Razvoj i primjena prednaprezanja u betonskim konstrukcijama

Hrupek, Melani

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:129819

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište Sjever

Završni rad br. 346/GR/2018

Razvoj i primjena prednaprezanja u betonskim konstrukcijama

Melani Hrupek, 0973/336

Varaždin, 15. listopada 2018. godine

Sveučilište Sjever

Odjel za Graditeljstvo

Završni rad br. 346/GR/2018

Razvoj i primjena prednaprezanja u betonskim konstrukcijama

Student

Melani Hrupek, 0973/336

Mentor

Predrag Presečki, dipl. ing. pred.

Varaždin, 15. listopada 2018. godine

Zahvala

Ovim putem želim zahvaliti svome mentoru, dipl. ing. pred. Predragu Presečkom na pribavljenoj stručnoj literaturi i informacijama za izradu ovog završnog rada, trudu, strpljenju, savjetima i vremenu koje je uložio kako bi mogla kvalitetno i uredno napisati završni rad. Posebno hvala svim profesorima i predavačima koji su mi tijekom studiranja prenijeli puno znanja i bili na raspolaganju uvijek kada je bilo potrebno, a ujedno i mojoj obitelji, te prijateljima i dečku Marku na velikoj podršci tijekom studiranja i zajedničkom svaldavanju studentskih obaveza.

Predgovor

U svom radu radu iznosit ću podatke kako se i na koji način razvijala sama tehnika prednaprezanja, te njegova primjena u betonskim konstrukcijama. U početku ovoga rada obradila sam kratki povijesni osvrt, općenito o tome što predstavlja prednapregnuti beton, koje su prednosti, a koje mane prednapregnutog betona, te područje primjene i načela objašnjenja prednaprezanja. Nakon toga, slijedi detaljniji opis gradiva koja se koriste u svrhu prednaprezanja. Ukratko sam posvetila pažnju sredstvima za prednaprezanje kao što su to preše, oprema za injektiranje, naprave za uvlačenje užadi i hidrauličke pumpe. Detaljnije sam obradila dvije osnovne metode prednaprezanja, prethodno ili adhezijsko i naknadno ili kablovsko, a ujedno i tehnologije koje se koriste kod naknadnog prednaprezanja, unbonded i bonded tehnologija. Također, navela sam i opisala primjere prednapregnutih betonskih konstrukcija u Republici Hrvatskoj, a kao završetak svog završnog rada, za bolje razumijevanje tehnike prednaprezanja, uzela sam praktični primjer prednaprezanja betonske grede.

Sažetak

Svrha prednaprezanja je proizvesti djelovanje koje se trajno suprotstavlja nepovoljnim djelovanjima i pojavama u tijeku vijeka trajanja sklopa ili naprave. Bit ove zamisli leži u tome da se u dijelu presjeka u kojem će se pojaviti velika vlačna naprezanja, ona smanje ili se pretvore u tlačna. Na taj način istodobno se sprječava, potpuno ili djelomice, raspucavanje betona u vlačnom pojasu betonskog elementa, te zahvaljujući tome bitno se povećava krutost presjeka. Odabirom zakrivljenog vođenja kabela, javljaju se skretne sile koje povoljnim odabirom oblika vođenja kabela djeluju nasuprot vanjskom vertikalnom opterećenju. Kabeli ne moraju nužno biti smješteni u presjeku konstrukcijskog elementa, što znači da se oni mogu postaviti i izvan betonskog presjeka kao kod mostova ili unutar ćelije sandučastog poprečnog presjeka. Trenutačno je za kabele najrašireniji u primjeni čelik visoke čvrstoće, no istražuju se i razvijaju obećavajući materijali za kabele od aramida i alkalno otpornog stakla.

Ključne riječi: Eugene Freyssinet, prethodno ili adhezijsko prednaprezanje, naknadno ili kabelsko prednaprezanje, „unbonded“ i „bonded“ tehnologija



Slika 1. Sunshine Skyway most u Floridi



Slika 2. Kabeli izvan betonskog presjeka

Abstract

The purpose of prestressing is to produce effects that are permanently opposed to adverse effects and occurrences during the duration of sklop or the device. The essence of this idea lies in the fact that in the part of the cross-section in which will appear a large tensile stress, they reduce or turn in compressive stresses pressure. In this way, simultaneously preventing, in whole or in part, the bursting of concrete in tensile belt of the concrete element, and thanks to that substantially increases the rigidity of cross-section. Selecting a curved cable guidance, occur the switch forces that makes acting opposite the outer vertical load. The cables do not necessarily have to be placed in the section of the structural member, means that they can be placed out of the concrete cross-section or within the cell cross-section bridge. Currently, the most widespread of the cables in the application of high strength steel, but are being explored and developed promising materials for cables of aramid and alkali-resistant glass.

Keywords: Eugene Freyssinet, previously or adhesion prestressing, subsequently or cable prestressing, „unbonded“ and „bonded“ tehnology

Popis korištenih kratica

AB	Armirani beton
FIP	Internationale Fédération de la Précontrainte (franc. međunarodna federacija za prednaprezanje)
CEB	Comité européen du béton (franc. Europski odbor za beton)
CEB-FIP	Committee for Drafting of Reccomendations for Prestressed Concrete (engl. odbor za preporuke o prednapregnutom betonu)
FIB	Fédération internationale du béton (franc. međunarodna federacija za beton)
C 25/30	Razred čvrstoće betona
B-II	Beton druge kategorije
v/c	Vodocementni omjer
C	Cold shaping steel (engl. hladno oblikovana žica)
I	Intendet steel (engl. profilirana žica)
S	Strand (engl. uže)
H	Hot-rolled bar (engl. toplo valjana šipka)
PT	Post tensioning (engl. naknadno prednaprezanje)
tzv.	takozvani

Sadržaj

1. Uvod ……..…1
1.1. Povijesni razvoj……....1
1.2. Općenito o prednapregnutom betonu……...3
1.2.1. Prednosti i nedostaci prednapregnutih konstrukcija……..4
1.2.2. Područje primjene prednaprezanja……...….5
1.2.3. Objašnjenje načela prednaprezanja……..….5

2. Zahtjevi na gradiva ……..……..……...6
2.1. Općenito……..….6
2.1.1. Beton…….....6
2.1.2. Čelik……..…8
2.1.3. Mort za injektiranje……..…10
2.1.4. Zaštitne cijevi……..11

3. Sredstva za prednaprezanje.…….13
3.1. Sidra……...……...……..……...13
3.2. Oprema za prednaprezanje……13

4. Metode prednaprezanja…….……...15
4.1. Prethodno prednaprezanje…….……...…..15
4.2. Naknadno prednaprezanje…….……19
4.2.1. „Unbonded“ i „bonded“ tehnologija……..……....20

5. Prednapregnute konstrukcije u Republici Hrvatskoj……..…….…….22
6. Primjer gubitaka sile na prednapregnutoj gredi……...…….25
7. Zaključak……..……..28
8. Literatura……..….29

1. Uvod

1.1. Povijesni razvoj

Prednapregnuti beton najvažnija je inovacija 20. stoljeća na području betonskih konstrukcija. Ideja prednaprezanja u svrhu smanjenja raspucavanja vrlo je stara (Jackson, 1866.). Nakon toga su mnogi praktični pokušaji prednaprezanja betonskih konstrukcija propali jer je korišten normalni čelik, čije je najveće elastično produljenje otprilike jednako skraćenjima betona od skupljanja i puzanja tako da se prednaprezanje tijekom vremena potpuno izgubilo tj. iščezlo.

Prvi zabilježen patent prednapregnutog betona 1890. godine registrirao je američki inženjer iz San Francisca, Henry Jackson, izgradivši betonski nadvoj s prednapregnutim zategama. Nakon godinu dana taj nadvoj se srušio. Henry Jackson nije znao za fenomen puzanja i opuštanja mekog čelika, što je ujedno i rezultiralo "nestankom" prednaprezanja.

Tehnologiji prednaprezanja nedostajali su bolji materijali i tehničko znanje, a to je oboje imao francuski inženjer **Eugene Freyssinet** patentirajući 1928. godine prethodno prednaprezanje betona čelikom velike čvrstoće. Freyssinet je shvatio važnost velike čvrstoće betona i čelika te potrebe postizanja što veće sile prednaprezanja. Uočivši pojavu puzanja shvatio je da tek vrlo veliko prednaprezanje može spriječiti njegov gubitak prouzročen puzanjem. Pont de Boutiron jedan je od tri jednaka mosta koje je izgradio Freyssinet preko rijeke Allier, pored mjesta Vichy u Francuskoj, sredinom 20-tih godina 20. stoljeća. To je rešetkasti armiranobetonski lučni most s tri raspona. Na mostovima Freyssinet je prvi u povijesti primijenio hidraulične preše u sredini luka, aktivirajući lučnu silu prednaprezanjem, te uklonivši svaku opasnost odvojio lučnu skelu od mosta.

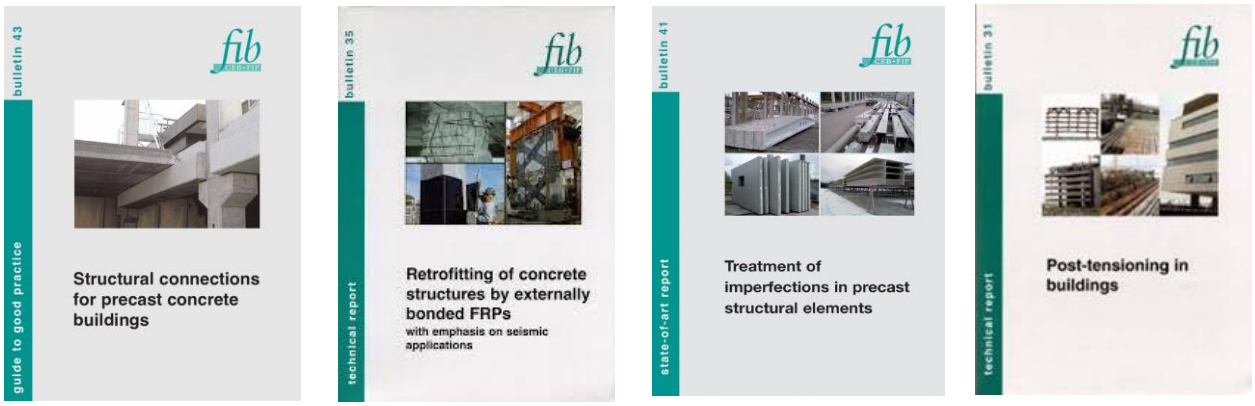


Slika 1.1 Most Pont de Boutiron na rijeci Allier

U prijašnjim pokušajima prednaprezanja koristila se armatura s puno manjom maksimalnom deformacijom, što je zbog posljedica skupljanja i puzanja betona rezultiralo gubitkom efekta prednaprezanja od oko 60%. Kasnijom upotrebom kvalitetnije čelika taj gubitak smanjen je na samo 15-20%. Nakon Drugog svjetskog rata prednapregnuti je beton doživio munjevit razvoj, dijelom i zato što je trebalo obnoviti i sagraditi velik broj mostova.

Još neki od važnijih datuma u povijesti razboja prednapregnutih betonskih konstrukcija:

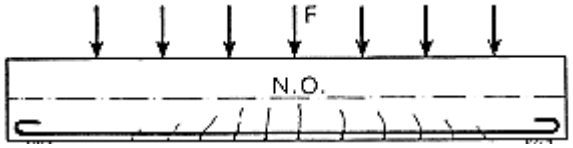
1888. W. Dörhing izlaže načela prednaprezanja betona, neuspjeh
1890. H. Jackson, San Francisco, gradi betonske nadvoje s prednapregnutim zategama, neuspjeh
1928. Eugene Freyssinet patentira prethodno prednaprezanje betona čelikom velike čvrstoće
1930. Vianini radi centrifugalni beton omotan prednapregnutom žicom
1934. E. Freyssinet sanira Le Havre shipping terminal, uspjeh
1937. prvi cestovni mostovi od prednapregnutog betona
1940. prednapregnuti željeznički pragovi
1943. Mörsch, prva knjiga o prednapregnutom betonu
1944. Magnel, Bruxelles, prvi željeznički most od prednapregnutog betona
1944. Rösch, München, prednapregnuti rešetkasti nosač
1950. Pariz, prvi međunarodni kongres o prednapregnutom betonu
1952. Osnovana Međunarodna federacija za prednaprezanje (FIP)
1953. Osnovan Europski odbor za beton (CEB)
1955. SAD, prve betonske prednapregnute stropne ploče
1962. Zajedničkim incijativom FIP-a i CEB-a osnovan Zajednički CEB-FIP odbor za preporuke o prednapregnutom betonu
1976. CEB mijenja ime u Euro-međunarodni komitet za beton
1997. Udruživanjem CEB i FIP nastaje organizacija **FIB** .



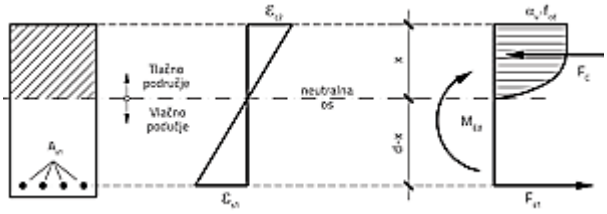
Slika 1.2 Zbirke knjiga organizacije FIB

1.2. Općenito o prednapregnutom betonu

Beton je građevinski materijal koji ima veliku tlačnu, ali malu vlačnu čvrstoću. Vlačna čvrstoća iznosi otprilike 1/10 tlačne čvrstoće. U betonu se javljaju naprezanja koja su posljedica temperaturne razlike i njegovog sakupljanja. Takva naprezanja mogu brzo dostići njegovu vlačnu čvrstoću, što ima za posljedicu pojave pukotina i prije nego se konstrukcija optereti. Naprezanja od posljedice vanjskog opterećenja mogu još više ubrzati i proširiti raspucavanje vlačnog područja.

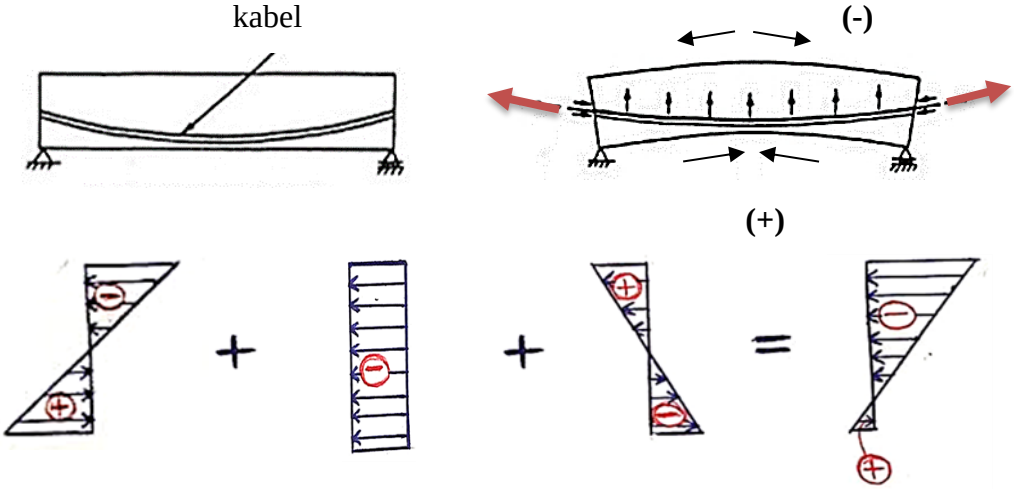


Slika 1.3 Položaj rezultanti tlačnih i vlačnih naprezanja



Slika 1.4 Dijagrami normalnih naprezanja u betonskoj gredi

Zbog pukotina u betonu kao glavnog nedostatka uporabe armiranog betona, graditelji su pomišljali na to, da se istezanjem armature u betonu izazovu naprezanja tlaka, tj. da se beton prednapregne. Osnovna ideja prednaprezanja sastojala se u tome da se na umjetni način, prije vanjskog djelovanja, u beton unese takvo stanje naprezanja kako bi se sva naprezanja za uporabno opterećenje mogla preuzeti sudjelovanjem cijelog betonskog presjeka. Pri tome su vlačna naprezanja betona potpuno isključena, ili su dopuštena, ali u vrlo malim vrijednostima. Na osnovi te ideje razvilo se puno prednaprezanje kada se isključuju naprezanja vlaka i ograničeno prednaprezanje kada se dopuštaju vlačna naprezanja.

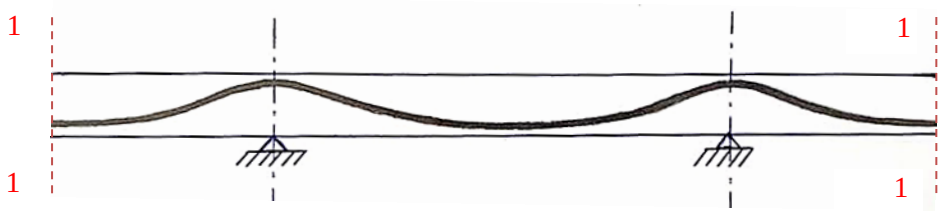


Slika 1.5 Naprezanje kabela i dijagrami naknadno prednapregnutog betona

U tijeku razvoja prednapregnutog betona bilo je više prijedloga da se dopuste i pukotine u prednapregnutom betonu pod djelovanjem i promijenljivog opterećenja, odnosno da se uvede u praksu i djelomično prednapregnuti beton. Svi prednapregnuti elementi i konstrukcije moraju biti armirani, osim čelikom za prednaprezanje, i betonskim čelikom koji ima višestruku važnost, a prvenstveno služi kod djelomično i ograničeno prednapregnutih konstrukcija za prihvaćanje vlačnih naprezanja. Pravilnikom o tehničkim mjerama i uvjetima za prednapregnuti beton nedopustiva je uporaba djelomično prednapregnutih konstrukcija.

1.2.1. Prednosti i nedostaci prednapregnutih konstrukcija

Kroz dugi niz godina pri projektiranju, izvođenju i uporabi konstrukcija ustanovljene su prednosti, a i nedostaci ovih sustava. Naime, prednosti prednapregnutih konstrukcija naplaćuju se skupljim gradivom i većim radom. Stoga, prednapregnuti beton zahtijeva primjenu kvalitetnih materijala, složenu tehnologiju i veliku preciznost u projektiranju i izvođenju, te stalnu kontrolu i održavanje, što valja stalno imati na umu jer se greške ne mogu ispraviti.



Slika 1.6 Tipična linija vođenja kabela preko više polja

Prednosti prednapregnutih betonskih konstrukcija:

1. povećana nosivost
2. manja deformabilnost i vlastita težina kod iste nosivosti
3. smanjeni kratkotrajni i krajnji dugotrajni progibi konstrukcije
4. omogućeni veći rasponi za isti oblik konstrukcije
5. umanjeno djelovanje poprečnih sila, osobitno uz prisustvo povijenih kabela
6. manja potrošnja čelika zbog uporabe skupljeg čelika za prednaprezanje i
7. proširenje i ubrzanje montažnog građenja.

Nedostaci prednapregnutih betonskih konstrukcija:

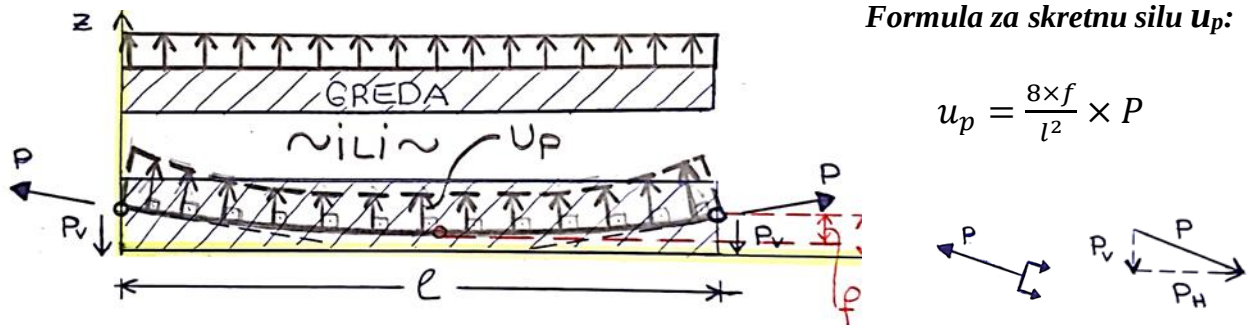
1. veća potrošnja skupljeg čelika za prednaprezanje i elemenata za sidrenje i nastavljanje
2. pojava nepredviđenih pukotina kao posljedica koncentracije posmičnih sila
3. planiranje, razrada, proračun i izvedba zahtijevaju znanje i iskustvo i
4. stručna radna snaga za postavljanje kabela, prednaprezanja i injektiranja.

1.2.2. Područje primjene prednaprezanja

Konstrukcije od prednapregnutog betona u usporedbi s onima od drugih materijala povoljnije su u ekonomskom, funkcionalnom i estetskom pogledu. Danas se prednapregnuti beton primjenjuje u izgradnji mostova, stropnih ploča, hidrotehničkih građevina, zgrada, bunkera, tornjeva, silosa, kesona, spremnika, potpornih zidova, nuklearnih elektrana, poljoprivrednih i industrijskih objekata, te drugih. Prednapregnute armirano betonske konstrukcije imaju prioritet u građenju objekata velikih raspona kao što su koncertne i sportske dvorane, kolodvori, mostovi, stadioni i tržnice. Daljnjim razvojem teorije prednapregnutog betona i tehnologije građenja, poboljšanjem kakvoće gradiva i načina kontrole materijala, te pronalaženjem boljih i suvremenijih sustava prednaprezanja, u budućnosti se može očekivati još veća primjena prednapregnutih elemenata i konstrukcija.

1.2.3. Objašnjenje načela prednaprezanja

Prednapregnuti neki građevni element znači svjesno na njega djelovati određenim sustavom umjetno izazvanih sila, koje nazivamo silama prednaprezanja. Te sile izazvat će takva stanja naprezanja koja materijal elementa može podnijeti tijekom cijelog uporabnog vijeka. Cilj prednaprezanja je izazvati u svim točkama ili presjecima elementa tlačno ili dovoljno smanjeno vlačno stanje naprezanja. Glavna svrha prednaprezanja je da se suprotstavi momentima savijanja, dakle primjenjuje se uglavnom kod greda i ploča. Za razliku od obične armature koja se naziva pasivnom jer joj naprezanje potječe isključivo od vanjskih djelovanja, prednapregnuta armatura nakon naprezanja stvara vlastito stanje naprezanja unutar konstrukcije, tj. rezne sile koje djeluju na beton uravnotežuju se silama u prednapregnutoj armaturi. Skretne sile od paraboličnog kabela imaju karakter jednoliko rasprostrtog opterećenja i usmjerene su prema gore. Djelovanje prednaprezanja na betonsku gredu svodi se, dakle, na djelovanje tlačnih sila na mjestima usidrenja (P) i djelovanja skretnih sila. Prešom se u kabel unosi vlačna sila koja djeluje kao tlačna.



Formula za skretnu silu u_p:

$$u_p = \frac{8 \times f}{l^2} \times P$$

Slika 1.7 Skretna sila koje djeluju na betonsku gredu od naprezanja paraboličnog kabela

2. Zahtjevi na gradiva

2.1. Općenito

Za izradu prednapregnutih AB elemenata i konstrukcija rabi se beton i čelik visokih kvaliteta. Samo ugradnjom betona visoke čvrstoće *(„unbonded“ C ≥ 25/30, a „bonded“ C ≥ 30/37)* i kategorije B-II, te relativno malih viskoznih deformacija skupljanja i puzanja omogućuje se realizacija prednapregnutih konstrukcija. Isto tako ne može se zamisliti uspješno građenje s prednapregnutim elementima bez ugradnje čelika visoke čvrstoće i povoljnih deformacijskih svojstava. Primjena materijala najboljih svojstava, moguća je izvedba elemenata malih dimenzija poprečnog presjeka, što je od važnosti za racionalno građenje, osobito montažnih konstrukcija ili premošćenje velikih raspona nosačima.

2.1.1. Beton

Beton visoke kvalitete nije nužan samo radi velikih naprezanja kojima je izložen, već radi toga što kvalitetan beton štiti armaturu od korozije. Sastav betona mora biti takav da se osigura pravilno ugrađivanje betona u cilju dobivanja što kompaktnijeg i homogenijeg očvrslog betona, bez segregacije prilikom miješanja, transporta i ugradnje. Za konstrukcije od prednapregnutog betona rabe se “normalni“ betoni gustoće od 2200 do 2600 kg/m^3, u prosjeku 2400 kg/m^3. Za njihovo spravljanje se koriste prirodni kameni granulati ili granulat dobijem drobljenjem kamena. Radi postizanja zahtjevane kvalitete, agregat mora biti tvrd, bez pora, stalnog volumena i bez primjesa. Beton visoke čvrstoće sadrži uz već spomenute sastojke i mikroagregat (silicijska prašina).

Zahtjevi na beton za prednaprezanje su:

1. visoka tlačna čvrstoća
2. mali iznos skupljanja i puzanja
3. zaštita od korozije i
4. trajnost.

Tip prednapinjanja	Najniži razred tlačne čvrstoće betona
Prethodno prednapinjanje (adheziono)	C30/37
Naknadno prednapinjanje	C25/30

Slika 2.1 Najniži razredi betona za prednapregnuti beton

Ugradnja betona obavlja se isključivo vibriranjem: pervibratorima, oplatnim vibratorima i vibrostolovima. Nakon ugradnje, beton je potrebno njegovati prvih sedam dana. Za vezivanje betona najpovoljnija temperatura je od 8 do 200°C. Ako temperatura padne ispod 50°C, treba poduzeti odgovarajuće mjere da se beton barem prva tri dana održava na temperaturi većoj ili jednakoj 50°C. Da bi se postigla veća proizvodnja betonskih elemenata, nastoji se što prije osloboditi kalupe za ponovnu uporabu, pa se u tom cilju primjenjuju različiti postupci za ubrzano očvršćivanje betona, a jedan od njih je grijanje. Kemijski procesi u betonu ubrzavaju se s porastom temperature u betonu, što omogućuje ubrzani prirast čvrstoće. Pri prekoračenju maksimalne temperature, konačna čvrstoća betona, bit će manja u odnosu na čvrstoću normalno njegovanog betona. Manji vodocementni omjer ($v/c \leq 0.45$) stvara povoljnije uslove za brže očvršćivanje betona. Neki cementi (aluminatni cementi) uopće nisu povoljni za zagrijavanje i zaparivanje zbog štetnog utjecaja na kvalitetu betona. Na trajnost betona i gubitak prednaprezanja povoljno će utjecati pravilna njega i odgađanje primjene opterećenja.

Skupljanje je smanjenje volumena betona kao posljedica kemijske reakcije i isušivanja vode iz betona. Manje skupljanje se javlja prilikom pripreme, ali najvećim dijelom nastaje tijekom sušenja. Skupljanje sušenjem može se odgoditi polijevanjem ili vlaženjem betona, što uzrokuje bubrenje. Zbog skupljanja dolazi do nastajanja vlačnih pukotina prije djelovanja prednaprezanja koje mogu smanjiti svojstvenu vlačnu čvrstoću betona i njegovu otpornost prema raspucavanju, te gubitka dijela tlačnog naprezanja izazvanog prednaprezanjem. Naprimjer, cementi finijeg mliva imaju veća skupljanja i brži prirast skupljanja.

Puzanje je povećanje deformacije u vremenu pod konstantnim opterećenjem. Zbog puzanja betona, prednaprezanje u kabelu se s vremenom smanjuje. Ono nastaje zbog premještanja hidratizirane cementne paste, te izdvajanja vode iz šupljina pod opterećenjem. Uz opterećenje blizu razine uporabnog, deformacija od puzanja s vremenom se smanjuje.

Puzanje se povećava s povećanjem:

1. sadržaja cementa (odnosa količine cementne paste nasuprot agregatu)
2. v/c omjera
3. uhvaćenog zraka i
4. temperature okoliša

Puzanje se smanjuje s povećanjem:

1. starosti betona pri opterećenju
2. relativne vlažnosti i
3. odnosa volumena, te površine oplošja elementa.

2.1.2. Čelik

U prednapregnutim armiranobetonskim konstrukcijama, uz vanjsko opterećenje, služi čelik za prednaprezanje. On je u ovim konstrukcijama stalno napregnut bez obzira na vanjsko djelovanje. U trenutku prednaprezanja konstrukcije ili elementa čelik se vrlo visoko napreže, negdje između 65 i 75% njegove karakteristične čvrstoće. Poslije prednaprezanja, tijekom vremena dolazi do pada naprezanja u čeliku zbog reoloških svojstava betona i čelika. Čvrstoća čelika ograničena je zahtjevom da on ima dovoljnu žilavost koja je neophodna za građenje duktilnih konstrukcija, kojih su povoljna svojstva poznata. Osim visoke čvrstoće i duktilnosti , poželjni su čelici koji nisu osobito podložni koroziji, barem u normalnoj sredini.

Zahtjevi na čelik za prednaprezanje su:

1. velika čvrstoća
2. mala relaksacija
3. dovoljna žilavost
4. mala osjetljivost na koroziju
5. geometrijska pravilnost
6. velike duljine pri isporuci i
7. dobra prionljivost.

Prednapregnuti beton temelji se na uporabi čelika vrlo visoke čvrstoće. Proizvodi od čelika za prednaprezanje su žice, užad i šipke. Šipke se rabe pojedinačno , a žice i užad u snopovima, npr. po 3,7 i slično. Najčešće se koristi uže koje se sastoji od sedam žica. Takvo uže sastoji se 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. 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. Žica i užad isporučuju se u kolutovima velike duljine. Najčešći slučajevi korozije su posljedica lošeg izvođenja i nedovoljne zaštite čelika prije ugrađivanja i neadekvatne zaštite čelika injektiranjem. Za zaštitu žice od korozije u toku čuvanja i transporta ponekad se koriste premazi od epoksidnih smola i sl.

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

Slika 2.2 Najmanji broj šipki, žica ili užadi u vlačnom području elementa

Za svojstva čelika za prednaprezanje mjerodavne su hrvatske norme niza nHRN EN:10138 :

- nHRN EN 10138-1 - Čelik za prednaprezanje – 1. dio: Opći zahtjevi (prEN 10138-1:2000)
- nHRN EN 10138-2 - Čelik za prednaprezanje – 2. dio: Žica (prEN 10138-2:2000)
- nHRN EN 10138-3 - Čelik za prednaprezanje – 3. dio: Užad (prEN 10138-3:2000)
- nHRN EN 10138-4 - Čelik za prednaprezanje – 4. dio: Šipke (prEN 10138-4:2000)

U praksi se najčešće javljaju sljedeći oblici armature za prednaprezanje: žice (Ø≤12mm), šipke (Ø>12mm), užad i kablovi. Užad je grupacija namotanih žica u vidu zavojnice. Korak i smjer namotavanja su isti za sve žice istog sloja. Ovdje su neki od primjera označavanja čelika za prednaprezanje (žica, užad i šipka):

Žica nHRN EN 10138-2 Y1860C-5,0-I

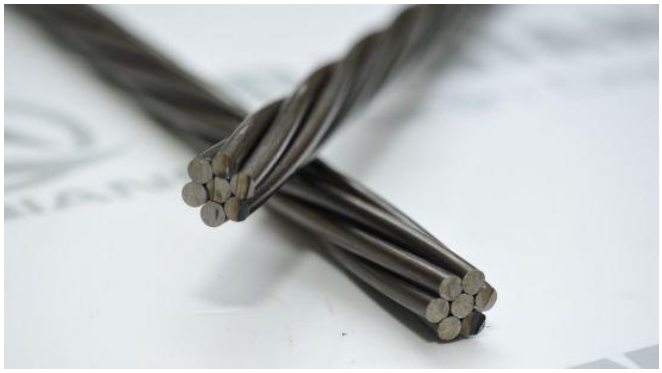
Y – čelik za prednaprezanje
1860 – nazivna vlačna čvrstoća (N/mm^2)
C – hladno oblikovana
5,0 – promjer (mm)
I – profilirana

Šipka nHRN EN 10138-3 Y1030H-26,0-R

Y – čelik za prednaprezanje
1030 – nazivna vlačna čvrstoća (N/mm^2)
H – toplo valjana šipka
26,0 – promjer (mm)
R – rebrasta

Uže nHRN EN 10138-3 Y1860S7-16,0-A

Y – čelik za prednaprezanje
1860 – nazivna vlačna čvrstoća (N/mm^2)
S – uže
7 – broj žica
16,0 – promjer (mm)
A – razred duktilnosti



Slika 2.3 Čelične užadi sa sedam žica



Slika 2.4 Čelik za prednaprezanje

2.1.3. Mort za injektiranje *(„bonded“)*

Mort za injektiranje štiti čelik za prednaprezanje od korozije i osigurava naknadnu vezu između čelika i betona. Svrha injektiranja je postignuta ako je kanal potpuno ispunjen kvalitetnim mortom. Kakvoća morta se procjenjuje na temelju ispitivanja svojstava kao što su: fluidnost, postojanost volumena, segregacija, tlačna čvrstoća i otpornost na mraz. Naknadno uspostavljena veza između betona i čelika preko morta povećava nosivost.

Mort za injektiranje mora imati minimalnu tlačnu čvrstoću:

- nakon 7 dana…f_{c7} = 20 N/mm^2
- nakon 28 dana…f_{c28} = 30 N/mm^2

Mort se priprema strojno u mutilicama kako bi se smanjio vodocementni faktor koji se kreće od 0,36 do 0,44 (ovisno o vrsti cementa i temperaturi). Za mješavinu morta upotrebljavaju se cementi ne fino mljeveni koji izlučuju malo vode uz eventualne dodatke za povećanje fluidnosti, kako bi se smanjio vodocementni faktor i poboljšala stabilnost volumena. Ovi dodaci ne smiju imati sastojke koji bi mogli inicirati koroziju čelika. Kako bi se zaštitna cijev pouzdano ispunila smjesom za injektiranje, ona se ubrizgava na najnižoj točki ili preko otvora na sidrima, a na najvišim mjestima su otvori za odzračivanje. Tako se točno zna kada su cijevi ispunjene - kada smjesa izađe na odzračnim otvorima.



Slika 2.5 Kontinuirani nosač



Slika 2.6 Kontrolne cijevi za odzračivanje

Ugrađenu armaturu treba što prije injektirati. Ukoliko se ne može ubrzo završiti betoniranje, zatezanje i injektiranje kablova treba zaštititi isto od dodira s vlagom. Injektiranje treba provesti barem u roku od 10 dana od trenutka zatezanja. Najmanje šupljine mogu dovesti do korozije čelika. Cementni mort se ne smije injektirati pod velikim tlakom niti velikom brzinom jer se tako onemogućuje stvaranje zračnih čepova, segregacija, oštećivanje konstrukcije, opreme i ventila. 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. S druge strane, cementni mort ne smije biti previše suh jer se zaštitna cijev može začepiti.

Injektiranje, kao uostalom i drugi radovi vezani za prednapregnuti beton, zahtijeva veliku točnost i angažiranost više stručnjaka. Kod uporabe aditiva treba biti obazriv. Neki dodaci mogu poboljšati neka svojstva na štetu drugih karakteristika. Osobito valja izbjegavati dodatke u kojima ima klora i sumpora pa makar i u malim količinama. Upotreba bilo kojeg dodatka zahtijeva vrlo detaljna ispitivanja i dokaze podobnosti za injektiranje.

2.1.4. Zaštitne cijevi

Cijevi u kojima se nalaze kablovi kod naknadnog prednaprezanja proizvode se od čeličnih ili polietilenske cijevi. One osiguravaju oblik vođenja natega, te moraju imati dostatnu čvrstoću da preuzmu mehanička opterećenja. Izvode se s naboranim presjekom radi osiguranja prionljivosti s betonom izvana i injekcijskim mortom iznutra. Ti nabori im ujedno osiguravaju fleksibilnost. Cijevi ne smiju korodirati prije ugradnje. Beton izvana i injekcijski mort iznutra spriječit će pojavu korozije nakon ugradnje. Moraju biti nepropusne, a spojevi moraju brtviti izolacijskom trakom.



Slika 2.7 Čelična i polietilenska zaštitna cijev

Čelična zaštitna cijev	→	veće trenje
Polietilenska zaštitna cijev	→	skuplja, manje trenje

Odstupanje promjera:	manje od ± 1% ili ± 0,5 mm
Raspon promjera:	25 mm – 100 mm
Debljina lima:	0,2 mm – 0,6 mm

Cijevi se ispunjavaju kablovima za prednaprezanje najviše do odnosa: $A_{natega} / A_{cijevi} = 0,5$.

Prednosti polietilenskih cijevi su bolja zaštita kabela od korozije i na zamor, imaju bolju kemijsku otpornost i bitno manje trenje između stijenke cijevi i natege, što smanjuje gubitke prednapinjanja. Mana im je manja težina, zbog koje se može dogoditi da se tijekom betoniranja cijevi oslobode armaturnog koša i promijene položaj, zbog čega je iznimno bitno pravilno učvrstiti cijevi. Debljine cijevi su 2 do 3 mm (ovisno o veličini kabela), a međusobno se povezuju ili navojem ili postupkom toplog zavarivanja.



Slika 2.8 Brtvljene i položene zaštitne cijevi



Slika 2.9 Profilirane zaštitne cijevi za jedan montažni mostovski nosač

3. Sredstva za prednaprezanje

3.1. Sidra

Sidra su mehaničke naprave koje se koriste za prijenos sile prednaprezanja u beton tako što se ispod sidrene ploče stvara pritisak. Iznimno je bitno da je sidro postavljeno u istoj osi kao i cijev kabela. Dio sidra koji služi za prihvat užadi su klinovi. Izrađuju se od visokokvalitetnog čelika, a obično se sastoji od dva ili najviše tri dijela te može usidriti do tri užeta.

Sidrene glave ili usidrenja ovisno o sustavu prednaprezanja čine:

1. adhezijska sidra na osnovi prianjanja
2. sidra na osnovi klina i čahure
3. sidra s navojem i
4. sidra na osnovi glavice



Slika 3.1 Klinovi za sidrenje užadi

3.2. Oprema za prednaprezanje

Opremu za prednaprezanje sačinjavaju:

1. preše za naprezanje kablova
2. oprema za injektiranje kablova
3. naprave za uvlačenje žica ili užadi i
4. hidrauličke pumpe

Preše za naprezanje kabela postoje takve da se naprežu pojedinačno uže ili cijeli kabel. Preša za prednaprezanje pojedinačne užadi opremljene su crijevima visokog pritiska i spojnicama za povezivanje na hidrauličnu pumpu. Hidraulički pritisak većinom iznosi između 200 kg/cm² i 700 kg/cm². Manjim pritiscima daje se prednost onih preša čiji klipovi djeluju neposredno na beton, u slučaju većih pritisaka potrebni su podmetači ili podložne ploče. Preša za naprezanje kabela razlikuje se od preše za prednaprezanje pojedinačne užadi po kapacitetu i bitno je veća . Takva preša najčešće ima metalni držač koji olakšava premještanje preše i postavljanje užadi u prešu. Preša se baždari skupa s odgovarajućom hidrauličnom pumpom.

Oprema za injektiranje kabela sastoji se od miješalice s pumpom koja miješa i odmah puni zaštitnu cijev cementnim mortom. Bitno je da hidraulički krugovi imaju brtvene spojeve, da je minimalni pritisak 10 bara i da postoji sigurnosni ventil koji sprječava prelazak razine tlaka preko 20 bara. Poželjno je da se cijev popuni jednim miješanjem. Mašina za injektiranje opremljena je s dva rezervoara, jedan za miješanje smjese, a drugi za izmiješanu smjesu.

Naprave za uvlačenje žica ili užadi služe za provlačenje užadi ili žica kroz zaštitnu cijev. Sastoje se od valjaka koji povlače i guraju užad cijelom potrebnom dužinom, a užad ili žice odmataju se s koluta. One se razlikuju po maksimalnoj dužini koju je moguće uvući i brzini guranja užadi ili žica u cijev.

Hidrauličke pumpe koriste se za pogon preša za naprezanje užadi. Proizvode se u više modela koji se razlikuju po karakteristikama i predviđenoj upotrebi. Sve hidrauličke pumpe imaju tri operativna programa-za naprezanje, zaklinjavanje i vračanje.

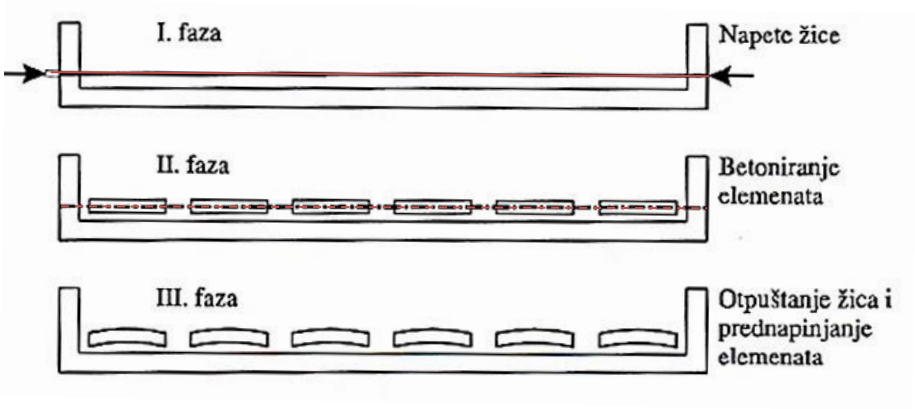


Slika 3.2 Preša za naprezanje kabela

4. Metode prednaprezanja

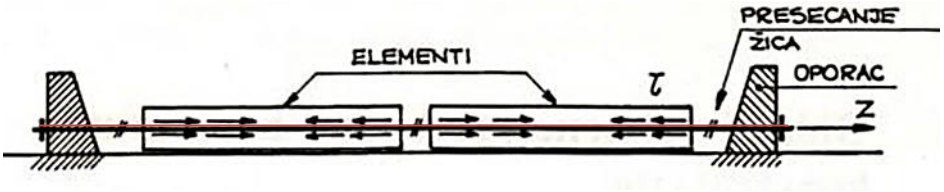
4.1. Prethodno prednaprezanje

Prethodno naprezanje ili prednaprezanje adhezijom odlikuje se time što se žice napinju prije ugradnje betona. Cijeli se postupak događa na stazi za istezanje. Kada beton dostigne 70% predviđene čvrstoće, ali ne manje od 30 N/mm^2, te uspostavi dovoljna prionljivost između betona i čelika, veza se žica s ležajima i među elementima raskida, pa se time sva sila iz čeličnih žica ili užadi adhezijom u obliku tlaka prenosi na beton. Ovaj se sustav prednaprezanja, stoga, zove i adhezijsko prednaprezanje. Žice se napinju između sidrenih blokova, nakon čega se postavi oplata i izbetoniraju elementi. Tako odmah nastane prianjanje između armature i betona. Betonska prizma se skraćuje, a dio šipke koji viri iz betona će se povećati (produljenje šipke + skraćenje betona).



Slika 4.1 Faze adhezijskog prednaprezanja

Staza za prednaprezanje sadrži dva upornjaka između kojih se istežu žice ili užad za prednaprezanje i poda. Duljina staze se kreće od 60 do 150 m, a širina od 6 do 12 m. Na nepomičnom kraju žice su usidrene na čeličnu ploču koja se oslanja na konzolne ležajeve (upornjake). Na drugom pokretnom kraju žica nalazi se ploča za sidrenje, vretena, hidraulička preša za istezanje žica te matica na vretenu za pritezanje na čeličnu ploču.



Slika 4.2 Presjecanje žica

Mjerenja ostvarenog naprezanja u žicama obavlja se na dva načina:

1. mjerenjem izduženja žica na stazi
2. neposrednim mjerenjem frekvencije vibracija žica

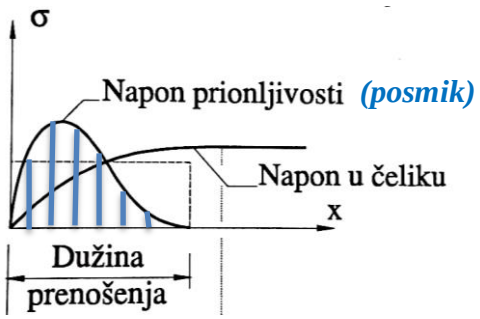
Na temelju izmjerene frekvencije vibracija žica može se odrediti naprezanje u njima prema izrazu:

$$\sigma_p = 4f^2 \times l^2 \times \frac{\gamma}{g}$$

gdje je:

- f – izmjerena frekvencija
- l – duljina od čvora do čvora vibrirajuće žice
- σ_p – napon u žici za vrijeme mjerenja
- g – gravitacija
- γ – volumenska težina.

Nakon presjecanja žica, naprezanja na krajevima elementa u betonu i čeliku su nula, ali oni na određenoj duljini dostižu svoju maksimalnu vrijednost aktiviranjem adhezije. Ova duljina zove se *duljina prenošenja*. U području sidrenja raspodjela naprezanja je nepravilna i pojavljuju se sile cijepanja koje je potrebno prihvatiti betonskim čelikom u oba poprečna smjera.



Slika 4.3 Naprezanje na kraju elementa

Da bi se poboljšala naprezanja prionljivosti između betona i čelika primjenjuju se:

1. hrapavljenje površina žica
2. provlačenjem kroz kiselinu uporabom rebrastih žica i
3. uporabom užadi.

Za prednaprezanje putem adhezije sve češće se koriste užadi zbog povoljnosti adhezije: pri istoj dužini uvođenja dobiva se veća sila. Prednost prethodnog prednaprezanja (adhezijskog) je u jednostavnosti i ekonomičnosti te mogućnosti postizanja ujednačene kvalitete zbog tvorničke proizvodnje. Ograničenja jesu: potreba transporta do gradilišta, dakle ograničenje dužine elemenata na 20 do 30 m, nemogućnost velike koncentracije armature jer ona za postizanje prianjanja treba biti obavijena dovoljnom količinom betona, te nemogućnost izvedbe krivolinijskih natega koje se bolje prilagođuju opterećenjima nego ravne natege.

Ovdje je prikazana tehnika prethodnog (adhezijskog) prednaprezanja.



Slika 4.4 Hidraulička preša za zatezanje žica



Slika 4.5 Ulijevanje betona u kalupe nakon zatezanja žica



Slika 4.6 Poravnavanje betona nakon zalijevanja



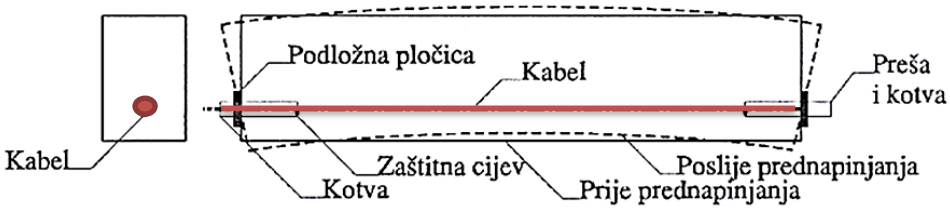
Slika 4.7 Očvrsnuli betonski elementi



Slika 4.8 Kontrola predgotovljenih betonskih elemenata

4.2. Naknadno prednaprezanje

Naknadno ili kabelsko prednaprezanje danas je najčešći način prednaprezanja. Armatura se napinje nakon očvršćivanja betona (no još uvijek na skeli) na mjestu pokretnog sidra hidrauličkim prešama, s time da se one upiru o beton elementa. Tom se prilikom armatura produlji, a element malo skrati. Da bi se pritom ostvario potrebni pomak između armature i betona, armaturu je potrebno smjestiti u zaštitne cijevi koje ju odvajaju od betona. Nakon naprezanja, armatura se usidri, a zaštitne se cijevi ispune smjesom za injektiranje (cementno mlijeko s dodacima), čime se postiže veća sigurnost pri slomu i zaštita armature od korozije. Čelično uže koje se koristi za naknadno prednaprezanje ima vlačnu čvrstoću koja je četiri puta veća od prosječne šipke za armiranje.



Slika 4.9 Kabelsko prednaprezanje

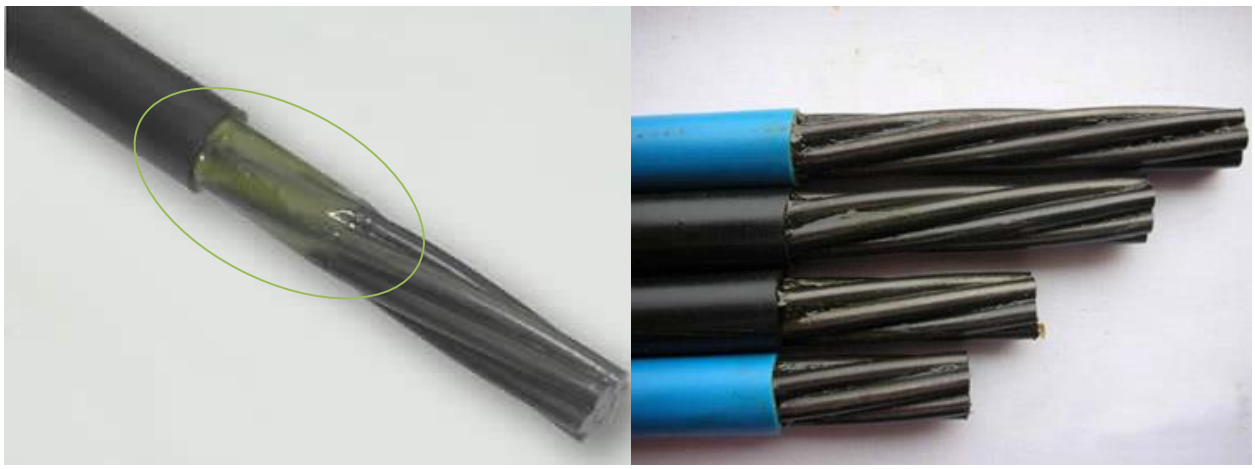
Prednosti naknadnog prednaprezanja nisu samo tanji presjeci i veći rasponi već i brža izgradnja konstrukcija, niži troškovi materijala, smanjeni troškovi održavanja te izrada raznih geometrijskih oblika koje bez upotrebe prednapregnutog betona ne bih bilo moguće izvesti. Primjena naknadnog prednaprezanja omogućuje korištenje tanjih betonskih presjeka, veće raspone nosača, čvršće zidove koji mogu izdržati bočna opterećenja te čvršće temelje koji mogu podnijeti veća opterećenja te učinke slijeganja i bubrenja tla. Naknadno prednaprezanje najčešće se primjenjuje kod konstrukcije uredskih i stambenih zgrada, garaža za parking, temeljnih ploča, mostova, stadiona, sidara i spremnika za vodu.



Slika 4.10 Postava kablova kod naknadnog prednaprezanja montažnog nosača velikog raspona

4.2.1. „Unbonded“ i „bonded“ tehnologija

S obzirom na kontakt užadi s betonom razlikujemo dvije vrste tehnologija, a to su „unbonded“ (PT) i „bonded“. „Unbonded“ tehnologija predstavlja užad u plastičnoj cijevi sa zaštitnom masti tj. užad bez direktnog dodira s betonom i „bonded“ užad u zaštitnoj cijevi u koju ulazi injekcijska cementna smjesa (mort). Zbog puno više prednosti, u visokogradnji treba preferirati „unbonded“ kabele nego „bonded“. Prostor između kabela, te zaštitne cijevi može se ispuniti i s uljem ili voskom.



Slika 4.11 Prikaz „unbonded“ kabela – plastična cijev i zaštitna mast

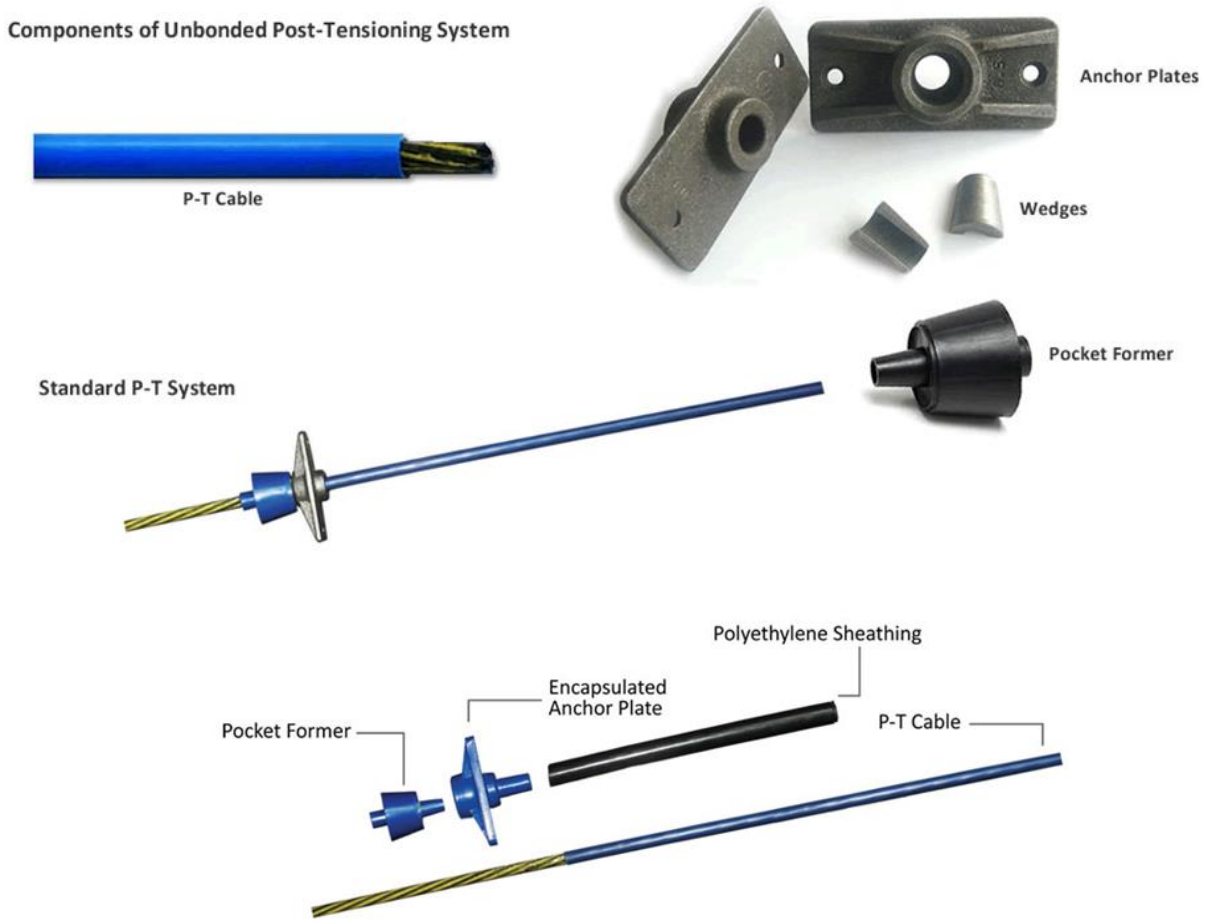
Prednosti „unbonded“ tehnologije kabela:

1. Radi smanjenog trenja mogući su veći taktovi betoniranja, a ugradnju ubrzava i primjena tzv. „slobodnog vođenja kabela“ gdje kabel sam formira liniju između gornjeg i donjeg pridržanja bez međupridržanja.
2. Minimalni zaštitni sloj „unbonded“ kabela (kriterij vatrootpornosti) je 2 cm, dok „bonded“ kabela 3 cm.
3. U zimskim uvjetima za „unbonded“ kabele vrijede ista pravila kao za obične armiranobetonske ploče dok je kod „bonded“ kabela ograničenje temperature da se ispod +5°c ne smije izvoditi injektiranje.
4. Minimalni razred tlačne čvrstoće za ploče unbonded kabela je C 25/30, a injektirane C 30/37. Ovo može biti od velike važnosti ako kod, primjerice projektirane čvrstoće betona ploča C 30/37 dođe do podbačaja čvrstoće, možemo se „izvući“ u dokazu kod „unbonded“ kabela.
5. „Unbonded“ kabeli tlocrtno gledano lakše zaobilaze prepreke i „gužvu“ u armaturi. Na pločama često u zadnji čas pomaknu se ili osvanu novi instalaterski otvori koje „bonded“ kabeli ne bi mogli zaobići.

6. Praksa je pokazala da se prilikom ugradnje događaju oštećenja košuljice cijevi „bonded“ kabela dok se „unbonded“ kabeli mogu bez posljedica „nagaziti“ ili pasti na njih teži predmeti.

Nedostatak „unbonded“ tehnologije kabela:

1. Jedini nedostatak „unbonded“ kabela je njegovo presjecanje unutar usidrenja isključuje djelovanje tog kabela na cijelom potezu između dva usidrenja. Ovaj nedostatak može se ublažiti sljedećim mjerama; označavanje sprejem linije kabela na oplati zbog čega ostaje trag na donjoj strani ploče glede bušenja. Na gornjoj strani ploče opasnost je bušenja prilikom stabilizacije oplate zidova i stupova. Jedno od rješenja je upiranje držača oplate na betonske blokove koji se sele. Ukoliko dođe do presijecanja jednog kabela od mnogobrojnih u široj zoni ploče obično je procjena projektanta da je ovo minimalno oslabljenje pokriveno koeficijentima sigurnosti. U slučaju presijecanja grupe kabela vrši se postupak izvačenja kabela i guranja prešom zamijenjujućih na njihovo mjesto, sa novim mjestom usidrenja.



Slika 4.12 „Unbonded“ tehnologija

5. Prednapregnute konstrukcije u Republici Hrvatskoj

Ovdje sam navela nekoliko primjera u kojima je korištena tehnika naknadnog prednaprezanja; metoda slobodnog vođenja kabela.



Slika 5.1 Zračna luka u Zagrebu – završne faze polaganja kabela



Slika 5.2 Zračna luka u Zagrebu – položaj kabela u zoni stupova



Slika 5.3 Podzemna garaža Kapucinski trg u Varaždinu – položaj kabela u zoni ležaja



Slika 5.4 Domovinski most na rijeci Savi u Zagrebu – kabeli izvan presjeka



Slika 5.5 Hotelsko naselje Solaris kraj Šibenika – priprema za polaganje kabela



Slika 5.6 Hotelsko naselje Solaris kraj Šibenika – polaganje kabela

6. Primjer gubitaka sile na prednapregnutoj gredi

Podjela gubitaka sile prednaprezanja: *1. Trenutni gubici*
2. Vremenski gubici

1. Trenutni gubici: a) gubitak od elastičnog skraćenja betona
b) gubitak od trenja kabela
c) gubitak od prokliznuća klina

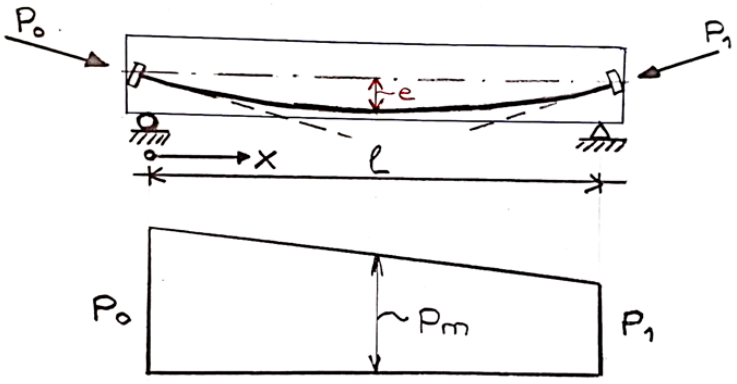
- najveći gubitak je od trenja kabela
- gubici od elastičnog skraćenja betona i prokliznuća klina su jako malo (zanemarivi)
- trenutni gubici iznose prosječno oko 5 %.

Formula za pad sile od trenja:

$$\Delta P = P_o \times \left[1 - e^{-\mu(\sum\theta + k \times x)}\right] \approx P_o \times \mu \times (\sum\theta + k \times x)$$

gdje je:

- P_o – prednaprezanje na aktivnom kraju (puna sila na preši)
- μ – koeficijent trenja između kabela i cijevi (ovisi o obliku presjeka, prisutnosti hrđe itd.)
- $\sum\theta$ – zbroj kutova skretanja kabela na duljini x (neovisno o smjeru i predznaku)
- k – koeficijent neravnosti; neželjeni kut skretanja (na 1m'); ovisan o vrsti kabela
- x – udaljenost (u m) mjerena od mjesta unošenja sile prednaprezanja uzduž prednapregnutog elementa



Slika 6.1 Primjer varijacije prednaprezanja zbog trenja

Koeficijenti trenja:

- μ = 0,05 (za „unbonded“ tehnologiju)
- μ = 0,15 (za „bonded“ tehnologiju – plastična cijev)
- μ = 0,20 (za „bonded“ tehnologiju – metalna cijev)

2. Vremenski gubici

- događaju se najviše zbog skupljanja i puzanja betona

Osnovni izraz:

$$\Delta\sigma_p = E_s \times \varepsilon_{cs} + E_s \times \varphi \times \frac{\sigma_{cp}}{E_c} + \chi \times \sigma_{sp}$$

gdje je:

- E_s – modul elastičnosti čelika za prednaprezanje
- E_c – modul elastičnosti betona
- ε_{cs} – koeficijent skupljanja betona
- φ – koeficijent puzanja betona
- σ_{cp} – tlačno naprezanje u betonu
- χ – koeficijent relaksacije (relaksacija = promjena naprezanja u kabelima zbog opuštanja)
- σ_{sp} – naprezanje u kabelu

Na pločama kod „unbonded“ sistema vremenski gubici su 10-15%, a kod „bonded“ oko 20%.

Primjer. Izračunaj koliko iznosi vremenski gubitak za betonsku gredu duljine 10 m.

Zadano:

σ_{po} = 1340 MPa, σ_{cp} = 3 MPa; E_p = 200 GPa, E_c = 30 GPa; ε_{cs} = 0,0003, φ = 2,5, χ = 0,03

σ_{po} – (vlačno naprezanje u čeliku tj. kabelu)

Izračun:

skupljanje $\Delta\sigma_{ps}$:

$$\Delta\sigma_{ps} = E_s \times \varepsilon_{cs} = 200 \times 10^3 \times 0{,}30 \times 10^{-3} = 60 \text{ MPa}$$

puzanje $\Delta\sigma_{pc}$:

$$\Delta\sigma_{pc} \approx \left(\frac{E_p}{E_c}\right) \times \varphi \times \sigma_{cp} = \left(\frac{200}{30}\right) \times 2{,}5 \times 3 = 50 \text{ MPa}$$

relaksacija $\Delta\sigma_{pr}$:

$$\Delta\sigma_{pr} \approx \chi \times \sigma_{po} = 0{,}03 \times 1340 = 40 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_p = \Delta\sigma_{ps} + \Delta\sigma_{pc} + \Delta\sigma_{pr} = 60\ \text{MPa} + 50\ \text{MPa} + 40\ \text{MPa} = 150\ \text{MPa}$$

$$\frac{\Delta\sigma_p}{\sigma_{po}} = \frac{150\ \text{MPa}}{1340\ \text{MPa}} = 0{,}11\ \times 100\ \% = 11\ \%$$

Zaključak: ovo je tipična vrijednost; vremenski ovisni gubici uglavnom su između 10 i 15 %, a za našu gredu vremenski gubitak iznosi 11% (na 10 metara).

7. Zaključak

Prednapregnuti građevinski elementi sve više su prisutni i sve češće se koriste u građevinskim konstrukcijama. Graditelji s vremenom shvaćaju da samo armatura u betonskim elementima nije dovoljna za osiguranje dugotrajne nosivosti bez oštećenja i progiba elemenata pa je osmišljena metoda prednaprezanja koja se danas vrlo uspješno primjenjuje, a elementi koje se izrađuju se duži i vitkiji nego ikad prije. Zahvaljujući odličnim karakteristikama čelika (visokovrijednim čelikom) koji se koristi kod prednaprezanja, u element se unosi velika tlačna sila koja znatno smanjuje pojavu bilo kakvih pukotina. Kako bi prednaprezanje bilo pravilno izvedeno potrebno je strogo se držati protokola prednaprezanja i kontrolirati pritisak preše (oznake su u barima), ali i izduženje čelika u milimetrima. Nakon unošenja sile u element potrebno je zaštitnu cijev napuniti cementnim mortom ili masti da nebi došlo do korozije užadi, a onda i gubitka sile unešene u element. Upotrebom prednaprezanja ostvaruju se uštede u betonu i čeliku jer je potrebno manje armature, a samim time i manje betona jer je poprečni presjek smanjen. Osim toga, prednaprezanjem postižemo nosivost nosača koju klasičnim metodama armiranja nikako nebi mogli dobiti. Iako su prednapregnuti elementi skuplji od klasičnih armiranih, njihove prednosti su neosporive i takvi elementi su teško zamjenjivi u suvremenom građenju.

„U Varaždinu“, 25.siječnja, 2019.

8. Literatura

Knjige se navode:

[1] D. Jevtić: Prednapregnuti beton 1, Građevinska knjiga, Beograd, 1979.

[2] I. Tomičić: Betonske konstrukcije – odabrana poglavlja, DHGK, Zagreb, 1996.

[3] I. Tomičić: Betonske konstrukcije – prvo izdanje, Školska knjiga, Zagreb, 1984.

[4] J. Radić i suradnici: Betonske konstrukcije – priručnik, Školska knjiga, Zagreb, 2006.

[5] I. Podhorsky: Nosive konstrukcije I – drugo izmijenjeno i dopunjeno izdanje, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb, 2008.

[6] D. Aničić: Prednapeti beton – drugo izdanje, Građevinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2003.

Popis slika

Slika 1.1 Most Pont de Boutiron na rijeci Allier……...1
Slika 1.2 Zbirke knjiga organizacije FIB……..2
Slika 1.3 Položaj rezultanti tlačnih i vlačnih naprezanja; Izvor: D. Jevtić: Prednapregnuti beton 1, Građevinska knjiga, Beograd, 1979.…….……...3
Slika 1.4 Dijagrami normalnih naprezanja u betonskoj gredi……...3
Slika 1.5 Naprezanje kabela i dijagrami naknadno prednapregnutog betona……3
Slika 1.6 Tipična linija vođenja kabela preko više polja……..4
Slika 1.7 Skretne sile koje djeluju na betonsku gredu od naprezanja paraboličnog kabela…….5
Slika 2.1 Najniži razredi betona za prednapregnuti beton; Izvor: J. Radić i suradnici: Betonske konstrukcije – priručnik, Školska knjiga, Zagreb, 2006.……6
Slika 2.2 Najmanji broj šipki, žica ili kabela u vlačnom području elementa; Izvor: J. Radić i suradnici: Betonske konstrukcije – priručnik, Školska knjiga, Zagreb, 2006……..8
Slika 2.3 Čelične užadi sa sedam žica……...9
Slika 2.4 Čelik za prednaprezanje……9
Slika 2.5 Kontinuirani nosač……..10
Slika 2.6 Kontrolne cijevi za odzračivanje……10
Slika 2.7 Čelična i polietilenska zaštitna cijev……11
Slika 2.8 Brtvljene i položene zaštitne cijevi……..12
Slika 2.9 Profilirane zaštitne cijevi……12
Slika 3.1 Klinovi za sidrenje užadi……13
Slika 3.2 Preša za naprezanje kabela……..14
Slika 4.1 Faze adhezijskog prednaprezanja; Izvor: I. Tomičić: Betonske konstrukcije – odabrana poglavlja, DHGK, Zagreb, 1996.……...……15
Slika 4.2 Presjecanje žica……...15
Slika 4.3 Naprezanje na kraju elementa; Izvor: I. Tomičić: Betonske konstrukcije – odabrana poglavlja, DHGK, Zagreb, 1996……...…….16
Slika 4.4 Hidraulička preša za zatezanje žica……17
Slika 4.5 Ulijevanje betona u kalupe nakon zatezanja žica……17
Slika 4.6 Poravnavanje betona nakon zalijevanja……..18
Slika 4.7 Očvrsnuli betonski elementi……18
Slika 4.8 Kontrola predgotovljenih betonskih elemenata……...18
Slika 4.9 Kabelsko prednaprezanje; Izvor: I. Tomičić: Betonske konstrukcije – odabrana poglavlja, DHGK, Zagreb, 1996.……19

Slika 4.10 Postava kablova kod naknadnog prednaprezanja montažnog nosača velikog raspona...19
Slika 4.11 Prikaz „unbonded“ kabela – plastična cijev i zaštitna mast……..20
Slika 4.12 „Unbonded“ tehnologija……21
Slika 5.1 Zračna luka u Zagrebu – završne faze polaganja kabela…….22
Slika 5.2 Zračna luka u Zagrebu – položaj kabela u zoni stupova……..22
Slika 5.3 Podzemna garaža Kapucinski trg u Varaždinu – položaj kabela u zoni ležaja……..23
Slika 5.4 Domovinski most na rijeci Savi u Zagrebu – kabeli izvan presjeka……23
Slika 5.5 Hotelsko naselje Solaris kraj Šibenika – priprema za polaganje kabela……..24
Slika 5.6 Hotelsko naselje Solaris kraj Šibenika – polaganje kabela…….24
Slika 6.1 Primjer varijacije prednaprezanja zbog trenja…….25

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3, HR–42000 Varaždin

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL: Odjel za graditeljstvo

PRISTUPNIK: Melani Hrupek | MATIČNI BROJ: 0973/336

DATUM: 10.10.2018 | KOLEGIJ: Montažno građenje

NASLOV RADA: Razvoj i primjena prednaprezanja u betonskim konstrukcijama

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU: Development and application of prestressing in concrete constructions

MENTOR: Predrag Presečki | ZVANJE: predavač

ČLANOVI POVJERENSTVA:

1. dr.sc. Božo Soldo, redoviti profesor
2. Predrag Presečki, predavač
3. mr.sc. Miroslav Bunić, predavač
4. dr.sc. Matija Orešković, viši predavač
5. Nikola Hrnčić, predavač

Zadatak završnog rada

BROJ: 346/GR/2018

OPIS

Pristupnica će u radu opisati razvoj tehnologije prednapregnutog betona i vrste prednaprezanja. Također, opisati će se osnovni principi te prednosti prednaprezanja. U radu je potrebno odraditi sljedeće teme:

1. Povijesni pregled, područja primjene i načela prednaprezanja
2. Gradiva i sredstva u prednaprezanju
3. Metode prednaprezanja
4. Primjer prednapregnute grede sa proračunima gubitaka sile prednaprezanja
5. Zaključak

Literatura:

D. Jevtić: Prednapregnuti beton 1, Građevinska knjiga, Beograd, 1979.
I. Tomičić: Betonske konstrukcije – odabrana poglavlja, DHGK, Zagreb, 1996.
I. Tomičić: Betonske konstrukcije – prvo izdanje, Školska knjiga, Zagreb, 1984.
J. Radić i suradnici: Betonske konstrukcije – priručnik, Školska knjiga, Zagreb, 2006.
I. Podhorsky: Nosive konstrukcije I – drugo izmijenjeno i dopunjeno izdanje, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb, 2008.
D. Aničić: Prednapeti beton – drugo izdanje, Građevinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera

ZADATAK URUČEN: 16.10.2018. | POTPIS MENTORA: Predrag Presečki

REPUBLIKA HRVATSKA 5 SVEUČILIŠTE SJEVER KNJIŽNICA SVEUČILIŠTE SJEVER

Sveučilište
Sjever

SVEUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, MELANI HRUPEK *(ime i prezime)* pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom RAZVOJ I PRIMJENA PREDNAPREZANJA U BETONSKIM KONSTRUKCIJAMA *(upisati naslov)* te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
Melani Hrupek
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnost i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, MELANI HRUPEK *(ime i prezime)* neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom RAZVOJ I PRIMJENA PREDNAPREZANJA U BETONSKIM KONSTRUKCIJAMA *(upisati naslov)* čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
Melani Hrupek
(vlastoručni potpis)