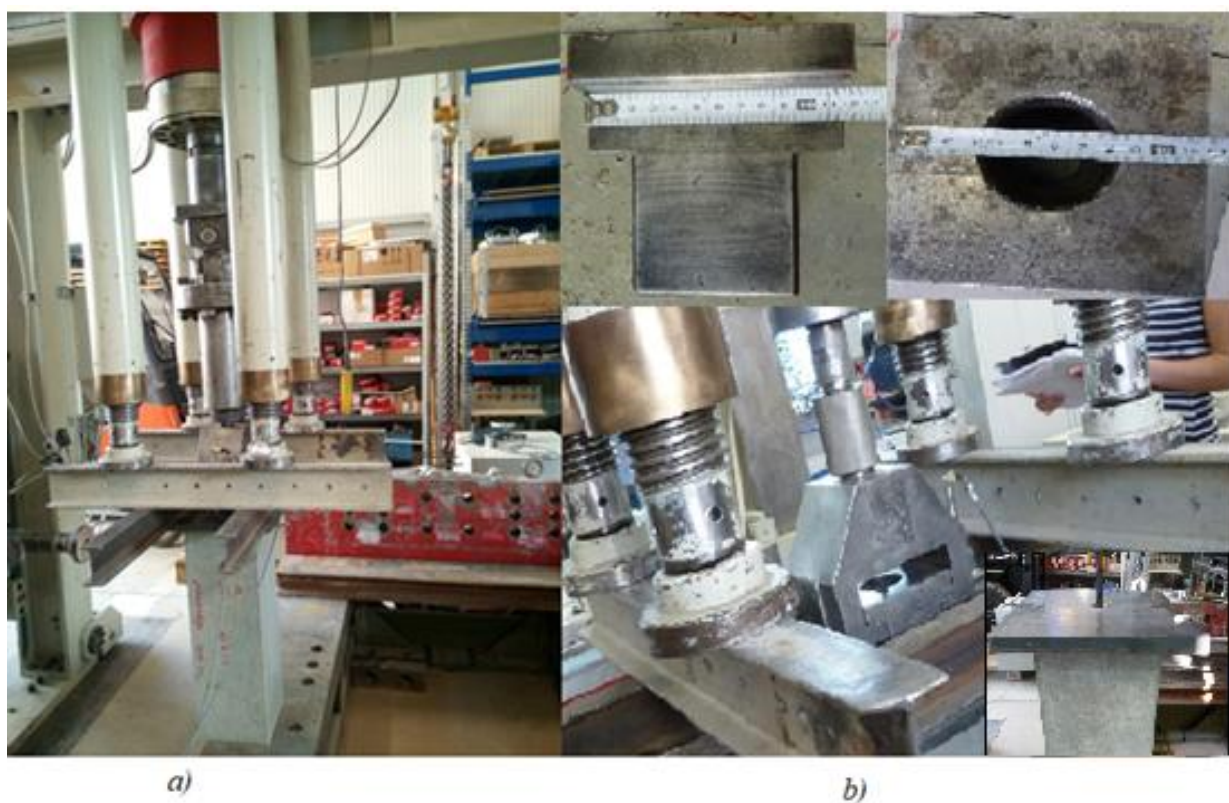
Slučaj 3: vertikalna sila- 1200 kN (tlak) te 2000 kN (vlak)

Sustav se napaja sa hidrauličkog uređaja iz laboratorija te je omogućeno klizno pomicanje njegovih elemenata.



Slika 4.17 Uređaj za izvođenje pull- out testa IKI-02 [17]

Betonski uzorak je prednapet pod silom od 120 kN te je čuvan u laboratorijskim uvjetima do dana testiranja. Prilikom testiranja uzorak se postavio u vertikalni položaj kao što je prikazano na slici 4.18a). Na njega je postavljena čelična ploča sa otvorom u sredini kako bi kroz navedeni otvor mogla proći šipka. Na šipku se postavlja klin kakav je korišten za prednapinjanje. Potrebno je učvrstiti glavu uređaja za ispitivanje, te provjeriti da se nalazi u vertikalnom položaju. Uzorak se učvrsti sa četiri grede, jedna sa svake strane, te se na njih postavljaju cilindri uređaja koji služe za pridržavanje uzorka te osiguravaju da ne dođe do njegovog pomicanja tijekom obavljanja testa.



Slika 4.18 a) izvođenje testa b) oprema za izvođenje testa

Potrebno je pripremiti ulazne podatke za unos u računalo koje je spojeno s uređajem za testiranje. Brzina izvlačenja užeta iznosi 0,008 mm/s. Sljedeći podatak koji se unosi je duljina do koje se mjere pomaci pomoću cilindra uređaja, a ona je ograničena postavkama uređaja IKI - 02 te iznosi 160 mm. Postave se senzori za mjerenje pomaka (LVDT), dva s gornje strane i jedan na dnu uzorka. S obzirom na ograničenost uređaja za mjerenje, pomoću LVDT - a mogu se mjeriti pomaci do 20 mm na vrhu uzorka, te do 50 mm na dnu. Glava cilindra uređaja se prethodno optereti silom u iznosu od 0,5 kN.

Uređaj bilježi silu koja je potrebna za izvlačenje užeta te pripadne pomake. Rezultati testa su preuzeti i dalje obrađeni u exelu.

Tijekom izvođenja testova, nakon određenog vremena, čuju se povremeni udarci, svako 2 – 3 sekunde, koji se mogu opisati kao udarci čekićem. Uzrokovani su pokušajem izvlačenja užeta te odupiranjem betona tom pomaku. Kod nekih uzoraka dogodio se nagli pad sile izvlačenja užeta koji se odrazio kao jedan jaki udarac. Dolazi do pucanja veze betona i čeličnog užeta nakon čega sila nastavlja rasti.

Testovi su prekinuti nakon što se dosegne krajnja vrijednost pomaka cilindra uređaja, odnosno ograničeni su uređajem za ispitivanje.

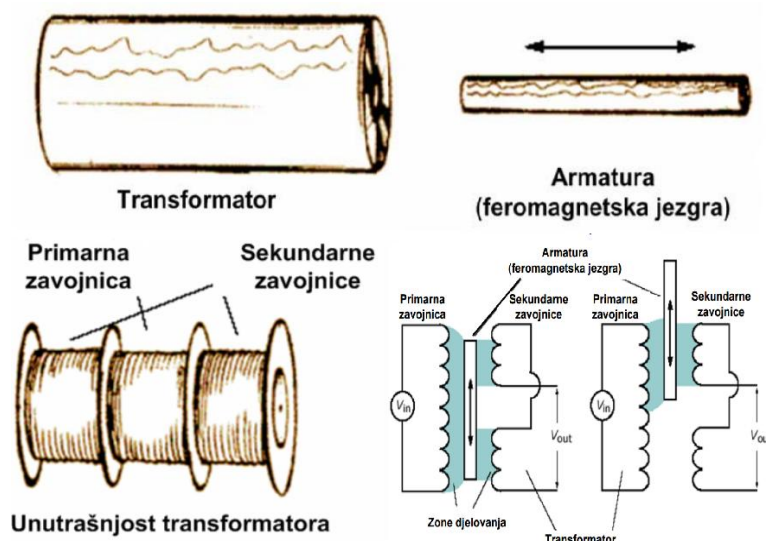
4.4.3.1 Dodatna oprema potrebna za testiranje - LVDT senzori

Linearni Varijabilni Diferencijalni Transformator (LVDT) je elektromehanički pretvarač koji pravocrtnne pomake objekta, za koji je mehanički pričvršćen, pretvara u odgovarajući električni signal.

Dijelovi LVDT - a

LVDT senzori se sastoje od statičkog i dinamičkog dijela. Statičkom dijelu pripada središnji primarni namotaj smješten između para identičnih sekundarnih namotaja postavljenih simetrično oko primarnog. Uzvojnice su namotane oko šupljeg cilindra izrađenog od termički stabilnog staklom ojačanog polimera, zaštićenog od utjecaja vlage magnetskim štitom visoke permeabilnosti. Sve skupa je smješteno u cilindričnom kućištu od nehrđajućeg čelika. Dinamičkom dijelu pripada pokretni element, a to je odvojena cilindrična jezgra (Ni - Fe) mehanički povezana s mjernim tijelom koja se može uzdužno slobodno pomicati unutar statičkog elementa. Prilikom mjerenja, primarni se namotaj napaja izmjeničnom strujom odgovarajuće amplitude i frekvencije – primarna uzbuda. Električni izlazni signal s LVDT - a je diferencijalni AC napon između dva sekundarna namotaja, koji varira s promjenom uzdužnog položaja jezgre unutar uzvojnice. Izlazni AC signal se obično pretvara pomoću

odgovarajućeg električnog strujnog kruga u visoku DC voltažu ili struju povoljniju za uporabu. [19]



Slika 4.19 Dijelovi LVDT senzora [19]

Način rada LVDT-a

Primarni navoj P napaja se AC strujom konstantne amplitude te tako nastaje magnetsko polje između jezgre i sekundarnih navoja S1 i S2. Dok je jezgra točno između dva sekundarna navoja S1 i S2, njima odgovara jednaka magnetska struja, a s time su podjednaki i u njima nastali naponi E_1 i E_2 . Izlazna razlika napona $E_2 - E_1$ u tom položaju jezgre (nulta točka), prema tome, jednaka je nuli. Pomakom jezgre bliže sekundarnom namotaju S1, pripada mu veći magnetski tok te raste nastali napon E_1 dok se E_2 smanjuje, što rezultira diferencijalnim naponom ($E_1 - E_2$). U suprotnom slučaju, pomakom jezgre bliže drugom sekundarnom namotaju S2, nastaje diferencijalni napon ($E_2 - E_1$).

Razlozi korištenja LVDT-a: [19]

- Rad bez utjecaja trenja je omogućen s obzirom da nema mehaničkog dodira između jezgre i namotaja pa se koriste kod ispitivanja materijala te mjerenja vibracija;
- Beskonačno velika rezolucija – Moguće je mjerenje infinitezimalno malih promjena položaja jezgre (ograničenja su posljedica šuma pretvaračkih elektroničkih uređaja i rezolucije izlaznog display-a) sa izuzetno velikom ponovljivosti mjerenja;
- Neograničena mehanička trajnost – usljed navedenog izostajanja mehaničkog trenja (osobito važno u mjerenjima s potrebnom izuzetno velikom pouzdanosti);
- Otpornost na oštećenja pri prekoračenju deklariranih pomaka – Kako je unutarnji cilindar LVDT-a najčešće otvoren s oba kraja, pri eventualnom prijelazi jezgre izvan

područja sekundarnih namota, nema oštećenja uređaja (npr. mjerenje vlačne čvrstoće do sloma kod destruktivnih ispitivanja);

- Jednoosna osjetljivost – LVDT odgovara na pomake jezgre duž osi instrumenta ali je općenito neosjetljiv na eventualne poprečne ili radijalne pomake jezgre;
- Odvojena unutarnja građa – Kako su statički i pomični dio LVDT - a potpuno odvojeni (veza se ostvaruje samo preko magnetskog polja), moguće je njegovo punjenje tekućinom u cilju primjene kod mjerenja npr. hidrauličkih učinaka i slično;
- Otpornost na djelovanje okolnih uvjeta – Materijali i način konstrukcije LVDT - a rezultirali su robusnim i trajnim senzorom otpornim na različite uvjete okoliša kao što su otpornost na vlagu, otpornost na iznenadne udare i vibracije u svim smjerovima, unutarnje visoko permeabilno magnetsko polje minimizira utjecaje vanjskih AC polja, otpornost na koroziju, uobičajeni LVDT - i mogu se primijeniti u velikom opsegu vanjskih temperatura; uporabom specijalnih materijala pri konstrukciji LVDT - a moguće ih je primijeniti i u izrazito niskim i visokim temperaturama kao i u prostorima s povišenom radijacijom i drugim zračenjima;
- Ponovljivost nulte točke – Položaj stvarne nul-točke LVDT-a je izrazito stabilan i ponovljiv i u slučajevima znatnih promjena temperature;
- Brz dinamički odziv – Usljed već pominjanog izostajanja unutarnjeg mehaničkog trenja, LVDT može veoma brzo reagirati na promjene položaja jezgre, – Dinamički odziv LVDT-a limitiran je jedino inercijskim učincima mase jezgre i karakteristikama popratnih pretvaračkih uređaja;
- Apsolutni izlaz – Za razliku od uređaja s tzv. inkrementalnim izlazom (to npr. znači da u slučaju gubitka napajanja, podaci o pomacima koje je LVDT poslao nisu izgubljeni a uspostavljanjem napajanja, izlazna vrijednost bit će jednaka onoj pri prekidu.

Nedostaci:

- Dinamička mjerenja ograničena rezonantnom frekvencijom LVDT ($<1/10 f_r$);
- Jezgra mora biti u fizičkom dodiru s mjernom površinom;
- Ograničen mjerni opseg (<500 mm).

Primjena LVDT-a u građevinarstvu:

- Mjerenje svih vrsta pomaka osobito prilikom ispitivanja vlačne, tlačne i čvrstoće na savijanje;
- Mjerenje širenja pukotina u betonu;

- Mjerenje deformacija usljed skupljanja, puzanja i tečenja materijala;
- Dinamička mjerenja;
- Mjerenja umora materijala u konstrukciji.

LVDT uređaje je potrebno kalibrirati prije njihovog korištenja kako bi rezultati bili mjerodavni.

4.4.4 Rezultati

Pri završetku testa, zbog čupanja užeta iz betonskog uzorka koji je nepomičan, sustav se nalazi pod opterećenjem te ga je potrebno otpustiti. Otpuštanjem dolazi do zakretanja glave kao što je prikazano na slici 4.20. Najčešće zakretanje iznosi 45° .



Slika 4.20 Zakretanje glave (lijevo); Izgled užeta nakon testa (desno)

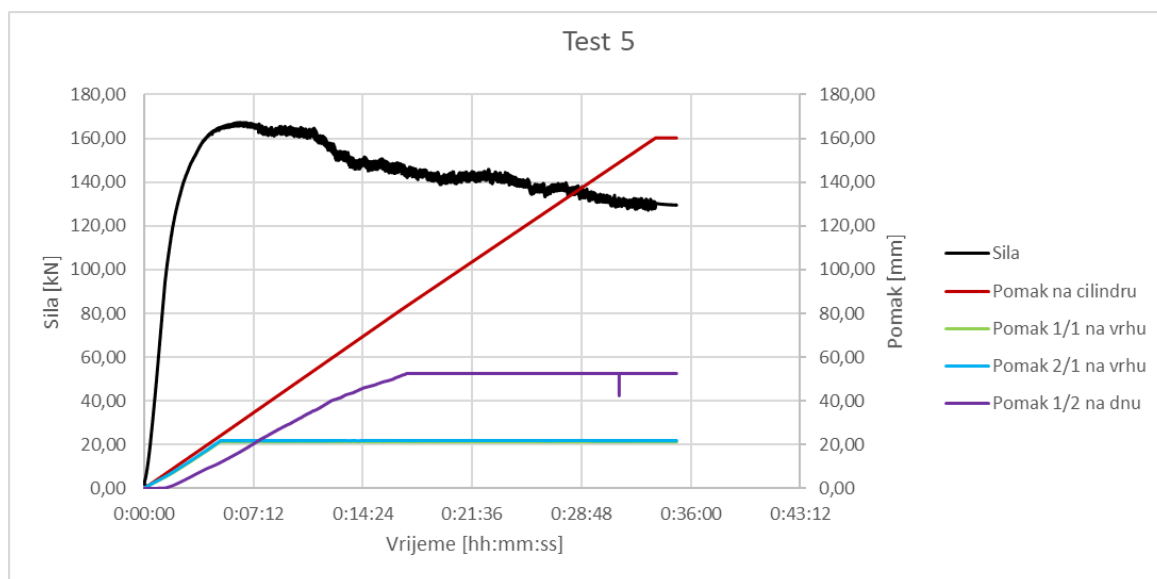
Kod nekih uzoraka betona starosti 28 i 56 dana došlo je do pucanja dijelova užeta na strani gdje djeluje sila izvlačenja kao što je prikazano na slici 4.21.



Slika 4.21 Izgled užeta nakon pojedinih testova

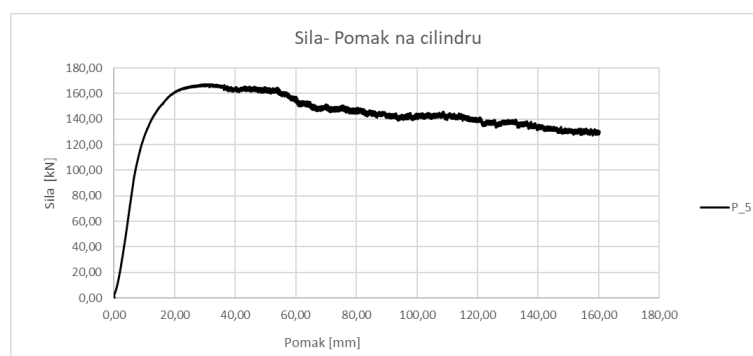
U ovom radu detaljni rezultati prikazat će se na jednom uzorku prednapetog betona P5 dok su za ostale uzorke vrijednosti maksimalne sile te pripadno naprezanje prikazani u tablicama 4.4 te 4.5.

Za spomenuti uzorak P5 test je trajao 35 minuta, a dobiveni rezultati prikazani su dijagramom na slici 4.22. Pomak 1/1 na vrhu te 2/1 na vrhu označavaju pomake izmjerene pomoću LVDT senzora na vrhu uzorka dok pomak 1/2 na dnu označava pomak izmjeren na isti način, ali na dnu uzorka.



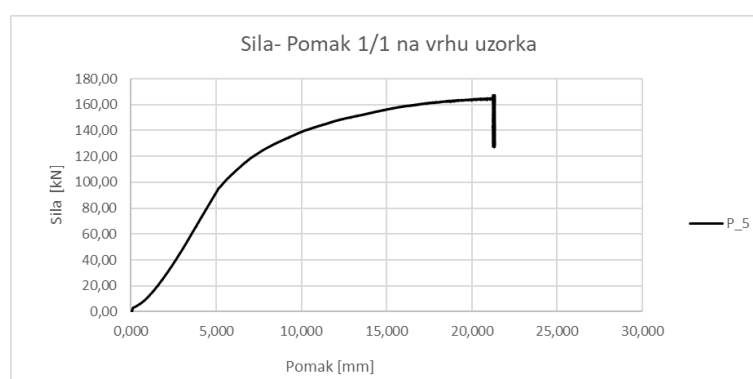
Slika 4.22 Rezultati testa

Na lijevoj strani y-osi nalazi se sila u kN, dok desna strana prikazuje pomak u milimetrima. Zbog ograničenosti LVDT-a pomak na vrhu uzorka se može mjeriti samo do 20 mm, a na dnu do 50 mm. Maksimalna sila koja je postignuta iznosi 167,29 kN. Nakon što sila dosegne maksimalnu vrijednost, tijekom izvođenja testa, čuju se udarci u nejednakim intervalima od 1 do 3 sekunde. Što je veći pad sile udarci se povećavaju. Spomenuti udarci su posljedica pucanja veze između čelika i betona. Uže se pokušava izvući i odvojiti od betona, a on joj to ne dopušta te dolazi do pucanja veze i stvaranja napetosti u tom području. Nakon 20-te minute testiranja pad sile se nije znatno promijenio. Test je prekinut nakon 35-te minute jer više nije bilo prostora na cilindru uređaja koji služi za izvlačenje šipke.

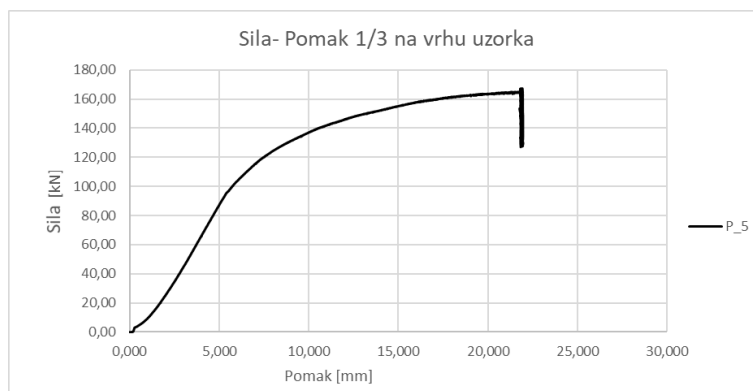


Slika 4.23 Odnos sile izvlačenja i pomaka mjenjenih na cilindru

Na slici 4.23 prikazan je odnos sile i pomaka mjenjenog na cilindru. Taj pomak se smatra mjerodavnijim od pomaka mjenjenih pomoću LVDT-a jer je njime omogućeno zabilježiti veće vrijednosti pomaka (do 170 mm), za razliku od LVDT-a. Usporedbe radi, na slikama 4.23 te 4.24 prikazani su rezultati dobiveni pomoću LVDT-a.

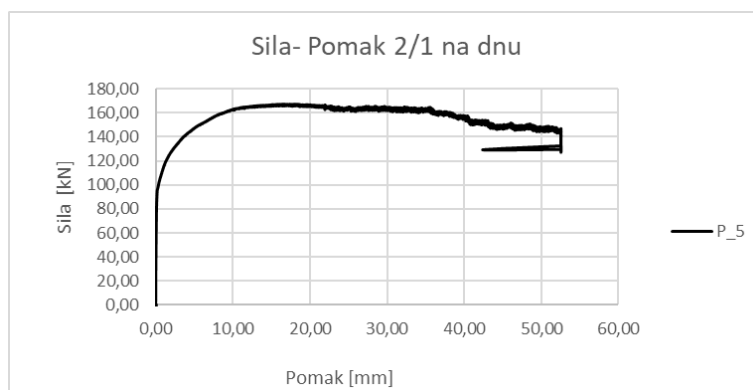


Slika 4.24 Odnos sile izvlačenja i pomaka 1/1 mjenjenog pomoću LVDT na vrhu



Slika 4.25 Odnos sile izvlačenja i pomaka 1/3 mjenog pomoću LVDT na vrhu

LVDT uređaji postavljeni na vrhu uzorka prestali su mjeriti pomak čelične šipke nakon 20 mm. Zbog toga, ovi rezultati nisu korišteni za daljnja proučavanja.



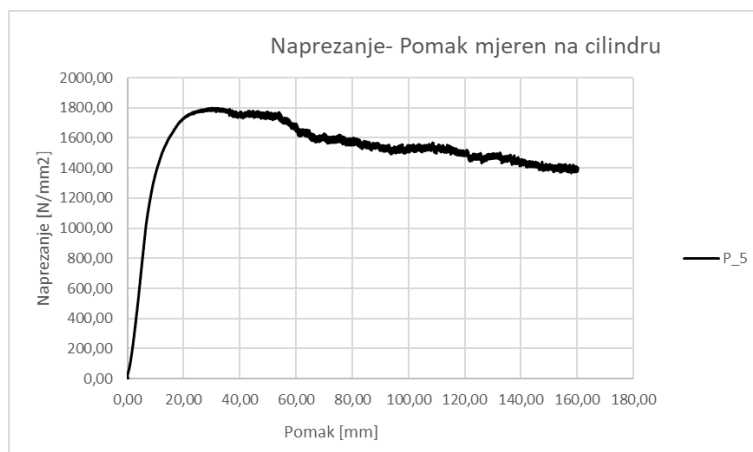
Slika 4.26 Odnos sile izvlačenja i pomaka 2/1 mjenog pomoću LVDT na dnu

Pomak čeličnog užeta mjenog pomoću LVDT senzora koji se nalazi na dnu uzorka prikazan je na slici 4.26. On je mjerodavan za proučavanje odnosa posmičnog naprezanja i relativnog pomaka užeta, a sami rezultati su objašnjeni u poglavlju 5. *Pregled i ocjena rezultata.*

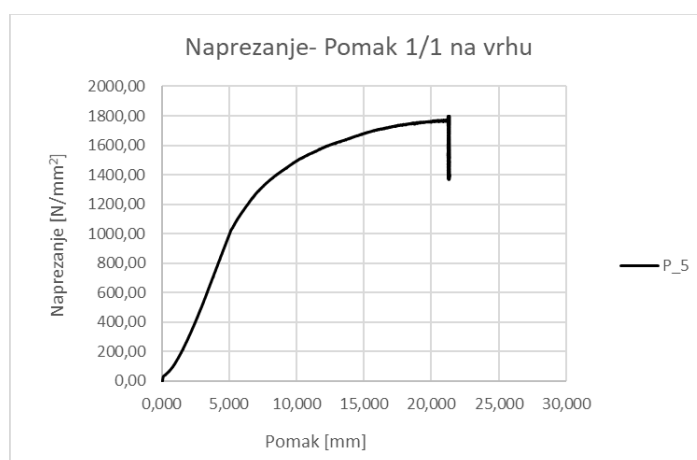
Pomoću dobivenih vrijednosti testa može se izračunati naprezanje u kontaknoj zoni između čelika i betona koristeći jednadžbu 4.2.

$$\sigma = \frac{F}{A_s}; \quad [4.2]$$

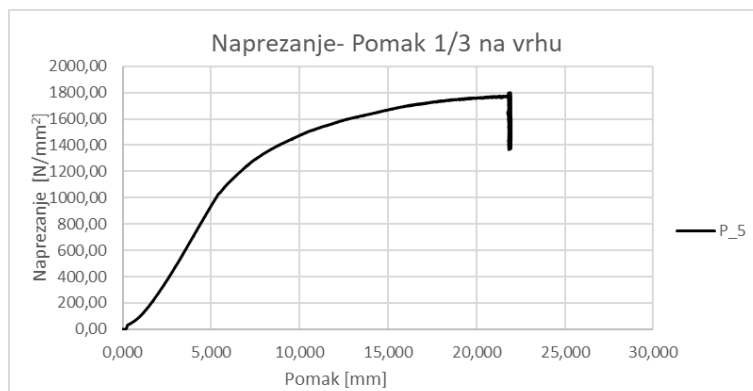
F je sila dobivena pomoću testa, a A_s je površina poprečnog presjeka koja iznosi 93 mm².



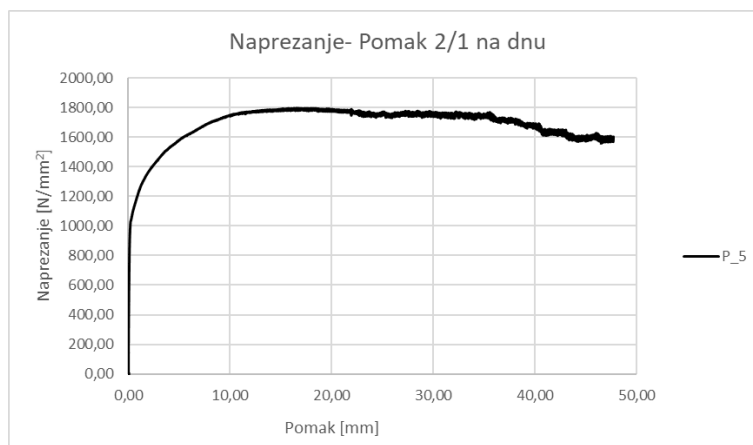
Slika 4.27 Odnos naprezanja i pomaka mjerenog na cilindru uređaja



Slika 4.28 Odnos naprezanja i pomaka mjerenog pomoću LVDT-a 1/1 na vrhu uzorka



Slika 4.29 Odnos naprezanja i pomaka mjerenog pomoću LVDT-a 1/3 na vrhu uzorka



Slika 4.30 Odnos naprezanja i pomaka mjerenog pomoću LVDT-a 2/1 na dnu uzorka

Za ostale uzorke prednapetog i neprednapetog betona rezultati maksimalne sile te pripadnog naprezanja prikazani su u tablicama 4.4 i 4.5.

Tablica 4.4 Vrijednosti maksimalne sile i pripadna naprezanja za uzorke prednapetog betona

Uzorak	Starost betona	Max sila [kN]	Naprezanje [N/mm ²]
P1	7 dana	164,07	1764,23
P2	7 dana	168,97	1816,84
P3	7 dana	161,13	1732,61
P4	7 dana	171,40	1843,03
P5	7 dana	167,29	1798,77
Srednja vrijednost		166,57	1791,10
P6	28 dana	171,25	1841,45
P7	28 dana	173,06	1860,87
P8	28 dana	180,26	1938,32
Srednja vrijednost		174,86	1880,22
P9	56 dana	175,27	1884,58
P10	56 dana	178,14	1915,52
P11	56 dana	170,88	1837,39
P12	56 dana	178,00	1913,94
P13	56 dana	173,33	1863,81
Srednja vrijednost		175,12	1883,05

Tablica 4.5 Vrijednosti maksimalne sile i pripadna naprezanja za uzorke običnog betona

Uzorak	Starost betona	Max sila [kN]	Naprezanje [N/mm ²]
UP1	7 dana	169,18	1764,23
UP2	7 dana	172,91	1859,29
UP3	7 dana	172,85	1858,61
UP4	7 dana	172,75	1857,48
UP5	7 dana	160,23	1722,90
Srednja vrijednost		169,58	1812,50
UP6	28 dana	180,03	1935,84
UP7	28 dana	182,32	1960,45
UP8	28 dana	182,51	1962,48
UP9	28 dana	179,34	1928,39
UP10	28 dana	179,99	1935,39
Srednja vrijednost		180,84	1944,51
UP11	56 dana	180,91	1945,32
UP12	56 dana	179,72	1932,45
UP13	56 dana	178,21	1916,19
Srednja vrijednost		179,61	1931,32

Vrijednost sile potrebne za izvlačenje čeličnog užeta iz uzoraka prednapetog i obično armiranog betona raste sa starosti betona. Nakon 28 dana potrebna je približno ista sila izvlačenja kao i nakon 56 dana. Tome doprinosi čvrstoća betona koja sporije raste nakon 28 dana.

Napomena: Pregledom rezultata može se primijetiti kako su vrijednosti sile kod prednapetog i armirano običnog betona slične. Postoji vjerojatnost da se to dogodilo jer je uže prednapetog betona izrezano na 150, odnosno 300 mm sa svake strane što nije dovoljna dužina u usporedbi s veličinom uzorka. Također, to nije dovoljna duljina da bi se pravilno prenijela sila napinjanja.

Uzorci ispitani pull – out testom u ovom radu su efektivne duljine 460 mm, a oni opisani u poglavlju 3. *Dosadašnja ispitivanja* 406 mm. Testirani uzorci podnose veće sile čupanja pa se rezultati smatraju zadovoljavajući. Na primjer, kod uzoraka iz poglavlja 3.1 zabilježena sila iznosila je 102,3 kN dok se vrijednosti sile dobivenih pull – out testovima u eksperimentalnom dijelu ovog rada kreću oko 170 kN. Veća vrijednost sile potrebne za čupanje užeta iz betona osigurava bolji spoj te prijanjanje betona i čeličnog užeta.

4.5 Ispitivanje savijanjem (Three point bending test)

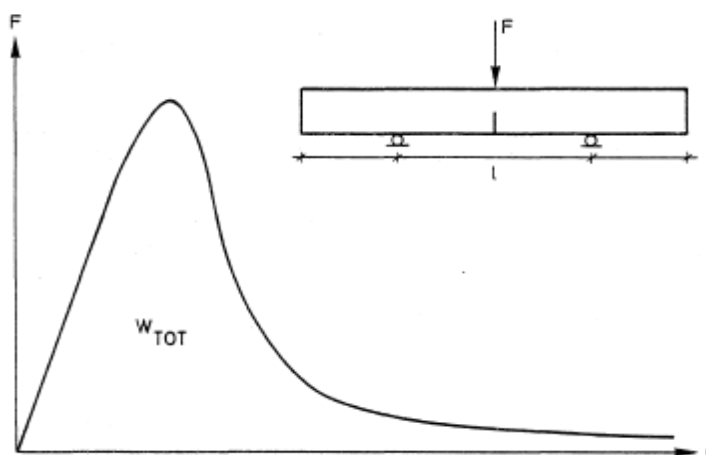
4.5.1 Cilj testa

Pri razvoju pukotine kod velikih greda oslobađa se relativno velika deformacijska energija koju beton ne može preuzeti, odnosno nestabilan razvoj pukotine dovodi do krčkog loma. Kod male grede beton može prihvatiti oslobođenu deformacijsku energiju, razvoj pukotine je stabilan pa nastaje duktilni slom.

Energija sloma je definirana kao energija potrebna za stvoriti jednu jedinicu površine pukotine. Može se opisati jednačinom:

$$G_F = \frac{W_{TOT}}{A_{LIG}} \quad [4.3]$$

Gdje G_F predstavlja energija sloma, W_{TOT} utrošeni rad, a A_{LIG} površina pukotine nastale pri radu W_{TOT} .



Slika 4.31 Grafički prikaz energije sloma

Najprecizniji način određivanja energije sloma je preko testa savijanja uzorka pridržanog u tri točke kao što je prikazano na slici 4.31. Donje dvije točke su ležaji, a gornjom se nanosi opterećenje, odnosno sila F .

4.5.2 Izvođenje testa

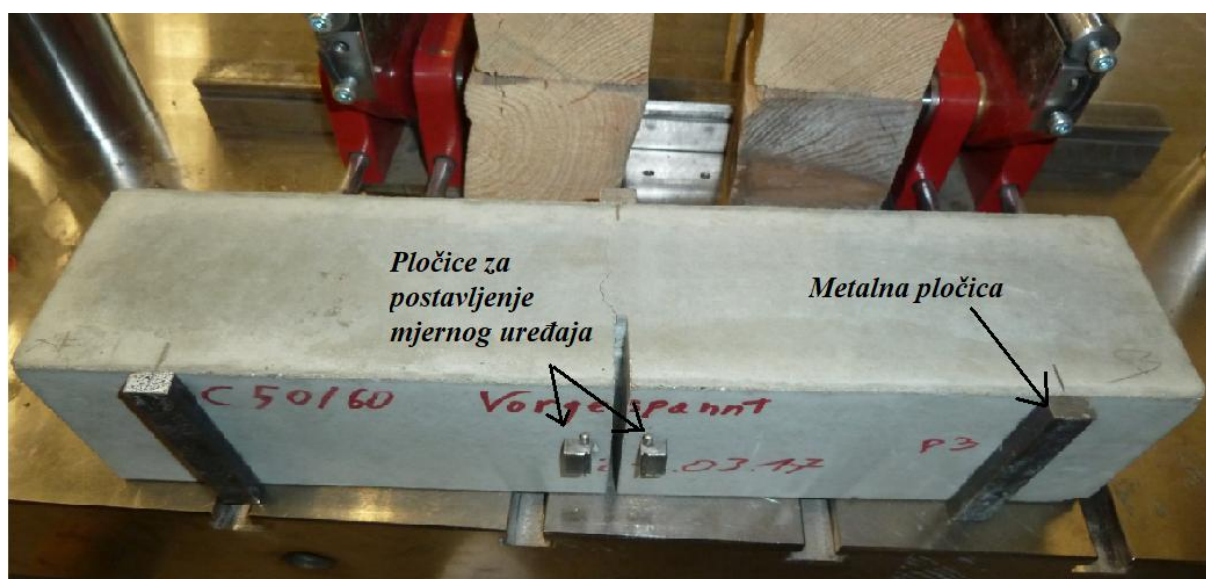
Testiraju se betonske prizme dimenzija 4000 x 100 x 100 (mm) koje se do dana testiranja čuvaju u laboratorijskim uvjetima. Prije izvođenja testa, potrebno je prizme

prethodno pripremiti kako bi odgovarale proceduri testa. Pomoću uređaja za rezanje izreže se prorez na sredini prizme u dužini od 30 mm kao što je prikazano na slici 4.32.



Slika 4.32 Rezanje uzorka

Na izrezani uzorak zalijepe se dvije pločice sa donje strane kojima je dužina jednaka širini uzorka, a njihova međusobna udaljenost iznosi 3000 mm, te jedna na sredinu gornje strane uzorka. Na njih naliježu metalni valjci koji su sastavni dio uređaja za testiranje.



Slika 4.33 Priprema uzorka prije postavljanja u uređaj za testiranje

S donje strane uzorka postave se pločice koje služe za pridržanje mjernog uređaja koji se pomoću gumica učvrsti na njih tako da je onemogućeno njegovo pomicanje. Nakon što je uzorak pripremljen i izmjerene sve dimenzije prema obrascu testa, postavlja se na uređaj za testiranje. Tada se metalne pločice nalaze na dodiru s metalnim valjcima kao što je prikazano na slici 4.34. Gornjim valjkom se nanosi sila te se bilježe njene vrijednosti i pripadni pomaci. Na računalu, koje je povezano s uređajem za testiranje, izabere se unaprijed definirani program testiranja te se unosi ulazni podatak. Unosi se brzina nalijezanja gornjeg metalnog valjka koja iznosi 0,0001 mm/s. Tijekom izvođenja testa, sila dosegne maksimalnu vrijednost

te počme padati. Nakon što znatno padne test se može ubrzati, odnosno dozvoljeno je povećati brzinu nalijevanja gornjeg metalnog valjka.

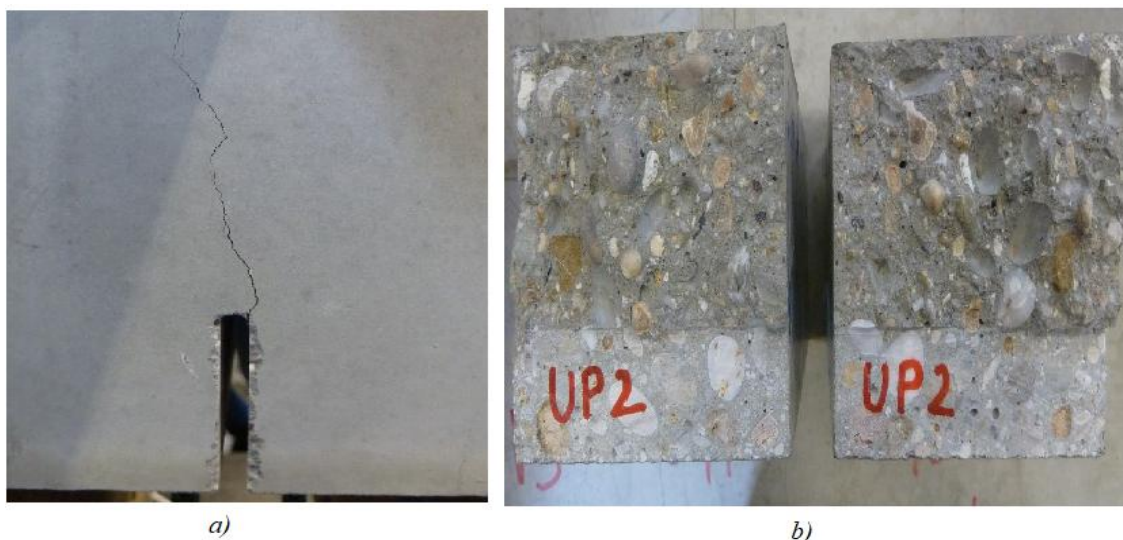


Slika 4.34 a) uređaj za testiranje; b) uzorak za vrijeme ozvođenja testa; c) mjerni uređaj (senzor)

Proces izvođenja testa traje oko jednog sata zbog sporog nanošenja opterećenja.

Za potrebe ovog ispitivanja napravljeno je 3 testa mješavine prednapetog te 3 neprednapetog betona za beton starosti 7, 28 i 56 dana, odnosno 18 testova ukupno.

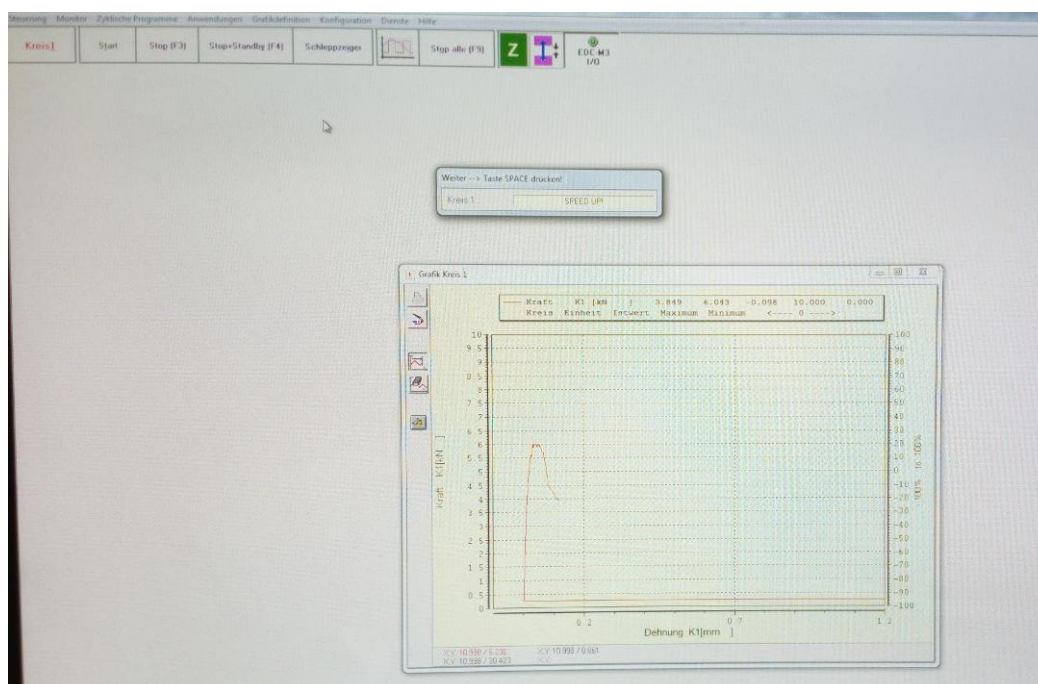
Nakon što je testiranje završeno na uzorku se može primijetiti pukotina kao što je prikazano na slici 4.35a). Ona se pruža od izrezanog dijela prema gornjoj strani uzorka. Pomicanjem uzorka iz uređaja za ispitivanje bez veće sile, ručno, se može uzorak prelomiti te se dobiju dva dijela kao što je prikazano na slici 4.35b). Bilježe se sve njihove dimenzije.



Slika 4.35 a) Pukotina na uzorku b) Prepolovljeni uzorak

4.5.3 Rezultati testa

Uređaj za testiranje bilježi silu i pripadni pomak. Zaslon uređaja je prikazan na slici 4.36.



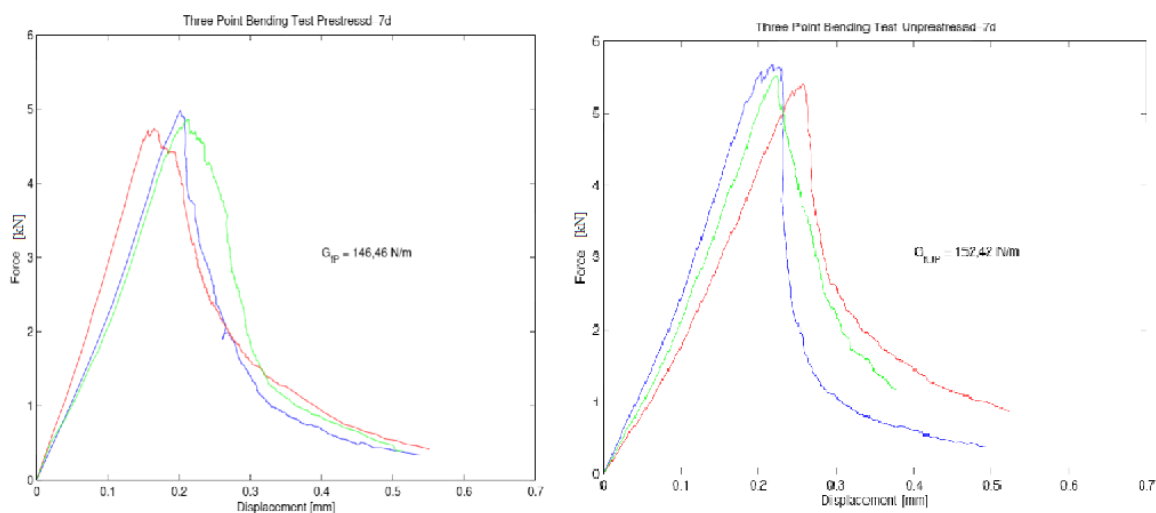
Slika 4.36 Zaslon računala

Nakon što su dobivene vrijednosti sile te pripadnog pomaka može se očitati vršnja vrijednost sile $F_{\max}$ te površina ispod krivulje predstavlja energiju sloma.

Tablica 4.6 Vrijednosti maksimalne sile i pripadnog pomaka

Starost betona	mješavina prednapetog betona			mješavina neprednapetog betona		
	Uzorak	Fmax [kN]	Pomak [mm]	Uzorak	Fmax [kN]	Pomak [mm]
7 dana	P1	4,99	0,76	UP1	5,73	0,59
7 dana	P2	4,77	0,76	UP2	5,43	0,88
7 dana	P3	4,9	0,73	UP3	5,58	0,39
28 dana	P4	6,23	0,58	UP4	6,8	0,73
28 dana	P5	6,32	1,16	UP5	6,4	0,44
28 dana	P6	6,02	0,27	UP6	6,61	0,72
56 dana	P7	6,61	0,69	UP7	4,93	0,5
56 dana	P8	6,32	0,64	UP8	6,45	0,52
56 dana	P9	5,76	0,55	UP9	7,59	0,58

U tablici 4.6 dane su vrijednosti maksimalno zabilježene sile te pripadnog pomaka za mješavine koje su korištene za izradu uzoraka prednapetog te neprednapetog betona.



Slika 4.37 Proračun energije sloma

Za potrebe ovog rada površina ispod krivulje je izračunata pomoću računala, a energija sloma pomoću jednadžbe 3.23. Prosječne vrijednosti energije sloma za beton starosti 7, 28 i 56 dana prikazane su u tablici 4.7.

Tablica 4.7 Prikaz vrijednosti energije sloma

starost betona	$G_{\text{prednapeti beton}}$ [N/m]	$G_{\text{neprednapeti beton}}$ [N/m]
7 dana	146,46	152,42
28 dana	151,76	145,68
56 dana	162,34	159,56

Tablica 4.8 Mehanička svojstva betona visoke čvrstoće [21]

Youngov modul, E_c (GPa)	43.3
Poissonov koeficijent (pretpostavljena vrijednost), ν_c	0.18
Gustoća, ρ_c (kg/m ³)	2400
Vlačna čvrstoća, f_t (MPa)	6.3
Tlačna čvrstoća, f_c (MPa)	127.0
Energija loma, G_F (N/m)	148

U tablici 4.8 dana su mehanička svojstva betona visoke čvrstoće koja su preuzeta iz literature [21]. Energija loma dobivena u tim ispitivanjima iznosi 148 N/m što je manja vrijednost od one dobivene u eksperimentalnom dijelu ovog rada. Za uzorke ispitane testom savijanja čiji su rezultati prikazani u tablici 4.7 potrebna je veća energija za stvoriti jedinicu površine pukotine što rezultate čini zadovoljavajućim.

5 PREGLED I OCJENA REZULTATA

5.1 Posmično naprezanje u kontaktnoj zoni užeta i betona

Kontaktna zona čelika i betona može se definirati kao posmično naprezanje između prednapetog čelika i betona koji ga okružuje. Veza omogućuje prijenos sile prednapinjanja na beton te osigurava zajedničko odupiranje betona i čelika vanjskom opterećenju. Ako se djeluje silom u određenom smjeru tada će i naprezanje biti u tom smjeru. Ukoliko veza oslabi dolazi do klizanje između čelika i betona.

Uzima se da je posmično naprezanje jednako sili u užetu podijeljenoj s površinom koja doprinosi otporu sidrenja. Zbog nedostatka informacija o stvarnoj raspodjeli naprezanja prijanjanja, prikladno bi bilo usvojiti pojednostavljenje prema kojem je naprezanje prijanjanja ravnomjerno raspoređeno duž duljine. U tom kontekstu, posmično naprezanje može se izračunati pomoću jednadžbe 5.1.

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot r \cdot \pi \cdot \frac{L}{2}} \quad [5.1]$$

gdje je:

τ – posmično naprezanje

F - granično opterećenje čupanja

r – polumjer natege

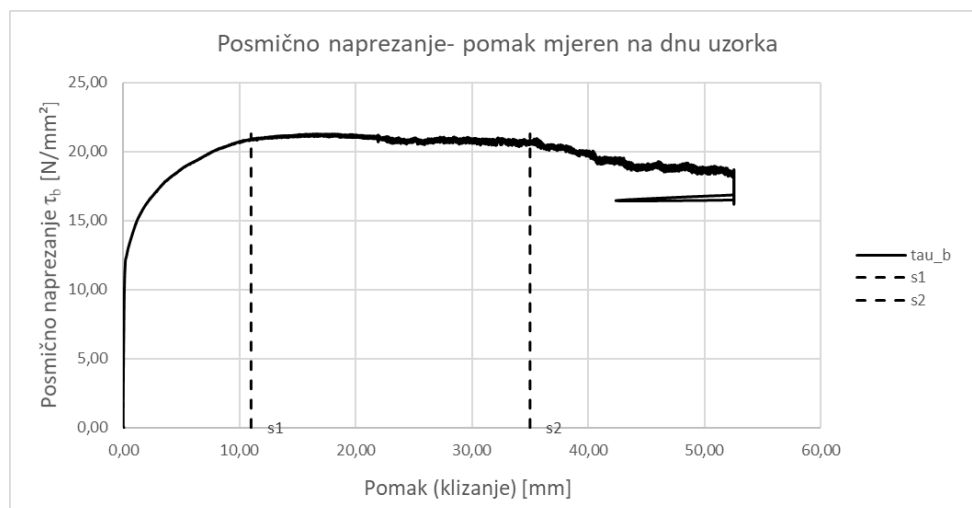
L - duljina.

Računa se maksimalna vrijednost posmičnog naprezanja pa se proračun vrši sa maksimalnom vrijednosti sile, a promatrana duljina iznosi 460 mm kao što je prikazano na slici 4.15.

Na primjer, za prednapeti uzorak P5 vrijednost posmičnog naprezanja, kojemu maksimalna vrijednost sile iznosi 167,29 kN, polumjer natege 5,44 mm, a duljina 460 mm, uvrštavajući u izraz 5.1 dobije se vrijednost posmičnog naprezanja.

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot r \cdot \pi \cdot \frac{L}{2}} = \frac{167,29 \cdot 1000}{2 \cdot 5,44 \cdot \pi \cdot \frac{460}{2}} = 21,28 \text{ N/mm}^2 \quad [5.2]$$

Grafički prikaz odnosa izračunatog posmičnog naprezanja te pomaka mjerenog na dnu uzorka prikazan je na slici 5.1.



Slika 5.1 Odnos posmičnog naprezanja te pomaka mjerenog na dnu uzorka P5

Vrijednosti posmičnog naprezanja za sve uzorke prikazane su u tablici 5.1.

Tablica 5.1 Vrijednosti maksimalnog posmičnog naprezanja, lijevo- prednapeti beton; desno- neprednapeti beton

Uzorak	Starost betona	Posmično naprezanje [N/mm ²]
P1	7 dana	20,32
P2	7 dana	21,49
P3	7 dana	20,49
P4	7 dana	21,80
P5	7 dana	21,28
Srednja vrijednost		21,08
P6	28 dana	21,78
P7	28 dana	22,01
P8	28 dana	21,65
Srednja vrijednost		21,81
P9	56 dana	22,29
P10	56 dana	21,99
P11	56 dana	21,73
P12	56 dana	22,08
P13	56 dana	22,04
Srednja vrijednost		22,03

Uzorak	Starost betona	Posmično naprezanje [N/mm ²]
UP1	7 dana	21,52
UP2	7 dana	21,99
UP3	7 dana	21,85
UP4	7 dana	21,69
UP5	7 dana	20,38
Srednja vrijednost		21,48
UP6	28 dana	22,90
UP7	28 dana	23,19
UP8	28 dana	23,21
UP9	28 dana	22,81
UP10	28 dana	22,89
Srednja vrijednost		23,00
UP11	56 dana	23,01
UP12	56 dana	22,86
UP13	56 dana	22,66
Srednja vrijednost		22,84

5.2 Analitičko istraživanje

Analitičko istraživanje je provedeno kako bi se pomoću teorijske jednadžbe 3.15 opisali eksperimentalno dobiveni rezultati.

5.2.1 Proračun koeficijenta α

Analitičko istraživanje pomoću STSB vrijednosti napravljeno je po uzoru na analitičko istraživanje opisano u poglavlju 3.1.3. *Analitičko istraživanje*.

Prema jednadžbi 3.3 izračunat je eksponencijalni koeficijent α koji predstavlja oblik dijagrama.

Za uzorak prednapetog betona P5 α iznosi:

$$\alpha = \frac{\ln \frac{F_{0,25}}{F_{2,5}}}{\ln 0,1} = \frac{\ln \frac{96,83}{131,83}}{\ln 0,1} = 0,13 \quad [5.3]$$

gdje su $F_{0,25}$ te $F_{2,5}$ vrijednosti sile za klizanje od 0,25 te 2,5 mm.

Prema poglavlju 3.2.3 *Modeliranje veze posmičnog naprezanja i deformacije* definiraju se s_1 i s_2 . s_1 je vrijednost prokliznuća gdje posmično naprezanje postaje konstantno

na dijagramu te za uzorak P5 iznosi 11 mm, a s_2 je vrijednost gdje dolazi do pada posmičnog naprežanja te iznosi 35 mm (slika 5.1).

Ako se računa koeficijent α za vrijednost pomaka s_1 te $1/10 s_1$ za uzorak prednapetog betona P5, po uzoru na jednadžbu 3.2, dobije se vrijednost $\alpha=0,15$.

$$\alpha = \frac{\ln \frac{\tau_{s_{1/10}}}{\tau_{s_1}}}{\ln \frac{s_{1/10}}{s_1}} = \frac{\ln \frac{14,82}{20,91}}{\ln \frac{1,1}{11}} = 0,15 \quad [5.4]$$

Proračun je proveden za sve uzorke prednapetog i neprednapetog betona na oba načina, a vrijednosti su prikazane u tablici 5.2.

α je parametar podešavanja krivulje koji ne smije biti veći od 1, a ukoliko proračun nije moguć za čelične šipke se koristi $\alpha = 0,4$. [18]

Tablica 5.2 Vrijednosti koeficijenta α

7d Pull-out Tests		Method based on Zilch			Method based on STSB according to DANG et al., 2014		
Prestressed Specimen	s_1 [mm]	$\tau_{s_{1/10}}$ [N/mm ²]	τ_{s_1} [N/mm ²]	α_{Zilch}	$\tau_{0,25}$ [N/mm ²]	$\tau_{2,5}$ [N/mm ²]	α_{STSB}
P1	-	-	-	-	-	-	-
P2	13	15,08	20,96	0,14	11,17	16,85	0,18
P3	11	14,70	20,18	0,14	10,47	17,29	0,22
P4	11	16,19	21,32	0,12	13,68	17,98	0,12
P5	11	14,82	20,91	0,15	12,32	16,77	0,13
Unprestressed Specimen							
UP1	18	12,18	21,06	0,24	8,07	13,18	0,21
UP2	18	12,62	21,25	0,23	8,46	13,55	0,20
UP3	13	12,95	21,04	0,21	9,62	15,00	0,19
UP4	18	12,36	21,16	0,23	8,14	13,23	0,21
UP5	22	11,80	19,87	0,23	8,07	12,19	0,18
28d Pull-out Tests		Method based on Zilch			Method based on STSB according to DANG et al., 2014		
Prestressed Specimen	s_1 [mm]	$\tau_{s_{1/10}}$ [N/mm ²]	τ_{s_1} [N/mm ²]	α_{Zilch}	$\tau_{0,25}$ [N/mm ²]	$\tau_{2,5}$ [N/mm ²]	α_{STSB}
P6	16	11,54	20,38	0,25	6,14	12,44	0,31
P7	15	15,78	21,41	0,13	12,82	17,27	0,13
P8	9	13,61	21,44	0,20	9,36	17,08	0,26
Unprestressed Specimen							
UP6	17	13,77	22,35	0,21	9,61	15,04	0,21
UP7	16	13,00	22,73	0,24	5,58	15,35	0,44
UP8	13	11,56	22,22	0,28	7,78	14,87	0,28
UP9	15	11,62	22,07	0,28	8,07	13,43	0,22
UP10	14	13,10	22,30	0,23	9,00	15,51	0,24
56d Pull-out Tests		Method based on Zilch			Method based on STSB according to DANG et al., 2014		
Prestressed Specimen	s_1 [mm]	$\tau_{s_{1/10}}$ [N/mm ²]	τ_{s_1} [N/mm ²]	α_{Zilch}	$\tau_{0,25}$ [N/mm ²]	$\tau_{2,5}$ [N/mm ²]	α_{STSB}
P9	11	14,54	21,39	0,17	11,54	17,65	0,18
P10	9	11,40	20,72	0,26	9,01	16,17	0,25
P11	9	12,58	21,13	0,23	8,98	17,29	0,28
P12	11	11,29	20,11	0,25	8,58	15,89	0,27
P13	10	13,73	20,42	0,17	11,50	17,94	0,19
Unprestressed Specimen							
UP11	8	7,79	21,83	0,45	5,02	14,88	0,47
UP12	8	10,14	20,06	0,30	4,56	15,50	0,53
UP13	10	10,54	21,24	0,30	5,54	14,18	0,41

5.2.2 Analitički oblik dijagrama

Nakon što je poznata vrijednost koeficijenta α definira se analitički oblik dijagrama. Za proizvoljne vrijednosti klizanja s dobije se posmično naprezanje τ pomoću jednadžbe 3.15.

Za uzorak prednapetog betona P5 poznato je:

$$\alpha=0,15,$$

$$s_1=11 \text{ mm},$$

$$s_2= 35 \text{ mm},$$

$$\tau_f=15 \text{ N/mm}^2.$$

Date vrijednosti se uvrste u jednadžbu 3.15 te se izračunaju analitičke vrijednosti posmičnog naprezanja prikazane u tablici 5.3.

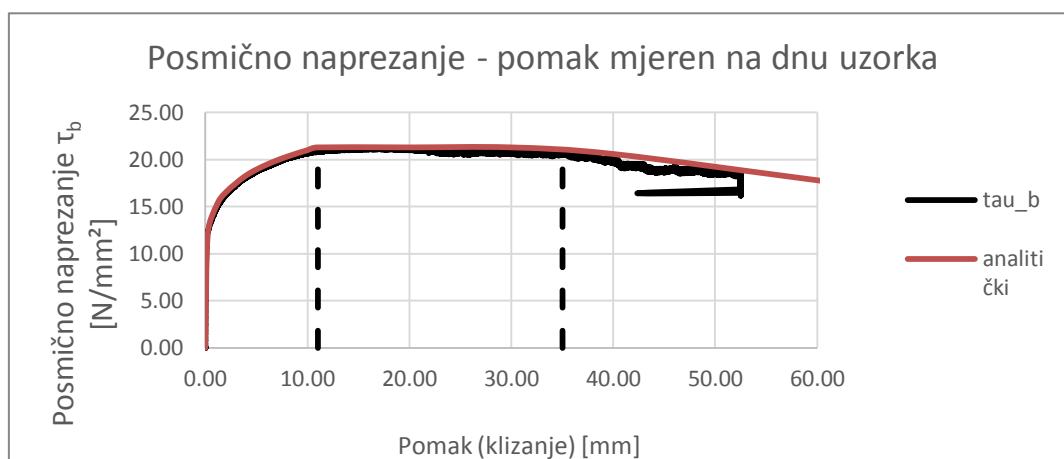
Tablica 5.3 Analitički dobiveno posmično naprezanje za uzorak P5

$s \text{ [mm]}$	$\tau_b \text{ [N/mm}^2\text{]}$
0,00	0,00
0,25	12,08
1,10	15,08
2,00	16,49
4,00	18,29
6,00	19,43
8,00	20,29
10,00	20,97
11,00	21,28
20,00	21,28
30,00	21,28
40,00	20,58
60,00	17,79

5.3 Ocjena rezultata

Ocjena rezultata napravljena je usporedbom analitički te eksperimentalno dobivene krivulje. Odstupanje je prikazano u postotku.

Kao i do sada, prikazat će se rezultati uzorka P5.



Slika 5.2 Prikaz eksperimentalnih te analitičkih rezultata za uzorak prednapetog betona P5

Method based on Zilch				Method based on STSB according to DANG et al., 2014								
	$f_{s,1/0}$			$f_{s,1}$			$f_{0,25}$			$f_{s,50}$		
7d Pull-out Tests	Experimental	Analytical	Percent error	Experimental	Analytical	Percent error	Experimental	Analytical	Percent error	Experimental	Analytical	Percent error
Prestressed Specimen	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	%
P1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2	15.08	15.46	2.55	20.96	21.49	2.55	11.17	12.17	8.99	16.85	16.44	2.46
P3	14.70	14.93	1.55	20.18	20.49	1.55	10.47	12.17	16.22	17.29	16.21	6.66
P4	16.19	16.56	2.32	21.32	21.80	2.26	13.68	13.88	1.43	17.98	17.79	1.08
P5	14.82	15.08	1.75	20.91	21.28	1.75	12.32	12.08	1.94	16.77	16.49	1.70
Unprestressed Specimen												
UP1	12.18	12.45	2.17	21.06	21.52	2.17	8.07	7.78	3.69	13.18	13.46	2.10
UP2	12.62	13.06	3.49	21.25	21.99	3.49	8.46	8.36	1.24	13.55	14.07	3.81
UP3	12.95	13.45	3.83	21.04	21.85	3.83	9.62	9.50	1.23	15.00	15.44	2.93
UP4	12.36	12.67	2.47	21.16	21.69	2.47	8.14	7.99	1.88	13.23	13.68	3.38
UP5	11.80	12.10	2.54	19.87	20.38	2.54	8.07	8.54	5.84	12.19	12.46	2.17
28d Pull-out Tests												
	$f_{s,1/0}$			$f_{s,1}$			$f_{0,25}$			$f_{s,50}$		
Prestressed Specimen	Experimental	Analytical	Percent error	Experimental	Analytical	Percent error	Experimental	Analytical	Percent error	Experimental	Analytical	Percent error
P6	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	%
P7	11.54	11.32	1.94	20.38	21.11	3.59	6.14	6.22	1.30	12.44	12.89	3.62
P7	15.78	16.02	1.49	21.41	22.01	2.79	12.82	12.21	5.05	17.27	16.47	4.91
P8	13.61	14.31	5.09	21.44	21.65	1.01	9.36	9.59	2.44	17.08	16.52	3.43
Unprestressed Specimen												
UP6	13.77	14.11	2.46	22.35	22.90	2.46	9.61	9.43	1.98	15.04	15.30	1.73
UP7	13.00	14.63	12.55	22.73	23.19	2.01	5.58	10.09	80.73	15.35	16.00	4.18
UP8	11.56	12.07	4.47	22.22	23.21	4.47	7.78	7.56	2.87	14.87	14.54	2.29
UP9	11.62	12.01	3.34	22.07	22.81	3.34	8.07	8.45	4.73	13.43	13.85	3.10
UP10	13.10	13.45	2.66	22.30	22.89	2.66	9.00	9.15	1.69	15.51	15.87	2.34
56d Pull-out Tests												
	$f_{s,1/0}$			$f_{s,1}$			$f_{0,25}$			$f_{s,50}$		
Prestressed Specimen	Experimental	Analytical	Percent error	Experimental	Analytical	Percent error	Experimental	Analytical	Percent error	Experimental	Analytical	Percent error
P9	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	%
P9	14.54	15.15	4.19	21.39	21.94	2.54	11.54	11.82	2.43	17.65	17.39	1.50
P10	11.40	11.89	4.33	20.72	20.98	1.24	9.01	8.94	0.77	16.17	16.26	0.57
P11	12.58	12.94	2.86	21.13	21.73	2.86	8.98	9.06	0.89	17.29	16.73	3.35
P12	11.29	11.45	1.45	20.11	20.66	2.71	8.58	8.68	1.17	15.89	16.49	3.76
P13	13.73	14.11	2.74	20.42	21.45	5.05	11.50	11.99	4.26	17.94	18.46	2.93
Unprestressed Specimen												
UP11	7.79	8.21	5.41	21.83	22.09	1.20	5.02	4.88	2.87	14.88	14.45	3.01
UP12	10.14	10.55	4.03	20.06	20.98	4.57	4.56	4.72	3.47	15.50	16.02	3.33
UP13	10.54	11.05	4.82	21.24	22.10	4.06	5.54	5.67	2.36	14.18	14.87	4.82

Slika 5.3 Odnos rezultata dobivenih analitički te eksperimentalno

Napomena: Za uzorak betona UP7 dobivena je pogreška od 12,55 posto po metodi koja se temelji na Zlichu te pogreška od 80,73 posto po metodi koja se temelji na STSB vrijednostima tako da se rezultati tog uzorka ne smatraju mjerodavnim.

Maksimalno dobivena pogreška kod ostalih testova iznosi oko 5 % dok je kod testova iz poglavlja 3. *Dosadašnja ispitivanja* pogreška između analitičkih te eksperimentalnih rezultata 2 %.

Prema jednadžbama 3.21 te 3.22 izračuna se koeficijent C i eksponent n te se uvrsti u jednadžbu 3.20. Time se dobije iznos prokliznuća po duljini uzorka.

Vrijednosti koje se uvrste u jednadžbe su prikazane u tablici 5.4.

Tablica 5.4 Vrijednosti posmičnog naprezanja, prokliznuća s_1 , koeficijenta α , promjera, opsega, modula elastičnosti čelika i betona te površina čelika i betona

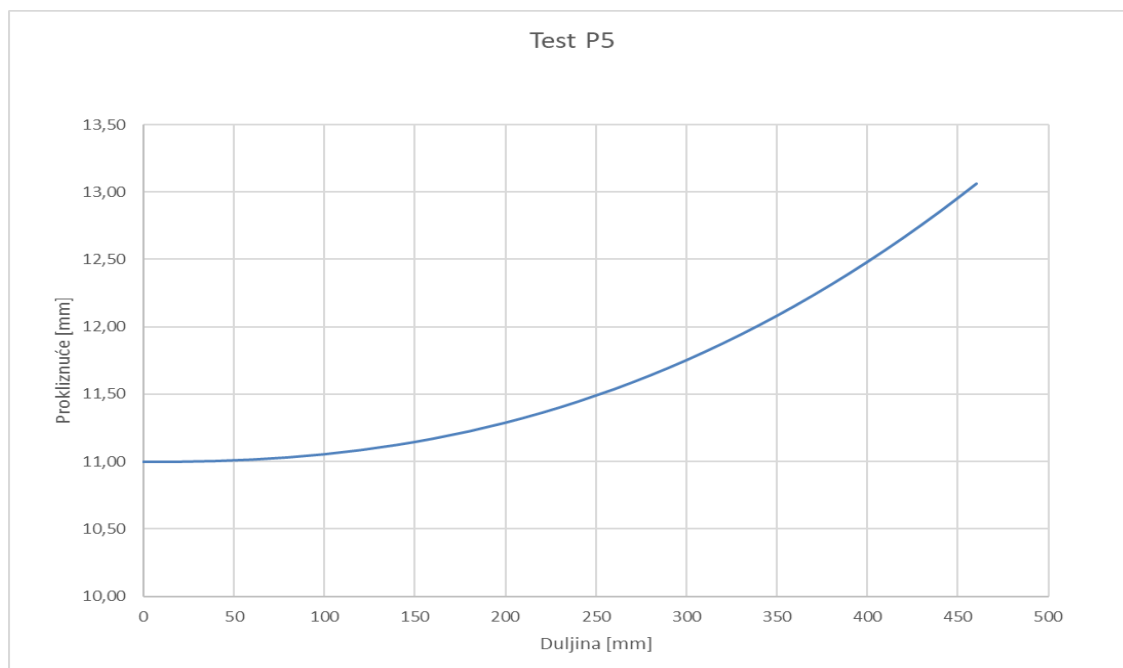
τ [N/mm ²]	s_1 [mm]	α	r [mm]	U_s [mm]	E_s [N/mm ²]	A_s [mm ²]	E_c [N/mm ²]	A_c [mm ²]
20,91	11	0,15	5,44	34,18	195000	93	43000	40000

Za uzorak prednapetog betona P5 proračun koeficijenta C je prikazan jednadžbom 5.5.

$$C = \left[\frac{\tau_{b,\max}}{s_1^\alpha} \cdot \left(\frac{U_s}{E_s A_s} + \frac{U_s}{E_c A_c} \right) \cdot \frac{(1-\alpha)^2}{2+2\alpha} \right]^{1/(1-\alpha)} \quad [5.5]$$

$$= \left[\frac{20,91}{11^{0,15}} \cdot \left(\frac{34,18}{195000 \cdot 93} + \frac{34,18}{43000 \cdot 40000} \right) \cdot \frac{(1-0,15)^2}{2+2 \cdot 0,15} \right]^{1/(1-0,15)} = 1,129 \cdot 10^{-6}$$

Nakon što se uvrsti u jednadžbu 3.20 za proizvoljne x u rasponu duljine uzorka koja iznosi od 0 do 460 dobije se vrijednost prokliznuća po duljini.



Slika 5.4 Raspodjela klizanja po duljini

Na slici 5.4 prikazano je prokliznuće po promatranoj duljini od 460 mm. Pretpostavlja se da je početno klizanje jednako vrijednosti s_1 , a raste od slobodnog prema opterećenom kraju, odnosno opterećeni kraj je više osjetljiv na pomak nego slobodan kraj.

6 ZAKLJUČAK

Prednapeti beton je vrsta betona kod kojeg se armaturom svjesno izazivaju unutarnje sile takve veličine i raspodjele pri kojima se naprezanje uslijed vanjskog djelovanja djelomično ili potpuno eliminira. U armiranobetonskim konstrukcijama armatura samo prenosi vlačna naprezanja od vanjskog opterećenja za razliku od prednapetog betona gdje prednost leži u mogućnosti aktivnog mijenjanja raspodjele unutarnjih sila u konstrukciji. Samoozbijajući beton zbog svog sastava postiže visoke konačne čvrstoće što u kombinaciji sa prednapinjanjem daje kvalitetan sustav koji se može upotrijebiti kod građevina s elementima velikih raspona kao što su mostovi, zgrade, montažne građevine, hale, krovne konstrukcije, silosi, bunker, te za potrebe sanacije postojećih građevina.

U prednapetom betonu čelik i beton zajedno se odupiru vanjskim opterećenjima, a važan dio za analiziranje je ponašanje kontaktne zone. U ovom radu opisana su dosadašnja ispitivanja ponašanja kontaktne zone te je na temelju njih proveden eksperimentalni dio. Rezultati su ocijenjeni analitičkom formulom.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada proveden je pull-out test s ciljem dobivanja maksimalne sile izvlačenja užeta te pripadnog relativnog pomaka između betona i užeta. Uže je ugrađeno u beton te je opterećeno na jednom kraju silom, dok je drugi kraj slobodan. Mjerio se odnos između vlačne sile te pomaka užeta. Sila se povećavala dok nije došlo do pucanja veze. Pomoću zabilježene sile izračunato je normalno i posmično naprezanje. Za beton starosti 28 dana prosječna vrijednost sile iznosi 180 kN, a pripadno normalno naprezanje 1900 N/mm^2 . Izračunato je posmično naprezanje koje iznosi 22 N/mm^2 . Uzorci ispitani pull – out testom u ovom radu su efektivne duljine 460 mm, a oni opisani u poglavlju 3. *Dosadašnja ispitivanja* 406 mm. Testirani uzorci podnose veće sile čupanja pa se rezultati smatraju zadovoljavajući. Na primjer, kod uzoraka iz poglavlja 3.1 zabilježena sila iznosila je 102,3 kN dok se vrijednosti sile dobivenih pull – out testovima u eksperimentalnom dijelu ovog rada kreću oko 170 kN. Veća vrijednost sile potrebne za čupanje užeta iz betona osigurava bolji spoj te prijanjanje betona i čeličnog užeta.

U ovom radu vrijednosti posmičnih naprezanja dobiveni eksperimentalno su ocijenjeni pomoću teorijske formule 3.15. Maksimalno odstupanje eksperimentalno dobivenih rezultata te onih dobivenih pomoću formule iznosi 5 %. Koeficijent α korišten u jednadžbi 3.15 izračunat je na način opisan u poglavlju 3. *Dosadašnja ispitivanja*, pomoću literature prema

Zlichu te prema STSB vrijednostima. Prosječna vrijednost koeficijenta α iznosi 0,14. Na oba načina rezultati su približno jednaki te se prihvaćaju.

Prikaz odnosa posmičnog naprezanja i klizanja po efektivnoj dužini uzorka dobiven u ovom radu prikazuje kako odnos nije linearan već raste od slobodnog prema opterećenom kraju užeta.

Ispitana je tlačna čvrstoća samozbijajućeg betona SCC50/60 korištenog u ovom radu te za beton starosti 28 dana ona iznosi 80 Mpa.

Također, proveden je test savijanja pomoću kojeg je izračunata energija sloma koja je glavni parametar za proučavanje nastanka oštećenja te mehanizma prijeloma. Testiranja su rađena na uzorku u koji je ugrađen samozbijajući beton. Uzorak se postavio u položaj grede s jednakim propustima na obe strane te je centrično opterećen silom. Rezultati ovise o svojstvima samozbijajućeg betona, a energija sloma je definirana kao energija potrebna za stvoriti jednu jedinicu površine pukotine. Dobivene su vrijednosti od približno 150 N/m za beton starosti 28 dana što je veća vrijednost od one dobivene u prijašnjim ispitivanjima prema literaturi [21].

Razumijevanje oblika i vrijednosti posmičnog naprezanja su temelji za bolji napredak određivanja dužine sidrenja prednapetog čelika.

7 LITERATURA

- [1] Mandić Ivanković, A.: Trajnost konstrukcija II – Modeliranje AB konstrukcija – predavanja, Sveučilište u Zagrebu - Građevinski fakultet, Zagreb, 2015.
- [2] Alagušić M.; Lavrin F.; *Eksperimentalno određivanje reoloških svojstava samozbijajućeg betona*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2010.
- [3] Gukov, I.: *Prednapeti beton* - predavanja, Sveučilište u Zagrebu - Građevinski fakultet, Zagreb, 2007.
- [4] Meštrović, D.: *Prednapeti beton – teorija*, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka, 2017.
- [5] <https://structurae.net/structures/plougastel-bridge>
- [6] Matešan, D.: *Prednapete konstrukcije – prezentacija*, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2015.
- [7] Harapin, A; Radnić J.: Osnove betonskih konstrukcija – interna skripta, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2015.
- [8] Mekjavić, I.: *Prednapeti beton – teorija i praksa*, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Zagreb, 2008.
- [9] <http://www.betoni.hr/Beton/Detalj/ArtMID/864/ArticleID/12/Samozbijaju%C4%87i-beton>
- [10] <http://www.lever.rs/usluge.html?url=http://www.lever.rs/UslugeFiles/TTM-oprema.html>
- [11] <http://documents.tips/documents/prednapeti-beton.html>
- [12] Dang, C. N; Murray, C.D; Floyd, R.W ; Hale, W.M; Martí-Vargas, J.R.: *Analysis of bond stress distribution for prestressing strand by Standard Test for Strand Bond*, Engineering Structures 72, 152–159, 2014.
- [13] Zilch, K.; Zehetmaier, G: *Bemessung im konstruktiven Betonbau, Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2)*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006, 2010.
- [14] RILEM *Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials - Determination of fracture parameters (K_{ic}^s and $CTOD_c$) of plain concrete using three-point*

bends tests, International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Construction, Taylor & Francis, Vol. 23, No 138, December 1990.

[15] <http://www.oberndorfer.at/>

[16] <http://www.kummetat.de/download/spannstahlritze16l.pdf>

[17] Zeman, O.: *Pruefstelle Broschuere*, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Beč, 2015.

[18] Kiarash Koushfar; Ahmad Baharuddin Abd. Rahman; Yusof Ahmad: *Prionljivost armaturne šipke u spoju od polimera armiranog vlaknima*, GRAĐEVINAR 4/2014, DOI: 10.14256/JCE.913.2013.

[19] <http://gfosweb.gfos.hr/portal/images/stories/studij/sveucilisni-diplomski/ispitivanje-konstrukcija/lvdt.pdf>

[20] Kozłowska, M.; Kadelab, M.; Kukielkab, A: *Fracture energy of foamed concrete based on three-point bending test on notched beams*, 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering (MATBUD'2015), Procedia Engineering 108 (2015), str. 349 – 354.

[21] Zhang, X.X., Ruiz, G., Yu, R.C., Tarifa, M., “Fracture behavior of high-strength concrete at a wide range of loading rates”, *Int J Impact Engng*, Vol.36, No.10-11, 2009, str. 1204-1209.