Odnosi naprezanja i deformiranja kod ispitivanja betonskih prizmi

Polančec, Štefek

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:793793

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

Sveučilište Sjever

Završni rad br. 235/GR/2015

Odnosi naprezanja i deformacija kod ispitivanja betonskih prizmi

Štefek Polančec , 4290/601

Varaždin, listopad 2015. godine

Sveučilište
Sjever

Odjel za Graditeljstavo

Završni rad br. 235/GR/2015

Odnosi naprezanja i deformacija kod ispitivanja betonskih prizmi

Student

Štefek Polančec, 4290/601

Mentor

Matija Orešković , dipl.ing. građ.

Varaždin, listopad 2015. godine

Zahvala

Ovom prilikom želim se zahvaliti svojem mentoru prof. Matiji Oreškoviću dipl.ing.građ. koji mi je strpljivo posvetio svoj trud i vrijeme kako bi mi pomogao vrijednim činjenicama i mišljenjima, te brojnim stručnim savjetima koji su usmjerili tijek pisanja rada.

Zahvaljujem i bliskim prijateljima i kolegama koji su pomogli da iskustvo studiranja pamtim po lijepim uspomenama, također se zahvaljujem svojoj curi, prijateljici i kolegici na velikoj potpori.

Najveće hvala ide mojim roditeljima i obitelji koji su mi omogućili studiranje, nesebično me podržavali i iskazali razumijevanje kroz sve godine studija kada mi je to bilo najpotrebnije.

Sažetak

U ovom radu obrađena je tema „Odnosi deformacija i naprezanja kod ispitivanja betonskih prizmi“. Kronološki sljed završnog rada početi će od povijesti betona. Opisani su parametri ispitivanja betona (općenito to se odnosi na čvrstoču betona, elastičnu deformaciju betona, modul elastičnosti, relativno produljenje), čvrstoče betona (vlačna i tlačna). Prikazano je koji mjerni pribor je potreban za ispitivanja i provedbe ispitivanja (odnos naprezanje-deformacija i starenje betona. U konačnici su prikazani rezultati ispitivanja omjera horizontalnih i vertikalnih deformacija (Poissonov koeficijent).

Ključne riječi: beton, deformacije, naprezanja, ispitivanja, Poissonov koeficijent.

Popis korištenih kratica

Velika latinična slova

A	izvanredno djelovanje
A	ploština
C	konstanta
E	modul elastičnosti
F	sila, djelovanje
G	stalno djelovanje
I	moment tromosti
M	moment (općenito)
N	uzdužna sila
P	sila prednapinjanja
Q	promjenjivo djelovanje
S	unutarnje sile, sile i momenti
V	poprečna sila

Velika latinična slova s indeksima

A_c	ploština betonskog presjeka
A_s	ploština presjeka čelika za armiranje u vlačnom području
A_p	ploština prednapetog kabla ili kablova
A_{s1}	ploština presjeka čelika za armiranje u vlačnom području
A_{s2}	ploština presjeka čelika za armiranje u tlačnom području
A_{sw}	ploština presjeka poprečne armature
E_{cd}	proračunski sekantni modul elastičnosti betona
E_{cm}	sekantni modul elastičnosti običnoga betona
E_s	modul elastičnosti čelika za armiranje ili čelika za prednapinjanje
EQU	ekvivalentnost
I_c	moment tromosti površine betonskog presjeka
M_{Ed}	proračunski moment savijanja od djelovanja
N_{Ed}	proračunska djelujuća uzdužna(aksijalna) sila (vlak ili tlak)
ULS	konačna granica stanja

Mala latinična slova s indeksima

a	razmak
Δa	dodatak za sigurnost koji neki geometrijski podatak umanjuje ili povećava
b	ukupna širina presjeka ili širina pojasnice grede presjeka **Γ**, **T** ili **I**
d	proračunska visina (statička visina) presjeka
b_w	širina hrpta grede presjeka **Γ**, **T** ili **I**
b_{eff}	sudjelujuća širina pojasnice grede presjeka **Γ** ili **T**
f_c	tlačna čvrstoća betona
f_{cd}	proračunska tlačna čvstoća betonskog cilindra(valjka)
f_{ck}	karakteristična tlačna čvrstoća betonskog valjka starog 28 dana
f_{cm}	srednja tlačna čvrstoća betonskog valjka
f_{ctk}	karakteristična osna vlačna čvrstoća betona
f_{ctm}	srednja vrijednost osne vlačne čvrstoće betona
f_p	vlačna čvrstoća prednapetog čelika
f_t	vlačna čvrstoća čelika za armiranje
f_{tk}	karakteristična vlačna čvrstoća čelika za armiranje
f_y	granica popuštanja čelika za armiranje
f_{yd}	proračunska granica popuštanja čelika za armiranje
f_{yk}	karakteristična granica popuštanja čelika za armiranje
h	ukupna visina presjeka
l	duljina, raspon
l_{eff}	proračunski raspon
s	razmak spona
t	promatrano vrijeme
u	opseg presjeka betona ploštine A_c
x	neutralna osna duljina (visina tlačnog područja)
z	krak unutarnjih sila

Grčka slova s indeksima

γ_s	parcijalni koeficijent sigurnosti za armaturni čelik ili čelik za prednapinjanje
γ_f	parcijalni koeficijent sigurnosti za djelovanja bez uzimanja u obzir nesigurnosti modela
γ_g	parcijalni koeficijent sigurnosti za stalna djelovanja bez uzimanja u obzir nesigurnosti modela

γ_m	parcijalni koeficijent sigurnosti za svojstva materijala uzevši u obzir samo nesigurnosti svojstava materijala
ε_c	tlačna deformacija betona
ε_{c1}	tlačna deformacija betona pri najvećem naprezanju betona f_c
ε_{cu}	krajnja tlačna deformacija betona
ε_{s1}	relativna deformacija vlačne armature
ε_{s2}	relativna deformacija tlačne armature
ε_u	deformacija armaturnog čelika ili čelika za prednapinjanje pri najvećem tlaku
ε_{uk}	karakteristična deformacija armaturnog čelika ili čelika za prednapinjanje pri najvećem opterećenju
μ	koeficijent trenja između kablova i cijevi
ρ	gustoća betona osušenoga u sušilniku u kg/m³
ρ_1	omjer armiranja uzdužnom armaturom
ρ_w	omjer armiranja poprečnom armaturom
σ_c	tlačno naprezanje u betonu
σ_{cu}	tlačno naprezanje betona pri krajnjoj deformaciji ε_{cu}
$\varnothing$	promjer čelične šipke za armiranje, natege ili cijevi za nategu

Mala grčka slova

α	kut; omjer
β	kut; omjer
γ	parcijalni koeficijent sigurnosti
ε	deformacija
λ	vitkost
μ	koeficijent trenja
ν	Poissonov koeficijent
ρ	gustoća
σ	normalno naprezanje
τ	posmično naprezanje

Sadržaj

1. UVOD 1
2. OPĆENITO O BETONU 2

2.1. Armirani beton 3
2.1.1. Čelik za armiranje 4

2.2. Prednapregnuti beton 6
2.2.1. Čelik za prednapinjanje 7

3. PARAMETRI ISPITIVANJA BETONA 8

3.1. Općenito 8
3.2. Čvrstoće betona 8
3.2.1. Tlačna čvrstoća 8
3.2.2. Vlačna čvrstoća 9
3.2.3. Čvrstoća betona na posmik, udar i zamor: 10
3.2.4. Višeosne čvrstoće betona 11

3.3. Elastične deformacije betona 13
3.4. Modul elastičnosti 14
3.4.1. Statički modul elastičnosti 14
3.4.2. Dinamički modul elastičnosti 16

3.5. Relativno produljenje ε 17
3.6. Poissonov koeficijent 17
3.6.1. Uzrok Poissonovog djelovanja 18
3.6.2. Poissonov omjer za različite materijale 18
3.6.3. Primjena Poissonovog koeficjenta 19
3.6.4. Poissonova jednadžba 20

3.7. Hookeov zakon 23
3.7.1. Primjena Hookeovog zakona 23
3.7.2. Opruge 24
3.7.3. Dijagram naprezanja 24

4. MJERNI PRIBOR 25

4.1 Tehničke karakteristike i svojstva mjerne opreme 25

5. KONSTRUKCIJA I BETONIRANJE MODELA 28

5.1. Konstrukcija modela prizmi 28
5.2. Betoniranje modela prizmi 29

6. PROVEDBA ISPITIVANJA 30

6.1.Ispitivanje tlačne čvrstoće 30

7. REZULTATI ISPITIVANJA 31

8. ZAKLJUČAK 35

1. Uvod

Beton je najrasprostranjeniji materijal napravljen ljudskom rukom na čitavoj planeti. Od 2005. godine proizvodi se šest milijardi kubnih metara godišnje, što je gotovo kubni metar po glavi stanovnika planete. Beton je postao dominantno gradivo u cijelome svijetu i prisutan je u građenju velikog broja različitih građevina. Očvrsnuli beton se ispituje dominantno na tlačnu čvrstoću u labaratorijskim uvijetima ispitivanjem kocke, valjka ili prizme. Kao rezultat labaratorijskih ispitivanja se dobivaju slijedeći parametri:

- Čvrstoća betona
- Elastična deformacija betona
- Modul elastičnosti
- Relativno produljenje ε

U ovome radu opisana su ispitivanja betonskih prizmi. Većina ispitivanih aksijalno opterečenih prizmi analizirana je do točke prijelomnog naprezanja (raskida uzorka) uz praćenje pojave i širenja pukotina pri određenom cikličkom opterećenju pa sve do kraja loma. Cilj istraživanja na betonskim prizmama jest predložiti dobar analitički model za opisivanje odnosa naprezanja-deformacija. Glavne varijable koje se uzimaju u obzir su dimenzije i čvrstoća betona.

2. OPĆENITO O BETONU

Beton (franc. béton< starofranc. betun: blato, šljunak, drobljenac < lat. bitumen), građevni materijal dobiven stvrdnjivanjem smjese nekog veziva (npr. cementa, sadre, bitumena, asfalta), agregata (npr. pijeska, šljunka, drobljenca, tucanika, troske, drobljene opeke) i vode.

Poznat je bio već u antici. Rimski arhitekt Vitruvije spominje ga u djelu O graditeljstvu (oko 25. pr. Kr.). Isprva su Rimljani kao vezivo upotrebljavali samo gašeno vapno, dok mu nisu počeli dodavati mljevenu opeku, koju su poslije zamijenili vulkanskim pepelom (pucolan) iz okolice Pozzuolija kraj Napulja i tako dobili kvalitetno i trajno hidraulično vezivo, koje može očvršćivati i u vodi. Taj je pronalazak sačuvao mnoge njihove građevine sve do našega doba, ali je nakon propasti Rimskoga Carstva pao u zaborav, tako da se u srednjem vijeku kao vezivo opet upotrebljavalo samo gašeno vapno.

Hidraulična veziva ponovno su se počela rabiti tek potkraj XVIII. st., npr. pucolan pomiješan s plovučcem koji se vadio na grčkom otoku Thíri (santorin),a koji je služio za lučke radove diljem jadranske obale. J. Aspdin je 1824. pronašao hidraulično vezivo kojemu je dao ime portland-cement, a cement u današnjem smislu pronašao je 1844. I. C. Johnson. (→ cement)

Velika je prednost betona što se u svježem stanju lako i po volji može oblikovati i taj oblik trajno zadržati nakon stvrdnjivanja. Odlikuje se i velikom tlačnom čvrstoćom (10 do 60 N/mm²), ali mu je vlačna čvrstoća mnogo manja (iznosi 1/11 do 1/8 tlačne). Manja vlačna čvrstoća nadoknađuje se ojačavanjem betona u području vlačnih naprezanja čeličnom armaturom (armirani beton). Čvrstoća betona označuje se klasom (markom) betona. To je srednja vrijednost tlačne čvrstoće betona starog 28 dana, mjerena na kocki sa stranicama duljine 20 cm. Iako dosta dobro odolijeva atmosferilijama, beton je zbog bazičnog sastava cementa neotporan prema kiselinama.

Betona ima više vrsta, a najčešće se klasificira prema gustoći gotove smjese (uglavnom od 0,3 do 2,5 t/m³) ili prema vrsti veziva. Najčešće je u upotrebi beton s cementnim vezivom. To je mješavina cementa, agregata i vode. Za 1 m³ betona gustoće 2,2 do 2,5 t/m³ potrebno je 150 do 400 kg cementa, 1700 do 2100 kg agregata i 120 do 220 L vode. Udio zrna određenoga promjera u agregatu (→ granulometrijski sastav) točno se određuje, kako bi se postigla što bolja popunjenost šupljina među njima.

Betonska mješavina miješa se u betonskoj miješalici, stroju u kojem bubanj rotira oko svoje osi, a lopatice pritom prebacuju mješavinu, ili u kojem valjak ili osovina s lopaticama rotira. Mješavina se priprema na gradilištu ili, danas češće, u tvornicama betona (betonara), odakle se

doprema vozilima u kojima se stalno prevrće *(automiješalica),* te na mjesto ugradbe transportira pumpom. Betonska pumpa, stapna pumpa s motorom, transportira 8 do 13 m³ svježega betona u jednome satu do 40 m visoko i 200 m daleko. Beton dolazi u lijevak pumpe, gdje se miješa i tjera u cilindar, a odatle ga stapovi tlače u limenu cijev promjera 10 cm. Svježi se beton prilikom gradnje stavlja u prostor oblikovan drvenom, željeznom ili kakvom drugom → oplatom, zidovima ili tlom.

Kako bi se osiguralo da mješavina potpuno ispuni predviđeni prostor, bez mjehurića i šupljina, zbija se titralima (→ vibrator). Već nakon nekoliko sati beton otvrdne, nakon tjedan dana postiže 70% iznosa predviđene čvrstoće, a nakon 4 tjedna praktički punu predviđenu čvrstoću. Beton izrađen od specijalne vrste cementa može se opteretiti već nakon 1 do 3 dana. Čvrstoća se cementnih betona povećava još godinama nakon što su izrađeni. Za vrijeme početnog skrućivanja beton treba biti vlažan, što se pri visokim temperaturama postiže stalnim kvašenjem svježe betonske površine. Skupljanje nakon stvrdnjivanja može se smanjiti primjenom specijalnih vrsta cementa, koje, dok je beton svjež, uzrokuju prividno širenje betonske mase i tako znatno ublažuju skupljanje. Da bi se ubrzao proces skrućivanja pri niskim temperaturama, agregat se grije ili se beton pari. Ako se želi postići veća plastičnost, čvrstoća, otpornost prema mrazu, manja vodopropustljivost ili kakvo drugo osobito svojstvo, svježoj betonskoj masi dodaju se još neke komponente (npr. plastifikatori, organske tvari, čelična strugotina).

Velika početna čvrstoća postiže se tzv. vakuumskim betonom: odmah po ugrađivanju svježe mase u posebnu oplatu, koja se sastoji od propustljiva i nepropustljiva dijela, iz nje se vakuumskom pumpom isisava voda; zbog tako stvorena podtlaka propustljivi dio oplate tlačno je opterećen, pa se na taj način beton ujedno i komprimira.

2.1. Armirani beton

Armirani beton kompozitni je materijal dobiven sprezanjem betona i armature. Budući da beton može preuzeti samo malena vlačna naprezanja, u većinu konstruktivnih elemenata, u kojima se obično javljaju takva naprezanja, umeće se čelična armatura koja ih u potpunosti preuzima, a beton ostaje opterećen samo tlačnim naprezanjima, koja izvrsno podnosi.

Prvi je na tu zamisao došao francuski vrtlar J. Monier, koji je 1849. na taj način ojačavao posude za cvijeće. Francuski inženjer F. Hennebique (1842–1921), izumio je prikladan način povezivanja armature i izgradio u Parizu prvu zgradu od armiranoga betona. Armaturu danas uglavnom čine čelične žice, glatke ili rebraste šipke te mreže s kvadratičnim ili pravokutnim otvorima. Armaturni je čelik mekan, čvrstoće 360 do 520 N/mm², a promjer mu je najčešće 5 do 32 mm. Precizno proračunata armatura polaže se prije betoniranja na točno određena mjesta u

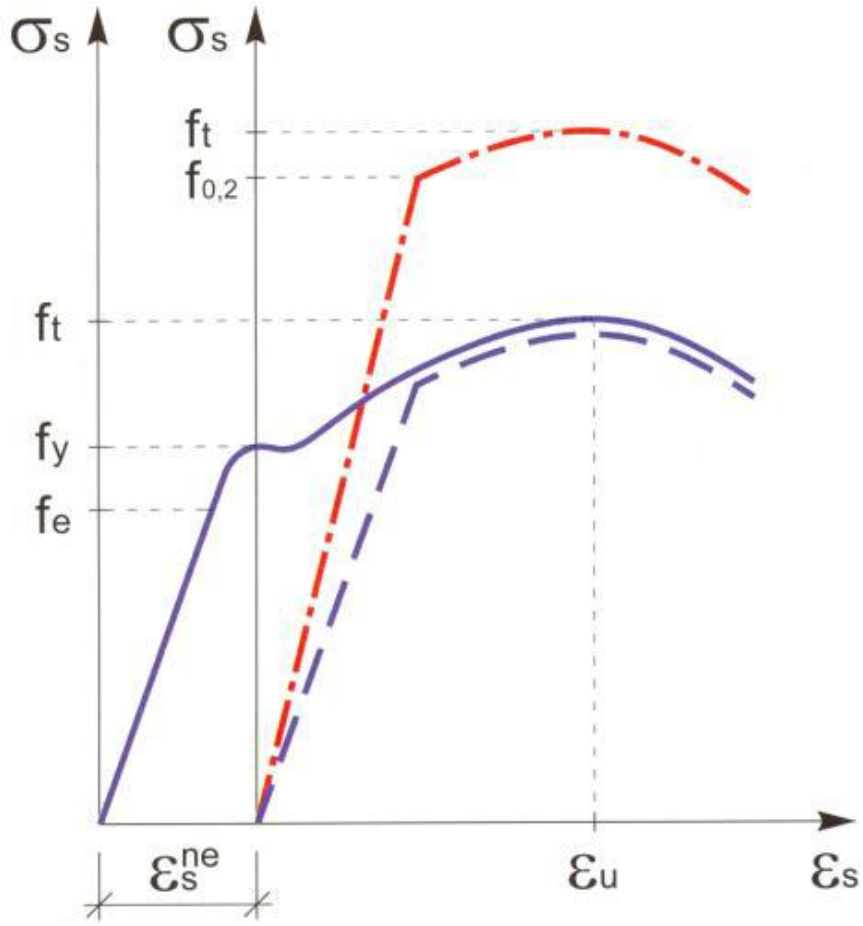
budućem betonskom elementu te međusobno povezuje, nerijetko tvoreći zamršene spletove; ugradnju armature (armiranje) provode školovani radnici, armirači. Kako bi se postigla kasnija dobra sprega betona i čelika, kod betoniranja se nastoji postići što potpunija obavijenost armature betonom.

Zahvaljujući gotovo jednakom koeficijentu toplinskog rastezanja betona i čelika, veza između betona i armature ne slabi ni pri većim promjenama temperature. Radi zaštite od vanjskih agresivnih tvari i sprječavanja korozije, čelične šipke trebaju biti prekrivene betonom debljine 1,5 do 5 cm. Oblik armiranobetonske konstrukcije prilagođuje se vrlo lako svakomu projektu. Trajnost tih konstrukcija vrlo je velika, a troškovi su održavanja, ako su dobro izvedene, maleni. Zahvaljujući tim svojstvima armirani se beton danas upotrebljava za najrazličitije građevine, kao što su stambeni, javni, športski i industrijski objekti, mostovi, silosi, brane, ceste, cjevovodi. Posebne su vrste armiranog betona → ferocement i → torkret, kao i prednapregnuti beton.

2.1.1. Čelik za armiranje

Čelik za armiranje u prednapetim betonskim konstrukcijama se koristi kao konstrukcijska armatura za armiranje detalja, ali ima ulogu i glavne nosive armature, naročito u slučaju spona i armiranja zone sidrenja.Kvalitetan čelik za armiranje je nisko ugljični (manje od 0,24% ugljika), legirani, toplo valjani čelik. Čelik je ili bez dodatne obrade (legiranjem se postiže povećana čvrstoća do 550 MPa), ili termički poboljšan ili hladno obrađen.

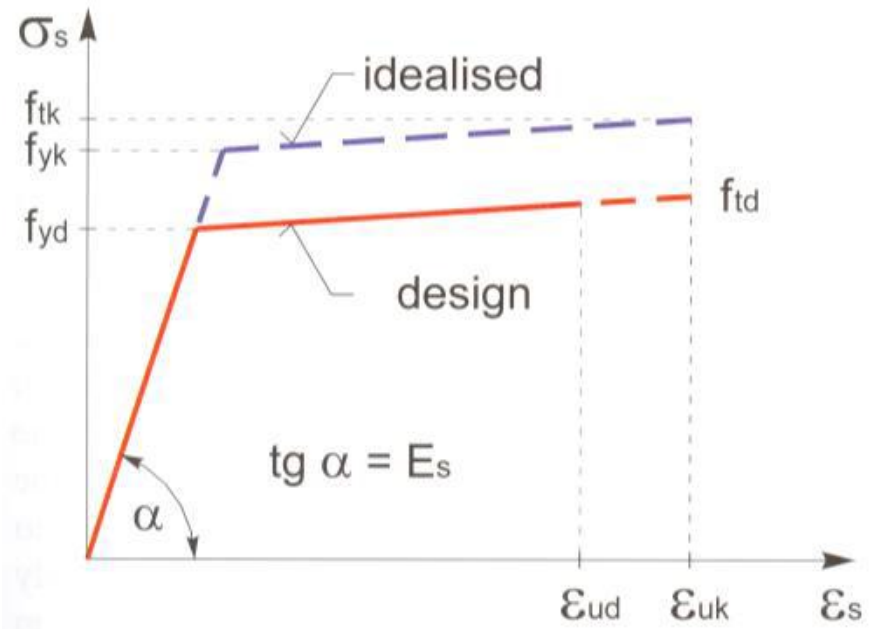
Granica popuštanja fy i vlačna čvrstoća ft čelika za armiranje mogu se povećati postupkom hladne obrade. Rezultat hladne obrade nije samo produljenje žice i plastična deformacija nego i poprečno suženje žice tj. redukcija ploštine presjeka. Ako se, pri ponovnom opterećenju žice, unešena sila odnosi na originalnu ploštinu presjeka (prije obrade), dijagram naprezanje-deformacija slijedi originalnu plastičnu granu. Ako se, međutim, unešena sila odnosi na ploštinu presjeka reduciranu tijekom obrade, dobiju se poboljšane karakteristike materijala, nova granica popuštanja i vlačna čvrstoća.



,

Slika 1 Radni dijagram čelika za armiranje

Radni dijagram naprezanje-deformacija može se za potrebe proračuna zamijeniti idealiziranim dijagramom naprezanje-deformacija, iz kojeg je dobiven proračunski dijagram naprezanjedeformacija. Većina propisa zasniva se na bilinearnom elasto-plastičnom dijagramu naprezanje-deformacija, ili alternativno, elasto-plastičnom dijagramu naprezanje-deformacija s očvršćivanjem.



Slika 2 Proračunski dijagram čelika za armiranje

U Hrvatskoj se sada, prema HRN EN 1992-1, tj prema pratećim normama HRN EN 206 i HRN EN 10080, koriste tri vrste čelika za armiranje, u obliku žica, šipki ili mreža. Na Slici 2.13 prikazane su te tri vrste u uobičajenoj formi kako se mogu naći na tržištu. Međutim, treba biti oprezan jer pojedini proizvođači armaturnog čelika preferiraju svoje vrste oblika šipke, kako je prikazano također na Slici 2



Slika 3 Oblici armaturnog čelika

2.2. Prednapregnuti beton

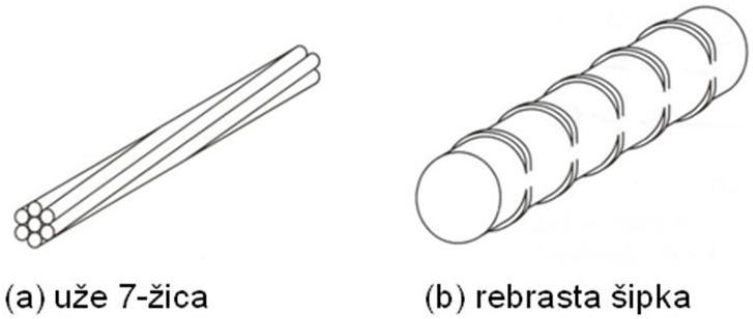
Pod tim se nazivom razumije armirani beton kojemu se armatura, obično čelična užad velike čvrstoće, prije zalijevanja betonskom mješavinom snažno napne, ili se ulaže u plastične cijevi pa napinje nakon otvrdnuća betonskog elementa, a krajevi se nakon postupka učvršćuju; napinjanje se obično provodi hidrauličnim prešama.

U betonu s prethodno napregnutom armaturom nastaje nakon očvršćenja i rasterećenja armature veliko tlačno naprezanje zbog stezanja armature. To se primjenjuje na onim mjestima u

betonu gdje bi se poslije, tijekom primjene, da je rađen bez prednaprezanja armature, pojavilo vlačno naprezanje. Ideju o prednapregnutom betonu dali su 1886. H. Jackson u SAD-u i 1888. W. Döhring u Njemačkoj, ali se on počeo upotrebljavati tek u XX. st. na temelju radova francuskog inženjera E. Freyssineta. Elementi prednapregnutih konstrukcija manjih su dimenzija od elemenata konstrukcija običnog armiranog betona.

2.2.1. 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. U pogledu kemijskog sastava rabi se nelegirani ili niskolegirani čelik. Suprotno 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. S druge strane, nisu mogući vareni čelični proizvodi za prednapinjanje betona. Čelik za prednapinjanje uglavnom se proizvodi u jednom od tri oblika: žice, užad i šipke.



Slika 4 Čelik za prednapinjanje

3. PARAMETRI ISPITIVANJA BETONA

3.1. Općenito

Očvrsnuli beton se ispituje dominantno na tlačnu čvrstoču u labaratorijskim uvijetima ispitivanjem kocke, valjka ili prizme. Kao rezultat labaratorijskih ispitivanja se dobivaju slijedeći parametri:

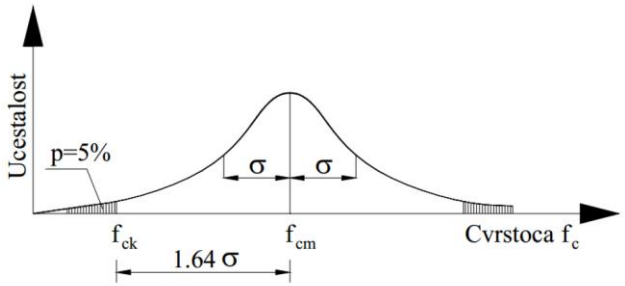
- Čvrstoća betona
- Elastična deformacija betona
- Modul elastičnosti
- Relativno produljenje ε

3.2. Čvrstoće betona

3.2.1. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća betona je sposobnost betona da se odupre djelovanju tlačne sile. Projektom propisana, odnosno uvjetovana tlačna čvrstoća betona naziva se: Karakteristična tlačna čvrstoća betona. Karakteristična tlačna čvrstoća se određuje na osnovi računa vjerojatnosti i statistike korištenjem rezultata ispitivanja probnih uzoraka u obliku valjka promjera baze 150 i visine 300 mm ili kocaka dimenzija 150x150x150 mm. Uzorci se uzimaju od svježeg betona, te čuvaju 28 dana u uvjetima od bar 95% vlažnost ili u vodi i na temperaturi 20C, nakon čega se lome i određuje njihova tlačna čvrstoća. Zahtijeva se da najmanje 95% svih rezultata pokaže čvrstoću veću ili jednaku zahtijevanoj klasi betona, odnosno da najviše 5% rezultata može biti manje čvrstoće od određene klase betona (5% fraktil). Pretpostavlja se da statistička raspodjela rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće slijedi Gaussovu krivulju.





Slika 5 Gaussova (lognormalna) krivulja raspodjele rezultata ispitivanja

U praksi, to znači da srednja tlačna čvrstoća (aritmetička sredina tlačnih čvrstoća svih uzoraka) (c_{kf}) mora biti veća od zahtijevane karakteristične tlačne čvrstoće f_{ck} uvećane za vrijednost k_1, a pojedinačna vrijednost tlačne čvrstoće svakog uzorka ($f_{ck,i}$) mora biti veća od zahtijevane karakteristične tlačne čvrstoće f_{ck} umanjene za vrijednost k_2, tj:

$$\bar{f}_{ck} \geq f_{ck} + k_1$$
$$f_{ck,i} \geq f_{ck} - k_2$$

Vrijednosti k_1 i k_2 ovise o broju uzoraka. Prema rezultatima ispitivanja normalni beton se razvrstava u 9 Razreda tlačne čvrstoće:

Razredi tlačne čvrstoće betona										Analitički izraz
Oznaka razreda	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60	
f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	
$f_{ck,cub}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	
f_{cm} [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	$f_{cm} = f_{ck} + 8\,[\text{MPa}]$
f_{ctm} [MPa]	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{(2/3)}$
$f_{ctk,0.05}$ [MPa]	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9	$f_{ctk,0.05} = 0.7 \cdot f_{ctm}$
$f_{ctk,0.95}$ [MPa]	2.0	2.5	2.9	3.3	3.8	4.2	4.6	4.9	5.3	$f_{ctk,0.95} = 1.3 \cdot f_{ctm}$
E_{cm} [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	$E_{cm} = 22[f_{cm}/10]^{0.3}$

Slika 6 Tablica razreda tlačne čvrstoče betona

Kako je vidljivo iz Tablice 2.1 oznaka razreda karakteristične tlačne čvrstoće betona sastoji se od velikog slova C (od engleske riječi „concrete “ - beton) i omjera $f_{ck}/f_{ck,cub}$ koji predstavljaju karakterističnu tlačnu čvrstoću betona uzorka valjka i karakterističnu tlačnu čvrstoću betona uzorka kocke.

3.2.2. Vlačna čvrstoća

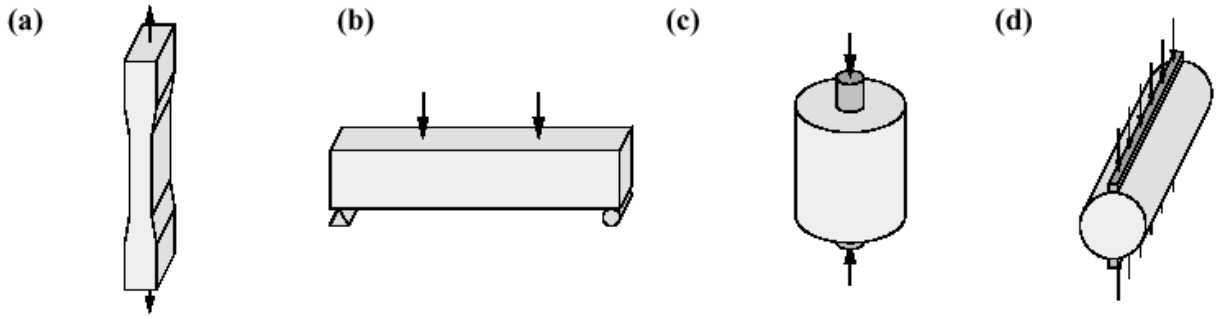
Vlačna čvrstoća betona je znatno manja od tlačne čvrstoće betona i znatno varira s obzirom na način ugradnje betona. Obično se koristi srednja osna vlačna čvrstoća betona (f_{ctm}), ali se također koristi i donja i gornja karakteristična vlačna čvrstoća ($f_{ctk,0.05}$, $f_{ctk,0.95}$). U Tablici su prikazane vlačne čvrstoće s obzirom na razred karakteristične tlačne čvrstoće betona. Orijentacijski, vlačna čvrstoća betona kreće se u granicama od 1/5 do 1/15 tlačne čvrstoće, ali je vrlo nepouzdana veličina.

Postoji više načina ispitivanja vlačne čvrstoće betona. Na Slici 6 prikazano je redom:

a) direktna metoda (direktno razvlačenje uzorka - određivanje čiste vlačne čvrstoće),

b) metoda savijanja uzorka (određivanje savojne vlačne čvrstoće),

c) metoda dvostrukog udarca, d) metoda cijepanja valjka. Sve metode daju (vrlo) različite rezultate, i može se generalno zaključiti: b>d>a.



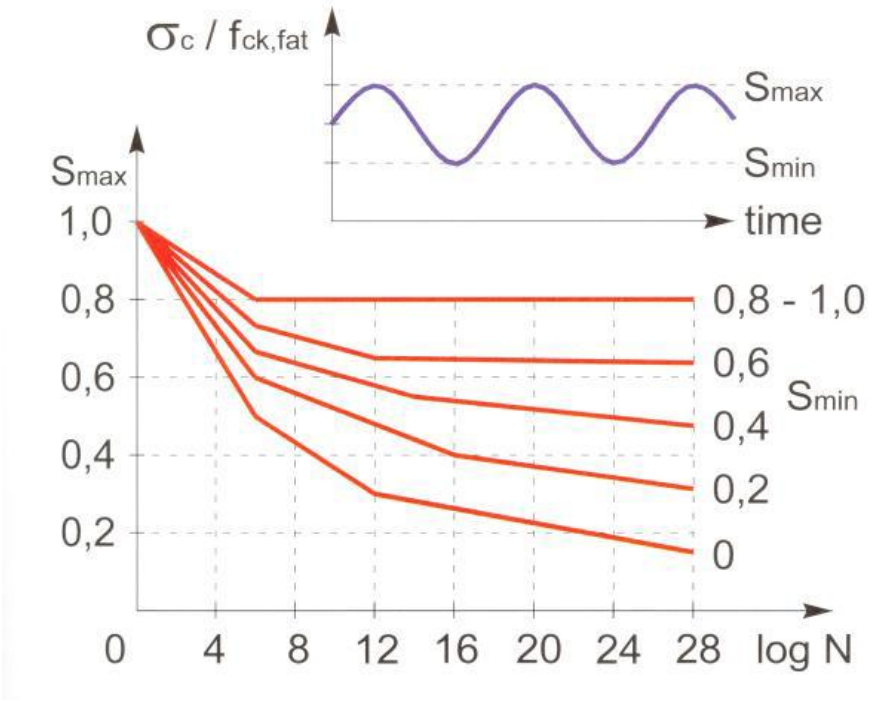
Slika 7 Načini ispitivanja vlačne čvrstoće betona

3.2.3. Čvrstoća betona na posmik, udar i zamor:

Posmik se gotovo nikada ne javlja u čistom obliku kod armirano betonskih konstrukcija, nego uvijek u kombinaciji sa normalnim naprezanjima. Čista posmična čvrstoća betona je negdje između vlačne i tlačne čvrstoće. Čvrstoća betona na udar važna je kod konstrukcija koje su izložene velikim udarnim opterećenjima, kao što su zabijani ab piloti, temelji strojeva s maljevima i sl. Pokusima se nije uspjela ustanoviti veza između tlačne čvrstoće betona i čvrstoće na udar, ali je evidentno da čvrstoća na udar raste s porastom tlačne čvrstoće betona. Ako su ab konstrukcija ili neki njen element podvrgnuti cikličkom opterećenju, oni će se slomiti pri manjem opterećenju nego što bi to bilo za mirno, statičko opterećenje. Ovo se događa zbog zamora materijala. Generalno, ab konstrukcije izložene izrazitom cikličkom opterećenju smiju se maksimalno opteretiti do 60% statičkog opterećenja.

U konstrukcijama izloženim dinamičkom opterećenju, svojstva materijala na zamor su također od posebnog značaja. Ona se dobivaju iz ispitivanja kada je ispitani uzorak izložen naprezanjima koja se mijenjaju od minimalne do maksimalne vrijednosti. Obično se navode relativne vrijednosti maksimalnog i minimalnog naprezanja σ_{max} i σ_{min} u odnosu na statičku čvrstoću betona. Slom ispitivanog uzorka nastaje nakon određenog broja ciklusa. Rezultat ispitivanja je niz krivulja čvrstoće na zamor koje su također poznate kao S-N krivulje ili Wohler krivulje. Kod betona, one predstavljaju odnos između maksimalnog naprezanja σ_{max} i broja

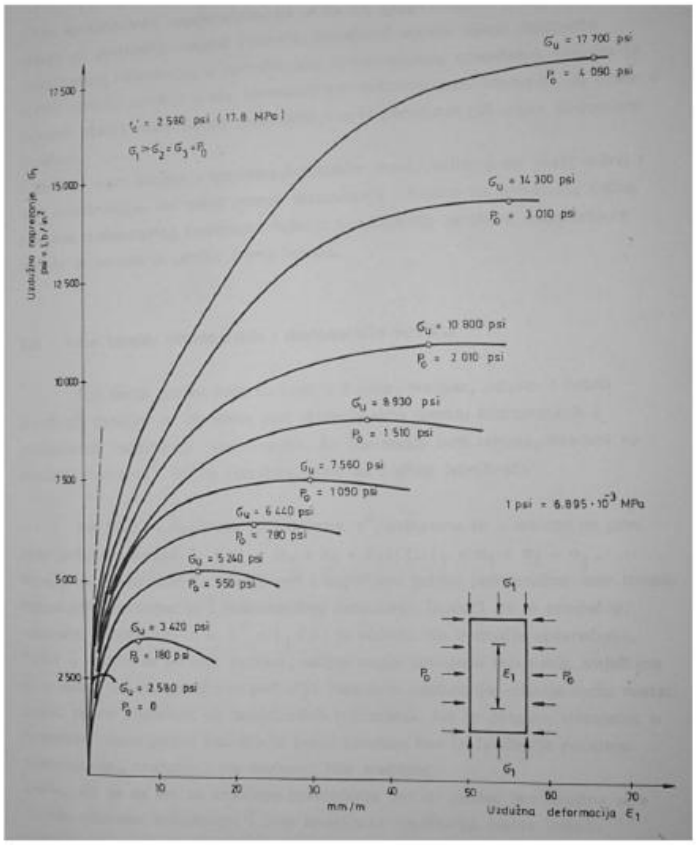
ciklusa N pri kojem se ispitivani uzorak slomio. Odnos je uvijek definiran za određeni nivo minimalnog naprezanja σmin, slika 10.



Slika 8 S-N krivulje za beton opterećen na tlak

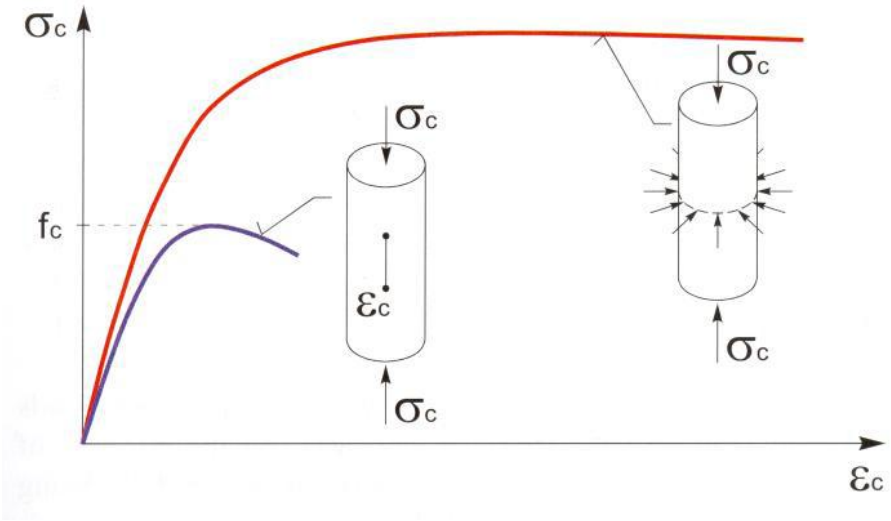
3.2.4. Višeosne čvrstoće betona

Višeosna čvrstoća betona znatno je veća od jednoosne čvrstoće. Kod dvoosnog stanja naprezanja odnos dvoosne prema jednoosnoj čvrstoći je oko 1.25-1.40, a kod troosnog stanja naprezanja odnos troosne prema jednoosnoj čvrstoći je čak 4-7 puta.



Slika 9 Troosno stanje naprezanja

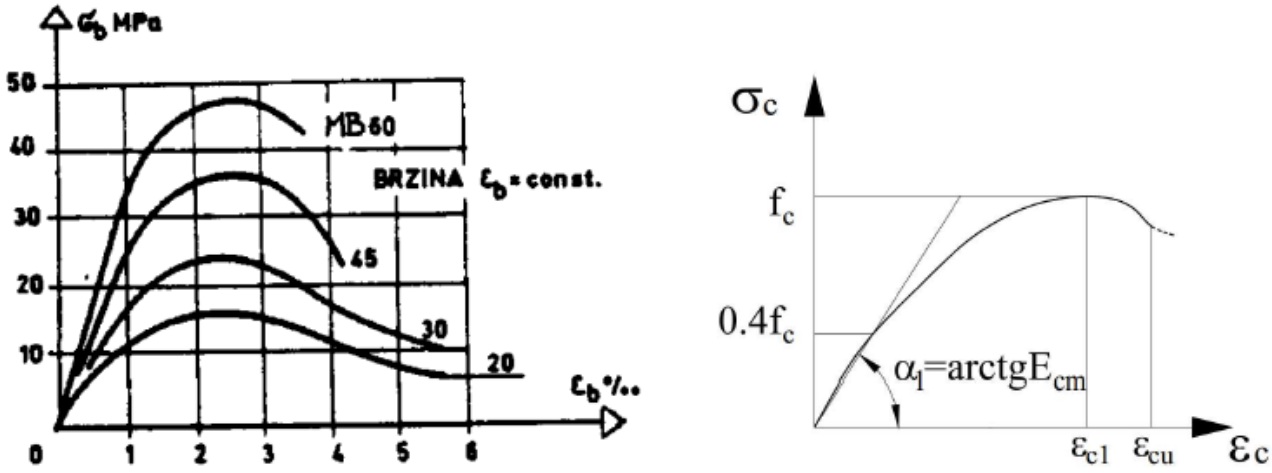
Kao što je ranije spomenuto, poprečni tlak povećava čvrstoću betona. Povećanje čvrstoće događa se zbog smanjenja poprečne deformacije. Poprečni tlak sprječava (I) razvoj pukotina koje su paralelne sa smjerom opterećenja, i (II) formiranje odvojenih privremenih zona u betonu – drugim rječima, takve zone su pritisnute poprečno jedna naspram druge. Kao rezultat, njihovo kontaktno trenje se povećava, i stoga ne nastaje slom posmikom. Radi objašnjenja ove pojave možemo upotrijebiti npr. Mohr-Coulomb kriterij sloma.



Slika 10 Efekt poprečnog tlaka na dijagramu naprezanje-deformacija betona

3.3. Elastične deformacije betona

Beton je sam po sebi nelinearan materijal. Nanošenjem opterećenja u relativno kratkom periodu, deformacije rastu kvazi-linearno do naprezanja koje je približno jednako 0.4 fcm. Nakon toga ponašanje je izrazito nelinearno (Slika 2.7). Maksimalno naprezanje (čvrstoća) dostiže se pri deformaciji nešto većoj od 2‰, a zatim čvrstoća postupno opada. Kompletan lom događa se pri deformaciji nešto većoj od 3.5‰. Prema dijagramu na Slici 2.7, lako je primijetiti da betoni niže klase čvrstoće imaju veću sposobnost deformiranja od betona viših klasa čvrstoće. Valja napomenuti da oblik dijagrama naprezanje-deformacija bitno ovisi o brzine nanošenj opterećenja. Kada se opterećenje nanosi u dugom vremenskom periodu (npr. godinu dana), lom uzorka nastaje pri nekoliko puta većim deformacijama i pri naprezanjima koja su oko 15% manja u odnosu na uzorak koji je opterećen u kratkom vremenskom roku.



Slika 11 Dijagram naprezanje-deformacija za beton

3.4. Modul elastičnosti

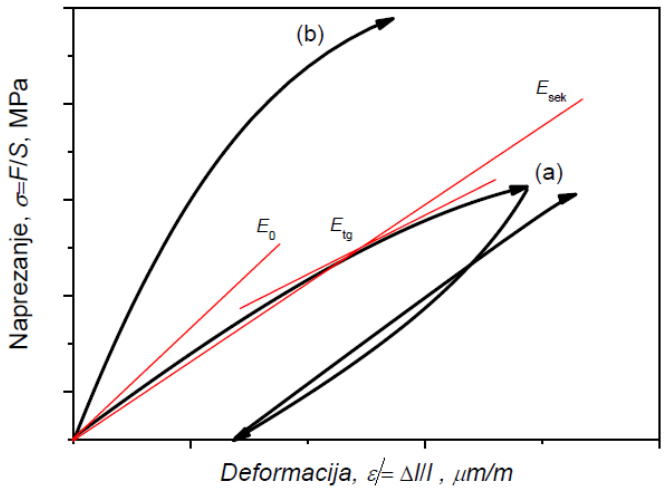
Modul elastičnosti je osnovni parametar koji opisuje krutost betona. Ovisi o nekoliko parametara, i to o sastavu betona, čvrstoći i gustoći betona te vrsti agregata. Može se eksperimetalno odrediti preko Hooke-ovog zakona, ali su rezultati ispitivanja osjetljivi na način i trajanje opterećenja, koje je različito predviđeno u različitim propisima.

Kako su ispitivanja modula elastičnosti zahtjevnija od ispitivanja tlačne čvrstoće betona, propisi često daju formulu koja se može koristiti za proračun modula elastičnosti preko čvrstoće betona i eventualno njegove gustoće. Međutim, modul elastičnosti određen na ovaj način može značajno odstupati od stvarne vrijednosti. Ova razlika može biti, ovisno o vrsti formule do ±20%.

Većina propisa koriste probnu veličinu, poznatu kao sekantni modul elastičnosti Ecm koji se može dobiti iz nagiba pravca koji povezuje ishodište dijagrama naprezanje-deformacija (σc=0) i točku koja približno predstavlja granicu proporcionalnosti u betonu, slika 7.

3.4.1. Statički modul elastičnosti

Statički modul elastičnosti cementnog materijala dobiva se ispitivanjem uzorka oblika prizme (*a*:*h*=1:3) ili valjka (*d*:*h*=1:3). Uzorak se opterećuje na pritisak u smjeru dulje osi, a deformacije se mjere u srednjoj trećini, za koju se uzima, da su naprezanja uniformna (monoaksijalna). Sile (*F*) i odgovarajuće promjene duljine (Δ*l*) se očitavaju nakon svakog ciklusa povećanja opterećenja, a naprezanja (*σ*) i relativne deformacije (*ε*) se dobiju dijeljenjem s površinom odnosno mjernom duljinom, slika 11.



,

Slika 12 Radni dijagram cementnih uzoraka opterećenih na pritisak: a) beton manje čvrstoće, b) beton velike čvrstoće.

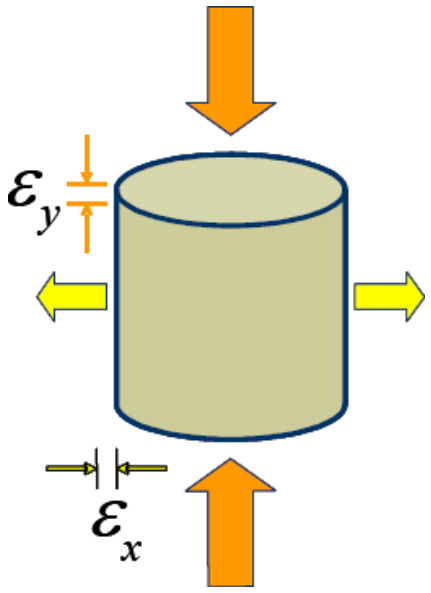
Radni dijagram je uvijek malo zakrivljena linija, tako da je modul elastičnosti (E_0) samo aproksimacija stvarnog ponašanja betona. Nelinearnost je utoliko veća, ukoliko se opterećenje sporije nanosi, te ukoliko se naprezanje više povećava. To je najvećim dijelom posljedica puzanja betona. Za betone većih čvrstoća modul elastičnosti je veći, a radni dijagram se bliži pravocrtnom (Slika 11). Također, ukoliko se primijeni veći broj ciklusa rasterećenja/opterećenja radni dijagram se približava pavocrtnom ("*treniranje* uzorka"), jer dolazi do konsolidacije u strukturi betona. Na prvoj krivulji radnog dijagrama mogu se odrediti tri vrste statičkog modula elastičnosti: početni, koji je najveći, sekantni i tangentni. Za praksu je važno odrediti modul elastičnosti na radnom dijagramu nakon što se ovaj stabilizirao *treniranjem* uzorka (početno pred-opterećenje od 10% od čvrstoće do naprezanja jednakog približno 40% od čvrstoće uzorka). Početno naprezanje od 10% nanosi se prije početka mjerenja, da se izbjegnu početne neravnomjernosti u mjerenju deformacija, koje su posljedica neravnosti kontaktnih ploha.

Ako materijal opteretimo na pritisak u smjeru osi *y* (Slika 12) tada je Poissonov omjer

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}$$

gdje je ε_x - transverzalna deformacija (negativno za aksijalno vlačno naprezanje, pozitivno za aksijalno tlačno naprezanje)

ε_y – aksijalna deformacija (pozitivna za aksijalno vlačno naprezanje, negativna za aksijalno tlačno naprezanje).



Slika 13 Pravokutni uzorak opterećen na pritisak, Poissonov omjer v ~ 0,5 (guma)

Za hidratiziranu cementnu pastu Poissonov omjer se malo mijenja s promjenom vodo-cementnog omjera, a smanjuje se sa smanjenjem vlažnosti. Za vlažnu hidratiziranu cementnu pastu približno je 0,25, a za suhi oko 0,15. Za linijske elemente betonskih konstrukcija Poissonov omjer se ne uzima u obzir pri proračunu. Kod plošnih i prostornih elemenata uzima se prosječna vrijednost 0,20.

3.4.2. Dinamički modul elastičnosti

Dinamički modul elastičnosti, posmičnosti, stlačivosti i Poissonov omjer dobiva se mjerenjem brzine prolaza ultrazvuka kroz beton ili mjerenjem rezonantne frekvencije normiranog uzorka betona.
Uporaba ultrazvuka je vrlo raširena, a pri ispitivanju materijala ta se metoda koristi za:

- karakterizaciju svojstava (procjena tlačnih čvrstoća, gustoća, modul elastičnosti, poroznost)
- pronalaženje defekata u materijalu.

Dvije osnovne vrste valova su:

- longitudinalni val (L-val): čestice titraju u smjeru širenja vala (zgusnuća i razrjeđenja u sredstvu u kojem se širi)
- transverzalni val (T-val), čestice titraju okomito na smjer širenja vala.

Postoji mnogo vrsta valova koji nastaju kombinacijom longitudinalnog i transverzalnog titranja. Na površinu betona, na određenoj udaljenosti (L) postave se generator ultrazvučnog impulsa i prijemnik. Iz izmjerene udaljenosti i vremena prolaza izračuna se brzina (v, km/s). Onda je dinamički modul elastičnosti [GPa]:

$$E = \frac{v_L^2 \rho}{K}$$

gdje je ρ gustoća uzorka [g cm^{-3}], a koeficijent K iznosi:

$$K = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

3.5. Relativno produljenje ε

Relativno produljenje ε (duljinska ili uzdužna deformacija) štapa ili šipke je produljenje s obzirom na početnu duljinu L_o. Početno je naprezanje linearno (deformacija je izravno razmjerna naprezanju). U području linearnog rastezanja (Hookeov zakon) materijal je elastičan i nakon prestanka djelovanja sile, odnosno naprezanja, on se vraća u početno stanje. Youngov modul elastičnosti je omjer naprezanja i relativnog produljenja (u području elastičnosti).
Tehnička granica elastičnosti je naprezanje pri kojem osjetljiva mjerila osjete prvo primjetno trajno produljenje materijala (pri još nepromijenjenom presjeku A_o). Nakon te granice (obično na kraju linearnog rastezanja) materijal se rasteže plastično i nakon prestanka djelovanja sile ne vraća se više na početnu duljinu L_0, već ostaje određeno trajno produljenje, uz suženje presjeka, $A < A_0$).

3.6. Poissonov koeficijent

Poissonov omjer ili Poissonov koeficijent se određuje kao omjer poprečne (horizontalne) i uzdužne (vertikalne) deformacije nekog materijala prilikom tlačnog ispitivanja. Poissonov koeficjent ili omjer bio bi jednak 0,5 kada se obujam tijela prilikom rastezanja ne bi promijenio. Dobio je naziv prema Siméonu Poissonu (1781. – 1840.), francuskom fizičaru i matematičaru. Ako se materijal tlači u smjeru jedne osi, onda se on širi u smjeru druge dvije osi. Većina materijala ima Poissonov omjer u području od 0 do 0,5. Čelik i tvrdi polimeri imaju Poissonov omjer oko 0,3. Guma ima gotovo vrijednost 0,5, dok za pluto iznosi 0. Za Poissonov omjer vrijedi:

$$\nu = - \frac{d\varepsilon_{trans}}{d\varepsilon_{axial}} = - \frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_x} = - \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_x}$$

gdje je:

ν - Poissonov omjer,
$d\varepsilon_{trans}$- poprečno (transverzalno) suženje ili skupljanje
$d\varepsilon_{axial}$- uzdužno (aksijalno) produljenje .

3.6.1. Uzrok Poissonovog djelovanja

Na molekularnom nivou, Poissonovo djelovanje nastaje zbog malog pomicanja između molekula i istezanja molekularnih veza unutar kristala materijala, te prilagodbe naprezanju. Kada se kemijska veza istezne u smjeru sile koja ju razvlači, onda se okomito na smjer djelovanja sile kemijske veze skraćuju. To se događa na mnogobrojnim mjestima unutar kristala i tako nastaje ta pojava.

3.6.2. Poissonov omjer za različite materijale

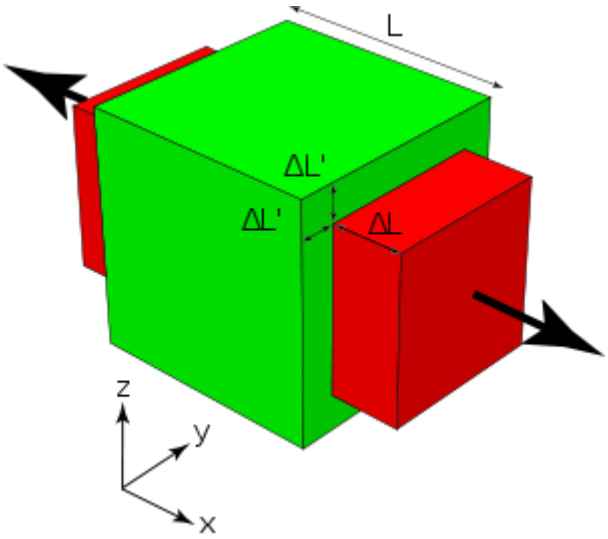
Materijal	Poissonov omjer
čelik	0,27–0,30
zlato	0,42
zasićena glina	0,40–0,50
titanij	0,34
staklo	0,18–0,3
pluto	~ 0,00
pjena	0,10–0,40
pijesak	0,20–0,45
nehrđajući čelik	0,30–0,31
magnezij	0,35
lijevano željezo	0,21–0,26
legure aluminija	0,33
guma	~ 0,50
glina	0,30–0,45
beton	0,20
bakar	0,33
auksetik	negativan

Slika 14 Poissonov omjer za različite materijale

3.6.3. Primjena Poissonovog koeficjenta

Poissonov omjer ima najveći utjecaj na protok fluida pod velikim tlakom. Kada je fluid unutar cijevi pod velikim tlakom, cijev se širi. Zbog Poissonovog djelovanja dogodit će se da će promjer cijevi povećati, a po duljini cijevi će se primjetno skratiti, što može utjecati na spoj cijevi, te naprezanja u spoju mogu dovesti do oštećenja ili deformacije, a ponekad i do loma materijala.

Pluto se upotrebljava kao čep za boce upravo iz razloga što mu je Poissonov omjer jednak 0. Dio pluta koji je već u grlu boce, neće vršiti naprezanje na dio pluta koji je izvan grla boce, pa se lagano može dalje pluto utisnuti, budući da treba savladati samo silu trenja. Kada bi čep bio od gume, dio koji je unutar grla boce bi stvorio veliku silu, pa bi utiskivanje takvog čepa bilo izuzetno teško.



Slika 15 Primjer kocke napregnute na vlak

Kada je kocka s duljinom stranice L, od izotropnog elastičnog materijala napregnuta na vlak (rastezanje) u smjeru osi x, ona se produlji za vrijednost ΔL, a u smjeru drugih dviju osi materijal se suzi ili skupi za pola duljine ΔL. Za izotropne elastične materijale Poissonov omjer je 0,5.

3.6.4. Poissonova jednadžba

Poissonova jednadžba je nehomogena linearna diferencijalna jednadžba drugoga reda koja služ za rješavanje niza zadataka matematičke fizike, kao što su na primjer preračunavanje elektrostatičkoga potencijala pri danom rasporedu nabojaili razdiobe temperature u tijelu kojemu se krajevi drže na konstantnim temperaturama, na primjer:

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

gdje je: Δ - Laplaceov operator (Pierre-Simon Laplace), φ - električni potencijal, ρ - gustoća prostornoga naboja , ε0 - dielektričnost polja (dielektrična konstanta vakuuma). Za većinu stijena iznosi oko 0,25, dok za tekućine i plinove doseže najveću moguću vrijednost od 0,5. Jedna je od veličina o kojoj ovisi brzina rasprostiranja elastičnih valova, što se koristi pri proučavanju potresa.

Za kocke rastezene u x-smjeru s porastom duljine u x smjeru, i smanjenjem duljine u y i z smjerovima, dan je matematički izraz koji opisuje Poissonov omjer:

$$d\varepsilon_x = \frac{dx}{x} \qquad d\varepsilon_y = \frac{dy}{y} \qquad d\varepsilon_z = \frac{dz}{z}.$$

Integral ovog izraza definira Poissonov omjer:

$$-\nu \int_L^{L+\Delta L} \frac{dx}{x} = \int_L^{L-\Delta L'} \frac{dy}{y} = \int_L^{L-\Delta L'} \frac{dz}{z}.$$

Rješavanjem integrala dobiva se:

$$\left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right)^{-\nu} = 1 - \frac{\Delta L'}{L}.$$

Za vrlo male vrijednosti dobiva se konačni izraz Poissonovog omjera:

$$\nu \approx \frac{\Delta L'}{\Delta L}.$$

Modul elastičnosti za homogene izotropne materijale

Maseni modul (K) Young's modul (E) Lamé's (λ) posmični modul (G, μ) Poissonov omjer (ν) P-val modulus (M)

Homogena linearni izotropni elastični materijali imaju jedinstvena elastična svojstva. Modul elastičnosti može se izračunati prema ovim formulama.

	$K =$	$E =$	$\lambda =$	$G =$	$\nu =$	$M =$	Zabilješka
(K, E)	K	E	$\frac{3K(3K-E)}{9K-E}$	$\frac{3KE}{9K-E}$	$\frac{3K-E}{6K}$	$\frac{3K(3K+E)}{9K-E}$	
(K, λ)	K	$\frac{9K(K-\lambda)}{3K-\lambda}$	λ	$\frac{3(K-\lambda)}{2}$	$\frac{\lambda}{3K-\lambda}$	$3K-2\lambda$	
(K, G)	K	$\frac{9KG}{3K+G}$	$K-\frac{2G}{3}$	G	$\frac{3K-2G}{2(3K+G)}$	$K+\frac{4G}{3}$	
(K, ν)	K	$3K(1-2\nu)$	$\frac{3K\nu}{1+\nu}$	$\frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$	ν	$\frac{3K(1-\nu)}{1+\nu}$	
(K, M)	K	$\frac{9K(M-K)}{3K+M}$	$\frac{3K-M}{2}$	$\frac{3(M-K)}{4}$	$\frac{3K-M}{3K+M}$	M	
(E, λ)	$\frac{E+3\lambda+R}{6}$	E	λ	$\frac{E-3\lambda+R}{4}$	$\frac{2\lambda}{E+\lambda+R}$	$\frac{E-\lambda+R}{2}$	$R=\sqrt{E^2+9\lambda^2+2E\lambda}$
(E, G)	$\frac{EG}{3(3G-E)}$	E	$\frac{G(E-2G)}{3G-E}$	G	$\frac{E}{2G}-1$	$\frac{G(4G-E)}{3G-E}$	
(E, ν)	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	E	$\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	ν	$\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	
(E, M)	$\frac{3M-E+S}{6}$	E	$\frac{M-E+S}{4}$	$\frac{3M+E-S}{8}$	$\frac{E-M+S}{4M}$	M	$S=\pm\sqrt{E^2+9M^2-10EM}$ $\nu \geq 0.$ $\nu \leq 0.$

$(\lambda,\, G)$	$\lambda + \frac{2G}{3}$	$\frac{G(3\lambda+2G)}{\lambda+G}$	λ	G	$\frac{\lambda}{2(\lambda+G)}$	$\lambda + 2G$	
$(\lambda,\, \nu)$	$\frac{\lambda(1+\nu)}{3\nu}$	$\frac{\lambda(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu}$	λ	$\frac{\lambda(1-2\nu)}{2\nu}$	ν	$\frac{\lambda(1-\nu)}{\nu}$	$\nu = 0 \Leftrightarrow \lambda = 0$
$(\lambda,\, M)$	$\frac{M+2\lambda}{3}$	$\frac{(M-\lambda)(M+2\lambda)}{M+\lambda}$	λ	$\frac{M-\lambda}{2}$	$\frac{\lambda}{M+\lambda}$	M	
$(G,\, \nu)$	$\frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	$2G(1+\nu)$	$\frac{2G\nu}{1-2\nu}$	G	ν	$\frac{2G(1-\nu)}{1-2\nu}$	
$(G,\, M)$	$M - \frac{4G}{3}$	$\frac{G(3M-4G)}{M-G}$	$M - 2G$	G	$\frac{M-2G}{2M-2G}$	M	
$(\nu,\, M)$	$\frac{M(1+\nu)}{3(1-\nu)}$	$\frac{M(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}$	$\frac{M\nu}{1-\nu}$	$\frac{M(1-2\nu)}{2(1-\nu)}$	ν	M	

3.7. Hookeov zakon

Hookeov zakon je zakonitost koja opisuje ovisnost promjene oblika čvrstoga tijela u obliku štapa o djelovanju vanjske sile, što ju je utvrdio Robert Hooke. Opterećenjem izazvano naprezanje σ razmjerno je deformaciji ε, odnosno:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Faktor razmjernosti E je modul elastičnosti i karakterističan je za pojedini materijal. Do određene granice naprezanja Hookeov zakon može se primijeniti na većinu konstrukcijskih materijala. Za složenija opterećenja tijela različitih oblika rabi se Hookeov zakon u poopćenom obliku, koji se izražava s više skalarnih linearnih jednadžba.

3.7.1. Primjena Hookeovog zakona

Ako je šipka ili štap od nekog elastičnog materijala, onda i nju možemo promatrati kao oprugu. Šipka ima duljinu L i poprečni presjek A. Ako šipku razvlačimo s nekom silom F, onda u njoj nastaje naprezanje σ, koje se opire vanjskoj sili. Tada Hookeov zakon možemo pisati u drugom obliku:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad \text{ili} \qquad \Delta L = \frac{F}{E \cdot A} \cdot L = \frac{\sigma}{E} \cdot L$$

gdje je: σ – naprezanje u šipki ili štapu (N/mm^2), E – Youngov modul elastičnosti (N/mm^2), ε – omjer produljenja šipke ili štapa i njene duljine (bez dimenzije ili ΔL / L), L – duljina štapa, ΔL - produljenje šipke ili štapa (mm), F – sila koja produljuje šipku ili štap (N), A – poprečni presjek šipke ili štapa (mm^2).

Hookeov zakon vrijedi samo u određenom području nekog materijala, koje se naziva elastično područje. Za čelik je elastično područje sve do granice razvlačenja ili gdje ta granica nije jasno određena, do granice plastičnosti koja je određena onim naprezanjem pri kojem nastaje trajno produljenje od 0,2% prvobitne dužine šipke ili štapa. Ovo naprezanje nosi oznaku $\sigma_{0,2}$.

3.7.2. Opruge

Ako se tijelo na elastičnoj opruzi pomakne iz ravnotežnog položaja, tj. ako se opruga rastegne ili stisne, djelovat će povratna sila (elastična sila opruge), koja će nastojati tijelo vratiti u ravnotežni položaj. Iznos te sile je proporcionalan pomaku tijela iz ravnotežnog položaja. Dakle, ako je pomak *x*, povratna sila je:

$$F = K \cdot X$$

Koeficijent proporcionalnosti *k* je konstanta opruge (ovisi o njenim dimenzijama, obliku i materijalu od kojega je izrađena).

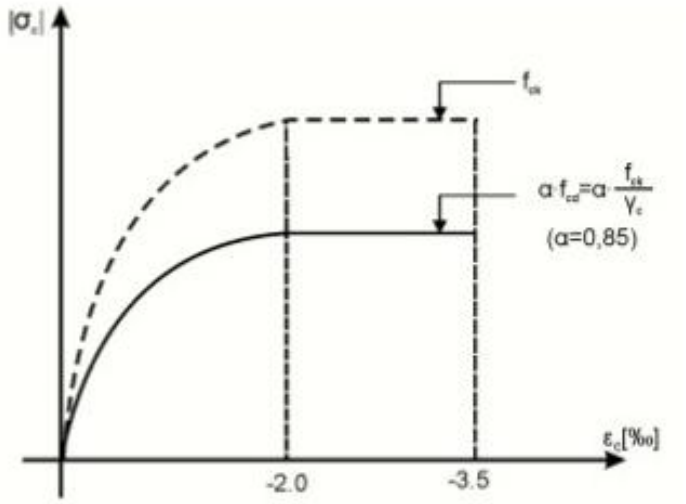
3.7.3. Dijagram naprezanja

Dijagram naprezanja prikazuje medusobnu ovisnost σ - vlačnog naprezanja i ε - relativnog produljenja ili linijske vlačne deformacije. U materijalu koji je opterećen nekom silom *F* nastaju naprezanja σ koja uzrokuju njegovo rastezanje. Naprezanje σ je omjer sile *F* i plošine *A* presjeka štapa ili šipke (okomitog na smjer sile).

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Zbog djelovanja sile *F* (a time nastalog naprezanja σ) štap ili šipka će se od početne duljine L_0 rastegnuti na duljinu *L*. Tako je produljenje štapa ili šipke:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{L - L_o}{L_o}$$



- Gornja granica vrijednosti napona je:

$$\sigma_c = \alpha \times f_{cd} = \alpha \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

Klase čvrstoće betona ($f_{ck}/f_{ck,cube}$)		C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60	
$f_{cd}=f_{ck}/\gamma_c$	$\gamma_c=1,5$	8,0	10,7	13,3	16,7	20,0	23,3	26,7	30,0	33,3	MPa
	$\gamma_c=1,3$	9,2	12,3	15,4	19,2	23,1	26,9	30,8	34,6	38,5	MPa

Slika 16 Dijagram naprezanja

4. MJERNI PRIBOR

4.1. Tehničke karakteristike i svojstva mjerne opreme

Za mjerenje deformacija koristi se elektrootporni tenzometri za beton, različitih dimenzija s pratećom opremom



(а)



(б)

а) Kompletna mjerna oprema

б) HBM univerzalno 8-kanalno pojačalo Quantum-X MX840-A

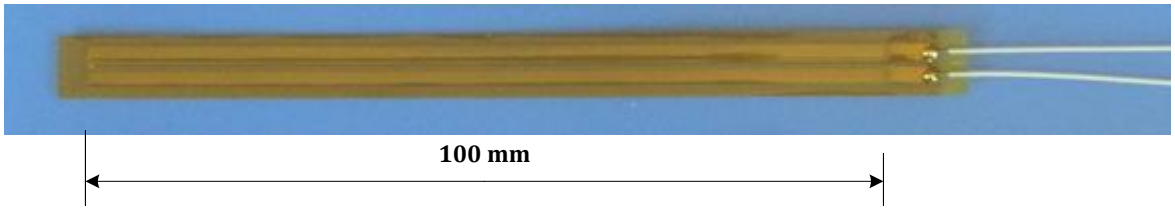
Slika 17HBM mjerna oprema

Specifikacije mjerenja pojačalom dane su u nastavku

5 mV/V CF strain gauge half bridge with 1 V or 2.5 V excitation (AC, effective)		
Accuracy class		0.1
Carrier frequency (sine)	Hz	4,800 ± 1.5
Bridge excitation voltage (effective)	V	1 and 2.5 (± 5 %)
Transducers that can be connected		strain gauge half bridges
Permissible cable length between MX840A and transducer	m	100
Measuring ranges at 2.5 V excitation at 1 V excitation	 mV/V mV/V	 ± 5 ± 10
Measurement frequency range (–3 dB)	kHz	0 ... 1.6
Transducer impedance at 2.5 V excitation at 1 V excitation	 Ω Ω	 300 ... 1,000 80 ... 1,000
Noise at 25 °C and 2.5 V excitation (peak to peak) with filter 1 Hz Bessel with filter 10 Hz Bessel with filter 100 Hz Bessel with filter 1 kHz Bessel	 µV/V µV/V µV/V µV/V	 < 0.5 < 0.7 < 1 < 4
Linearity error	%	< 0.02 of full scale
Zero drift (2.5 V excitation)	% / 10 K	0.1 of full scale
Full-scale drift (2.5 V excitation)	% / 10 K	< 0.1 of measurement value

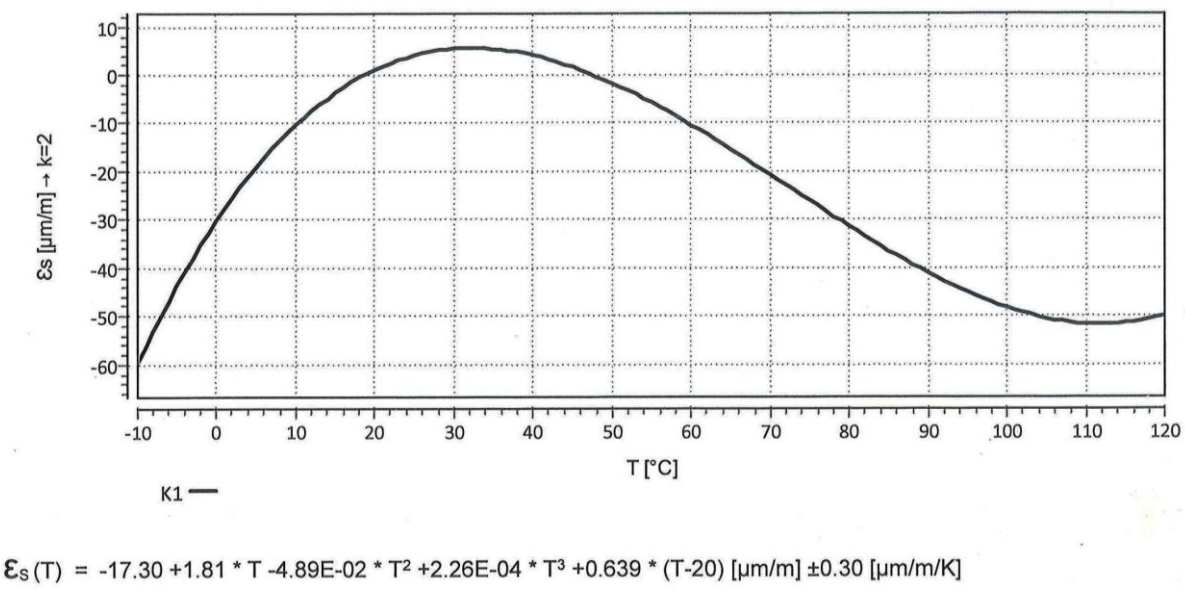
Slika 18 Specifikacije mjerenja na „polumost“ na pojačalu HBM MX840A

Za mjerenje deformacija koriste se dva tipa elektrootpornih tenzometara. Detaljne specifikacije tenzometara date su u nastavku.



Tenzometar $6/120\ LY41$*, mjernog otpora* 120Ω *za beton*

Otpor:	$120\Omega \pm 0.35\%$
koeficijent osjetljivosti tenzometra	$2.08 \pm 1.0\%$
Poprečna osjetljivost	$-1.8\ \%$
Tip	$100/120\ LY41$
Temperaturni koeficijenti	$93 \pm 10[10^{-6}/K]$ $(-10°C \ldots . +45°C)$
koeficijent toplinskog rastezanja	$\alpha = 10.8[10^{-6}/K]$



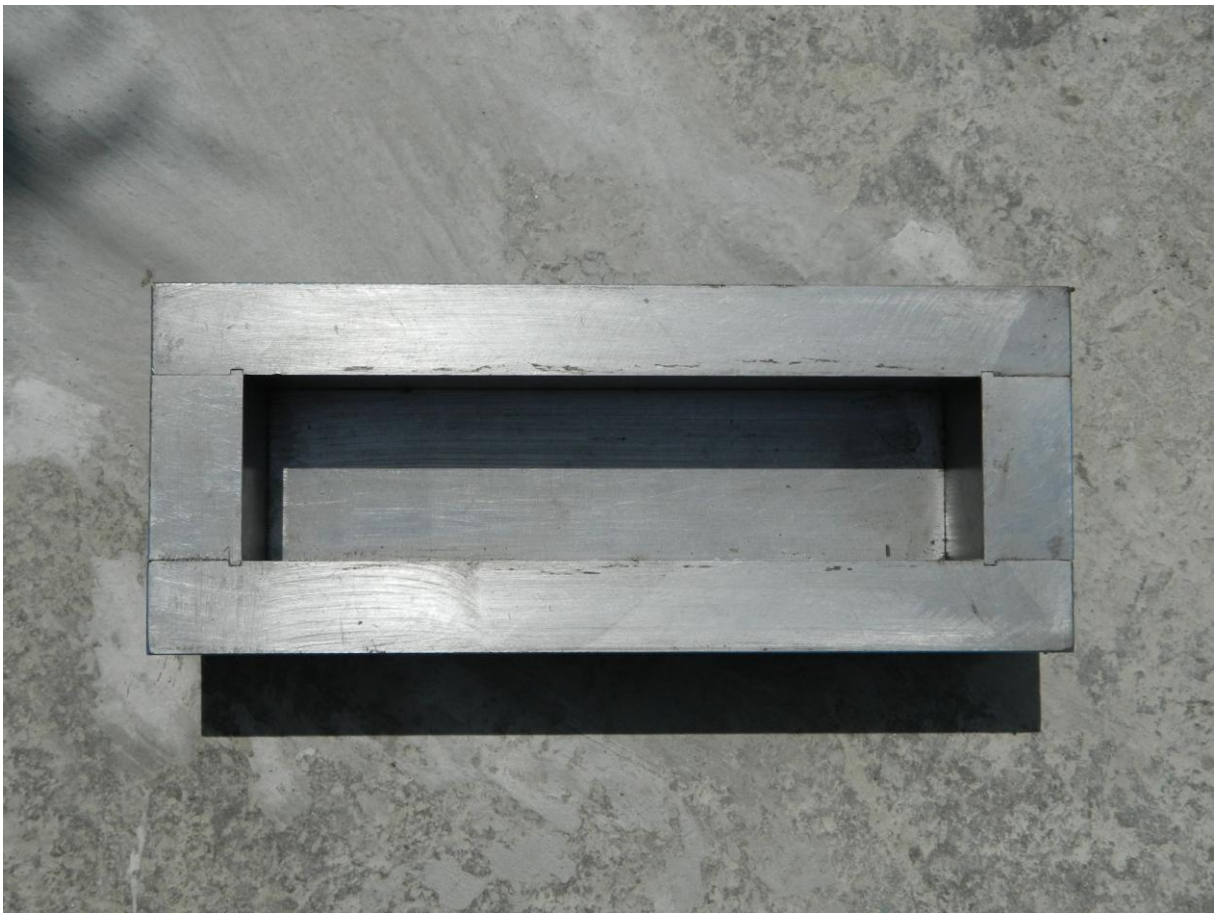
Slika 19Deformacija tenzometra ovisno o promjeni temperature

Ljepljenje tenzometara na beton obavlja se sa dvokomponentnim ljepilom X60 koje se sastoji od tekućeg dijela (B) i praška(komponenta A).Za zaštitu tenzometara od vlage (onih ugrađenih u beton) koristi se zaštitni kit AK22 na prirodnoj bazi kaučuka. Njegova osnovna prednost je da štiti od udara i vlage a da pritom ne stvrdnjava, tako da ne ometa mjerni proces. Također se za potpunu zaštitu koristiti dodatak plastelina, te ABM75, aluminijska folija debljine 0,05 mm obložena ljepljivim gnječivim spojem.

5. KONSTRUKCIJA I BETONIRANJE MODELA

5.1. Konstrukcija modela prizmi

Kalupi dimenzija 15x15x40cm moraju biti čvrsti, te od materijala koji ne upija vodu (čelik, polimer) i u njih se ugrađuje i zbija beton po propisanoj proceduri. U kalupu stoji 24 sata u prostoriji propisane temperature i vlažnosti, a onda se vadi iz kalupa i ostavlja do dana ispitivanja u istim uvjetima ili se stavlja u vodu. Ispitivanje se vrši kod starosti betona od 28 dana.



Slika 20 Kalup za betoniranje betonskih prizmi

5.2. Betoniranje modela prizmi

Betoniranje modela betonskih prizmi izvršeno je betonom iznimne kvalitete marke C25/30 , sastava 303 A. Beton sastava 303A je trofrakcijski beton sa dodatkom superplastifikatora (Glenium sky 510) za postizanje visokih čvrstoća i dodatkom aeranta (Micro-air) za postizanje mikropora da se postigne otpornost na mraz i sol.



Slika 21 Betoniranje modela betonskih prizmi

6. PROVEDBA ISPITIVANJA

6.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Ispitivanje tlačne čvrstoće betona vrši se na probnom tijelu izrađenom od očvrsnog betona, u obliku prizme dimenzija 15x15x40 cm. Za mjerenje deformacija koristi se elektrootporni tenzometri za beton, različitih dimenzija s pratećom opremom koji su zaljepljeni na prizme. Ispitivanje na pritisak vrši se pomoću preše. Preciznost preše, ravnost pritisnih ploča i drugo propisuje se standardom. Probno tijelo mora biti u vodom zasićenom stanju, a površine se obrišu. Izmjeri se masa i sve dimenzije probnog tijela te se izračuna volumna masa betona. Tijelo se stavi u prešu i opterećuje do sloma. Sila loma mjeri se instaliranom mikrourom koja bilježi pomake cilindra tijekom nanošenja sile.



Slika 22 Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Rezultat ispitivanja je tlačna čvrstoća: fck = sila (F) / površina poprečnog presjeka (A)

7. REZULTATI ISPITIVANJA

U varaždinskoj tvrtki Zagorje tehnobeton izvedena su eksprimentalna ispitivanja modela betonskih prizmi. Svrha ispitivanja bila je dobiti jasni uvid u ponašanje dvanaest betonskih prizmi proizvedenih od istog betona marke C25/30, sastava 303A. Iz rezultata ispitivanja zaključeno je da najmanja sila loma iznosi 580 KN, dok je najveća sila loma iznosila 770 KN. Prosjek sila iz svih dvanaest prizmi iznosi 686,67 KN. Čvrstoće prizmi izmjerene su od najslabije 25,78 MPa, dok kod najjače 34,22 MPa. Prosjek čvrstoća iznosio je 30,52 MPa .

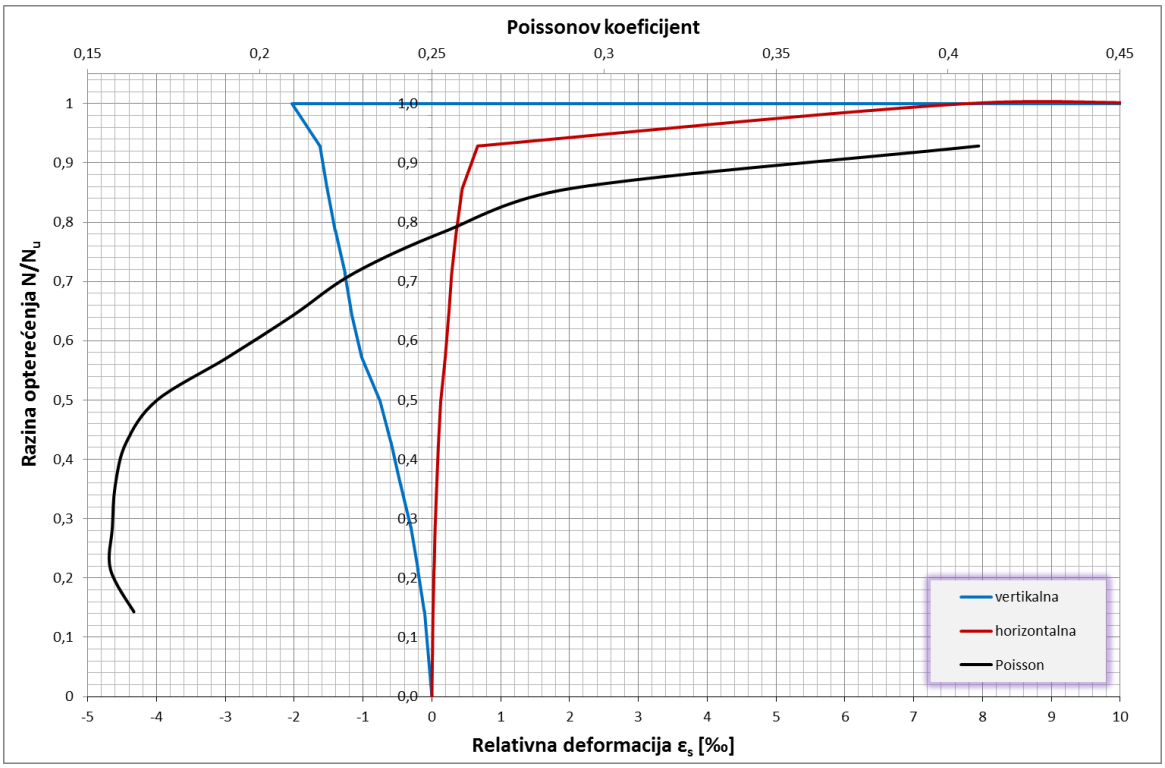
Prizma	Sila loma (kN)	Čvrstoća (kN/cm2)	Čvrstoća (MPa)
P1	700	3,11	31,11
P2	750	3,33	33,33
P3	670	2,98	29,78
P4	580	2,58	25,78
P5	670	2,98	29,78
P6	680	3,02	30,22
P7	600	2,67	26,67
P8	700	3,11	31,11
P9	700	3,11	31,11
P10	770	3,42	34,22
P11	690	3,07	30,67
P12	730	3,24	32,44
Srednje fck,prism	686,67	3,05	30,52

Slika 23 Prikaz sila loma i čvrstoća prizmi

U nastavku su prikazani rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na prizmama uz konstrukciju krivulje koja prikazuje kretanje Poissonova koeficijenta tijekom ispitivanja. Na taj način vidljivo je kretanje odnosa horizontalne i vertikalne deformacije prizme tijekom nanošenja opterećenja te je moguće promatrati njihov odnos tijekom nanošenja opterećenja.

Prizma P1

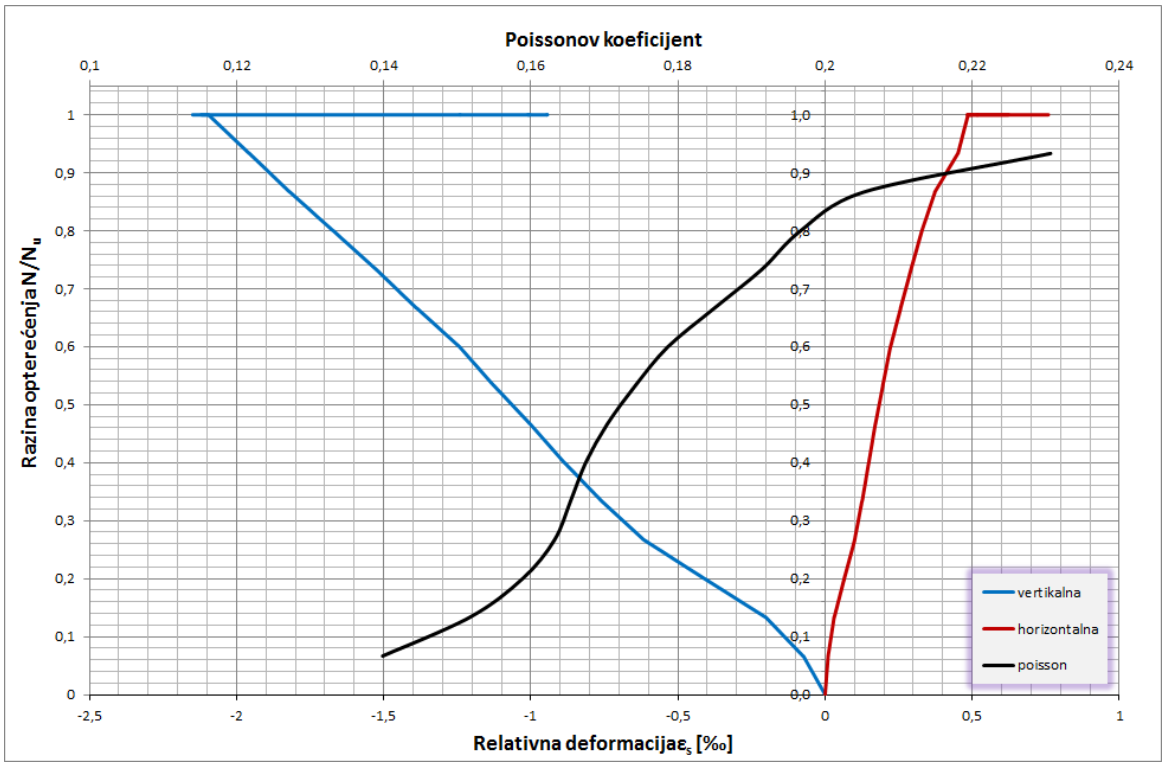
Sila loma = 700 kN



Slika 24 Poissonov koeficijent prizma 1

Prizma P2

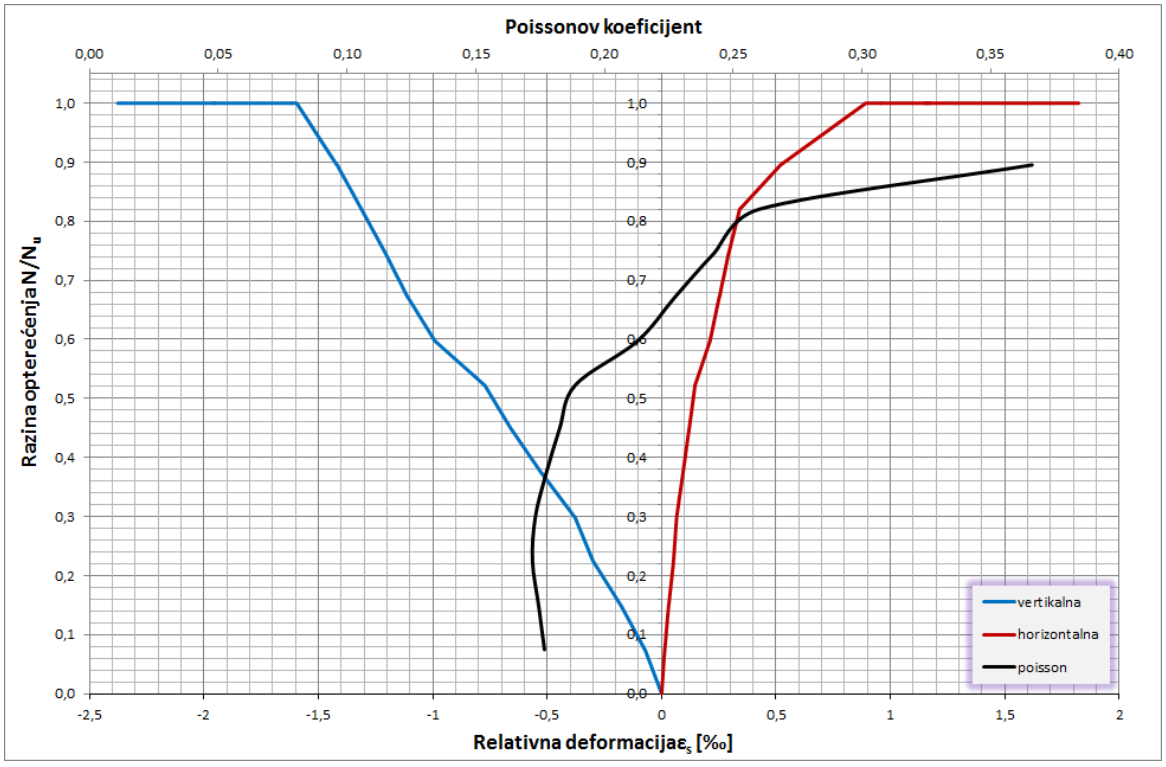
Sila loma =750 KN



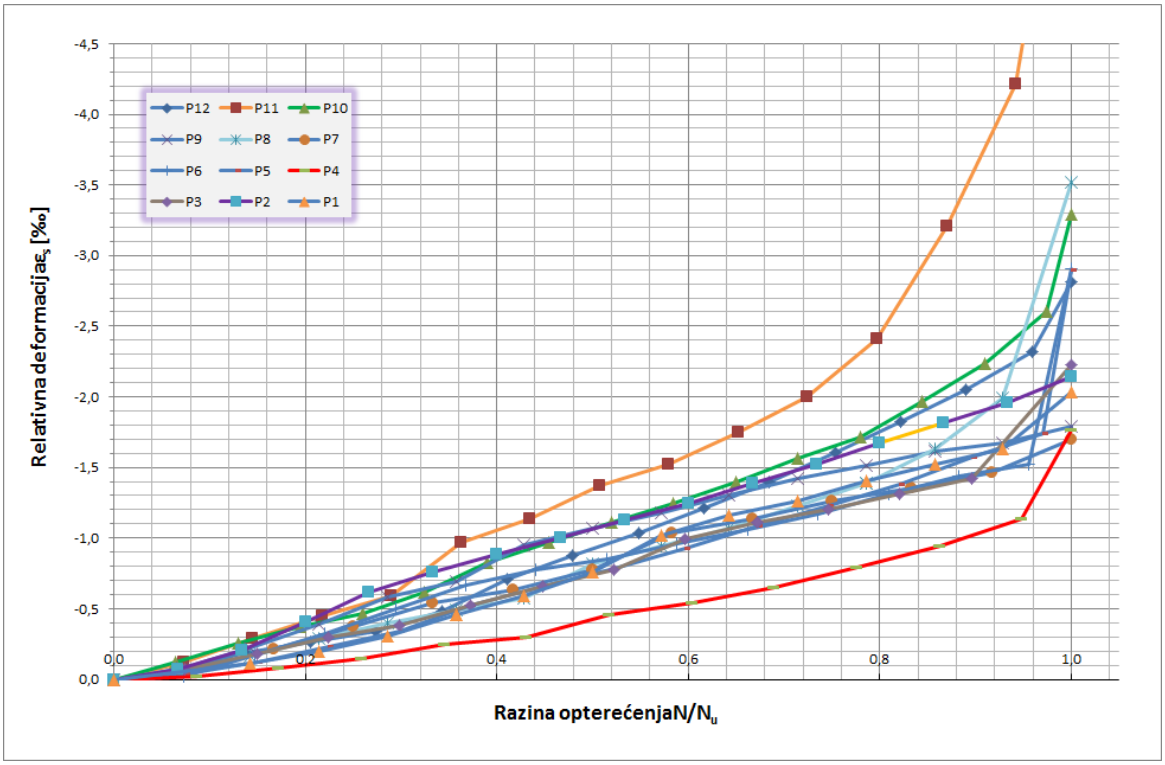
Slika 25 Poissonov koeficijent prizma 2

Prizma P3

Sila loma 670 KN



Slika 26 Poissonov koeficijent prizma 3



Slika 27 Zbirno prizme

8. Zaključak

U ovome je radu obrađivano eksprimentalno ispitivanje betonskih prizmi izrađenih od betona vrlo visokih čvrstoća potvrđenim mjerodavnim sastavom mješavina tokom laboratorijskih ispitivanja. Navedeni beton vrlo visokih čvrstoća u svom sastavu ima prirodni agregat maksimalnog promjera 16mm, superplastifikator (Glenium sky 510), aerant (Micro-air) i cement CEM I 52,5N. Izvođenjem eksprimentalnih ispitivanja modela betonskih prizmi svrha je dobiti jasniji uvid u ponašanje betonskog elementa tijekom eksploatacijskog perioda. Ispitivanjem više modela betonskih prizmi primjećuje se da su sile loma i omjeri poprečnih i horizontalnih deformacija različiti iako su izrađene iz istog betona marke C25/30 sastava 303A. Sile loma prizmi varirale su od 580 KN do 770 KN, dok su čvrstoće bile od 25,7 MPa do 34,2 MPa. Iako sile loma po ispitivanju variraju one su bitno iznad klase betona (od 25-34 MPa). To je zbog izrade betona koji svojom kvalitetom nadmašuju projektiranu čvrstoću (dodavanje superplastifikatora), jer zbog što brže izrade i transporta betonskih elemenata (grede, razni nosači) na gradilište potrebno je brzo vezanje i visoke čvrstoće. Prizme su analizirane do točke prijelomnog naprezanja (raskida uzorka) uz pračenje i širenja pukotina pa sve do kraja loma. Prikazano je kako se kreće Poissonov koeficijent tijekom ispitivanja (nanošenjem opterećenja). Eksprimentalno je dokazano da se Poissonov koeficijent za beton kreće oko 0.2 ovisi o razini opterećenja. Tijekom ispitivanja primjećeno je da se nagli skok odvija na 0.8-0.9 Nu, te tu dolazi do loma materijala. Ispitivanja takve vrste traže baždarenu mjernu opremu sa velikom točnošću.

U Varaždinu _____ _____

Štefek Polančec

9. Literatura

[1] Tehnički propis za betonske konstrukcije, NN 101/05

[2] HRN ENV 1991-1 EUROKOD 1: Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije – 1. dio: Osnove projektiranja, Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, 2005.

[3] HRN ENV 1992-1-1 EUROKOD 2: Projektiranje betonskih konstrukcija – 1.1 dio: Opća pravila i pravila za zgrade, Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, 2004.

[4] Jure Radić i suradnici: Betonske Konstrukcije – Priručnik, Hrvatska sveučilišna naklada, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, SECON HNDK, Andris, Zagreb, 2006.

[5] Jure Radić i suradnici: Betonske Konstrukcije – Riješeni primjeri, Hrvatska sveučilišna naklada, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet,Andris, Zagreb, 2006.

[6] Ivan Tomičić: Betonske konstrukcije, DHGK, Zagreb, 1996.

[7] HRN EN 12350, (2010), Ispitivanje svježeg betona, Hrvatski zavod za norme

[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson's_ratio

[9] https://hr.wikipedia.org/wiki/Hookeov_zakon

[10] Alen Harapin i Jure Radić: Osnove betonskih konstrukcija

Popis slika

Slika 1 Radni dijagram čelika za armiranje 5
Slika 2 Proračunski dijagram čelika za armiranje 6
Slika 3 Oblici armaturnog čelika 6
Slika 4 Čelik za prednapinjanje 7
Slika 5 Gaussova (lognormalna) krivulja raspodjele rezultata ispitivanja 8
Slika 6 Tablica razreda tlačne čvrstoče betona 9
Slika 7 Načini ispitivanja vlačne čvrstoće betona 10
Slika 8 S-N krivulje za beton opterećen na tlak 11
Slika 9 Troosno stanje naprezanja 12
Slika 10 Efekt poprečnog tlaka na dijagramu naprezanje-deformacija betona 13
Slika 11 Dijagram naprezanje-deformacija za beton 13
Slika 12 Radni dijagram cementnih uzoraka opterećenih na pritisak: a) beton manje čvrstoće, b) beton velike čvrstoće. 14
Slika 13 Pravokutni uzorak opterećen na pritisak, Poissonov omjer ν ~ 0,5 (guma) 15
Slika 14 Poissonov omjer za različite materijale 18
Slika 15 Primjer kocke napregnute na vlak 19
Slika 16 Dijagram naprezanja 24
Slika 17HBM mjerna oprema 25
Slika 18 Specifikacije mjerenja na „polumost“ na pojačalu HBM MX840A 25
Slika 19Deformacija tenzometra ovisno o promjeni temperature 26
Slika 20 Kalup za betoniranje betonskih prizmi 28
Slika 21 Betoniranje modela betonskih prizmi 29
Slika 22 Ispitivanje tlačne čvrstoće betona 30
Slika 24 Prikaz sila loma i čvrstoća prizmi 31
Slika 25 Poissonov koeficijent prizma 1 32
Slika 26 Poissonov koeficijent prizma 2 33
Slika 27 Poissonov koeficijent prizma 3 33
Slika 28 Zbirno prizme 34