

Svojstva betona za tunelske obloge prema kriteriju najmanjih pukotina

Ivana Banjad Pečur

Ključne riječi

tunel, tunelska obloga, beton, sekundarna betonska obloga, pukotine, svojstva betona, optimizacija sastava betona

Key words

tunnel, tunnel lining, concrete, secondary concrete lining, cracks, concrete properties, optimization of concrete composition.

Mots clés

tunnel, revêtement de tunnel, béton, revêtement secondaire en béton, fissures, propriétés de béton, optimisation de la composition de béton

Ключевые слова

туннель, облицовка туннеля, бетон, вторичная бетонная облицовка, трещины, свойства бетона, оптимизация состава бетона

Schlüsselworte

Tunnel, Tunnelverkleidung, Beton, sekundäre Betonverkleidung, Risse, Betoneigenschaften, Optimierung der Betonzusammensetzung

I. Banjad Pečur

Izvorni znanstveni rad

Svojstva betona za tunelske obloge prema kriteriju najmanjih pukotina

Prikazano je istraživanje sastava i svojstva betona prema kriteriju najmanjih pukotina u sekundarnim tunelskim oblogama. Laboratorijsko istraživanje provedeno je u specijalno konstruiranoj aparaturi za ispitivanje betona u različitim klimatskim uvjetima, te prema normiranim postupcima. Rezultati pokazuju da sastav betona treba prilagoditi za ljetne i zimske uvjete betoniranja. Dodaci lateksa i vlakana umanjuju pojavu pukotina kao i izvođenje obloge bez naglih promjena u debljini.

I. Banjad Pečur

Original scientific paper

Properties of concrete for tunnel lining based on the minimum cracking criterion

The study of composition and properties of concrete as required to meet the minimum cracking criterion in secondary tunnel linings is presented. The laboratory testing was conducted in a specially devised apparatus for testing concrete under various climatic conditions, and in accordance with standardized procedures. The results show that concrete composition should be adjusted for summer and winter concreting conditions. The cracking can be limited through addition of latex and fibres, and by the construction of lining without sudden changes of thickness.

I. Banjad Pečur

Ouvrage scientifique original

Propriétés du béton pour le revêtement de tunnel selon le critère de fissuration minimum

L'étude de la composition et des propriétés du béton nécessaires pour satisfaire au critère de fissuration minimum du revêtement secondaire de tunnel est présentée. L'essai de laboratoire a été conduit dans un dispositif spécial pour l'essai de béton dans les conditions climatiques variables, et en conformité avec les procédés standardisés. Les résultats montrent que la composition de béton doit être adaptée pour le bétonnage d'hiver ou d'été. La fissuration peut être limitée par l'addition du latex et des fibres, ainsi que par la réalisation de revêtement sans changement soudain de l'épaisseur.

И. Баняд Печур

Оригинальная научная работа

Свойства бетона для облицовок туннелей по критерию минимума трещин

В работе показано исследование состава и свойств бетона по критерию минимума трещин во вторичных туннельных облицовках. Лабораторное исследование проведено в специально сконструированной аппаратуре для испытания бетона в различных климатических условиях, а также согласно нормированным способам. Результаты показывают, что состав бетона необходимо приспособить для летних и зимних условий бетонирования. Добавки латекса и волокон снижают появление трещин, а также и выполнение облицовки без резких изменений в толщине.

I. Banjad Pečur

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Eigenschaften des Betons für Tunnelverkleidungen nach dem Kriterium des Rissminimums

Dargestellt ist eine Forschung der Zusammensetzung und der Eigenschaften des Betons nach dem Kriterium des Rissminimums in sekundären Tunnelverkleidungen. Die Laborforschung wurde in einer spezial konstruierten Apparatur für die Untersuchung des Betons in verschiedenen Witterungsverhältnissen sowie nach normiertem Verfahren durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen dass die Zusammensetzung des Betons sommerlichen und winterlichen Betonierverhältnissen angepasst werden soll. Zutaten von Latex und Fasern verringern die Erscheinung von Rissen, ebenso die Ausführung der Verkleidung ohne drastischer Änderung deren Dicke

Autor: Doc. dr. sc. **Ivana Banjad Pečur**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za gradiva, Kačićeva 26, Zagreb

1 Uvod

U brojnim tunelima kod nas i u svijetu u betonu sekundarne tunelske obloge nakon određenog vremena pojavljuju se pukotine, izluživanja, deformacije i općenito degradacija betona u oblogama. Pukotine u betonskim tunelskim oblogama cestovnih tunela mogu biti mjesta znatnijeg procurivanja vode u tunel, stvaranja siga i tamnih mrlja, što rezultira nepovoljnim vizualnim učincima. Osim toga, takva su mjesta prikladna za djelovanje smrzavanja te daljih oštećenja strukture betona. Radi sprječavanja pojava pukotina treba poduzimati mjere u svim fazama građenja: fazi projektiranja, u projektu sastava betona i prilikom izvođenju betonske obloge. Važnost analize pukotina je u otkrivanju i uklanjanju uzroka, kako bi se smanjio rizik njihove pojave.

Gotovo sve betonske konstrukcije imaju pukotine. One su različite po širini, obliku, položaju i gustoći u pojedinom betonskom elementu jer mogu biti posljedica velikog broja različitih uzroka i to koji se mogu pojaviti već u samom procesu vezivanja i očvršćivanja betona i u fazi uporabe. Pojava pukotina u betonu tunelskih obloga također se ne može potpuno izbjeći.

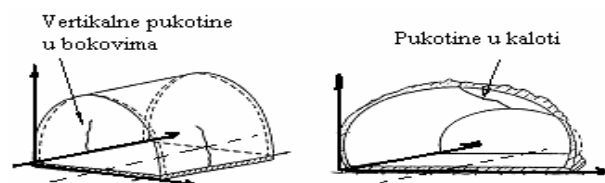
Danas se pri gradnji tunela najčešće primjenjuje tzv. nova austrijska metoda koja podrazumijeva izvedbu obloge monolitnim postupkom. Pritom se kao mjera osiguranja stabilnosti iskopa primjenjuje primarna obloga od mlaznog betona, a zatim slijedi sekundarna tunelska obloga od monolitnog betona u kampadama dužine od 8 do 12 metara. Kod tunela se obloga najčešće betonira izravno uz stijenu ili krutu ljsku primarne obloge od mlaznog betona, koja također sprječava volumenske deformacije svoda. U modernoj se gradnji tunela na primarnu oblogu ugrađuje hidroizolacija od polimerne folije, s pomoću koje se procjedne vode odvođe u drenažnu cijev. Utjecaji deformacija betonske obloge zbog temperaturnih promjena i skupljanja time se djelomično smanjuju.

U tunelima se pojava pukotina može znatno smanjiti poboljšanjem sastava betona i postupcima izvođenja, na što je usmjereno istraživanje opisano u ovome radu [7]. Osim navedenih tehnoloških mjera smanjenju pukotina doprinose konstrukcijske mjere koje su usmjerene na smanjenje stupnja spriječenosti deformiranja (duljina kampade, veza sa "zolnom" ili stijenom, nagle promjene u debljini sekundarne obloge).

Nastanak pukotina u betonu tunelskih obloga intenzivno se istraživao u cijelom svijetu s obzirom na specifične lokalne uvjete (klima, geologija, svojstva betona), što upozorava na veličinu problema i njihove posljedice [1] do [4]. Također je bilo nužno potrebno i za specifične uvjete u našoj zemlji istražiti svojstva i tehnologiju betona tunelskih obloga s najmanjom mogućnosti deformacije odnosno pojave pukotine [7].

2 Dosadašnje spoznaje o pojavi pukotina u betonu

Dettling [1] je uočio da se u tunelskim oblogama najčešće pojavljuju dva tipa pukotina (slika 1.), i to uzdužne u tjemenu i vertikalne u području bokova svoda. Vrijeme nastanka tih dvaju tipova pukotina u jednoj kampadi tunelske obloge je različito, što upućuje na različite uzroke nastanka tih pukotina. Uzdužne pukotine u tjemenu nastaju zbog premale čvrstoće mladog betona nakon otpuštanja oplata, a vertikalne su pukotine posljedica spriječene deformacije poradi temperaturnih promjena i skupljanja mladog betona.



Slika 1. Karakteristične pukotine u tunelskoj oblozi

Svojstva mladog betona značajno utječu na pojave obaju tipova pukotina u tunelskoj oblozi. Prvi temeljiti pregled svojstava mladog betona pripremila je RILEM-ova tehnički odbor TC 42 CEA [2]. U završnom dokumentu rada tog odbora Byfors, Benner i Collins te Kasai prikazali su osnovne utjecaje tipova cemenata, njihovih sastava i finoće mliva na razvoj ranih čvrstoća betona, promjenu temperature i deformacije betona, zatim utjecaje v/c omjera, dodatka betonu, količine sitnih čestica i klimatskih okolnosti na skupljanje betona.

Istraživanjima Springenschmieda i Nischera [3] ustanovljeno je da mladi beton u trenutku demontiranja oplata betonskog svoda obloge, da bi nosio vlastitu masu, treba imati čvrstoću od 2 do 6 MPa. Istraživanjem promjene temperature u mladom betonu pri spriječenoj deformaciji oni su ustanovili da hlađenje betona za 8 do 12 kelvina pri potpunoj spriječenosti deformacije uzrokuje pojavu pukotina.

Thielen i Hintzen [4] istraživali su mjere za smanjenje rizika pojave pukotina u monolitnim tunelskim oblogama. Analizirali su utjecaj promjene temperature na tijek naprezanja i deformacija raznih sastava mladog betona u različitim klimatskim okolnostima.

Glavni zaključci ovih istraživanja bili su:

- Potvrđeno je mišljenje Dettlinga o uzrocima nastanka dvaju tipova pukotina koji se najčešće pojavljuju.
- Da bi se izbjegle uzdužne pukotine u tjemenu, najmanja rana čvrstoća betona mora biti 2 MPa. Pri brzini napredovanja gradnje tunela od jedne kampade na dan to znači da ranu čvrstoću treba postići 9 do 16 sati nakon betoniranja.

- Vertikalne pukotine u bokovima svoda nastaju zbog spriječenosti deformacija koje su posljedica promjene temperature od hidratacije cementa i zatim skupljanja betona i naglih promjena temperature okoline.

Kako su mjere, prema tim zaključcima, za smanjenje rizika dviju tipičnih pukotina u suprotnosti, potrebna je optimizacija sastava betona na osnovi detaljnih prethodnih ispitivanja i tehnoloških mjera tijekom građenja.

3 Eksperimentalno istraživanje svojstava mladog betona prema kriteriju najmanjih pukotina

U ovome radu prikazano je istraživanje optimalnog sastava betona pripremljenog s lokalnim materijalima, uz uvjet minimuma rizika pojave pukotina u tunelima u lokalnim klimatskim okolnostima. S tom namjerom definiran je program i sistematizacija uvjeta za optimizaciju sastava betona. Laboratorijska ispitivanja obavljena su u za tu svrhu konstruiranoj specijalnoj aparaturi za simulaciju različitih klimatskih okolnosti. Ispitana su svojstva betona i prema normiranim postupcima u starosti od 12 i 16 sati, te 1, 3 i 28 dana. Ispitivanje svojstava betona provedeno je u različitim klimatskim uvjetima (ljetni, zimski), u kakvima se beton nalazi u tunelskoj oblozi.

3.1 Aparatura za mjerenje temperature i određivanje naprezanja u betonu

Za kompleksno ispitivanje betona u uvjetima ugradnje i eksploatacije u sekundarnoj tunelskoj oblozi, razvijena je i konstruirana posebna aparatura za laboratorijsko mjerenje utjecaja sastava i okolne temperature na rizik pojave pukotina u betonu (slika 2.). Aparatura se sastoji od krute čelične konstrukcije, klimakomore, kalupa za betonski uzorak, bočnih čeličnih šipki za razupiranje betonskog uzorka, mjernih instrumenata za mjerenje temperature i deformacije te računala.

Klimakomora omogućuje ispitivanje betona pod različitim temperaturnim uvjetima u rasponu od -15°C do $+50^{\circ}\text{C}$, pri čemu je moguće zadane uvjete temperature držati konstantnima u vremenskim intervalima ili ih prema zadanom režimu varirati tijekom vremena.

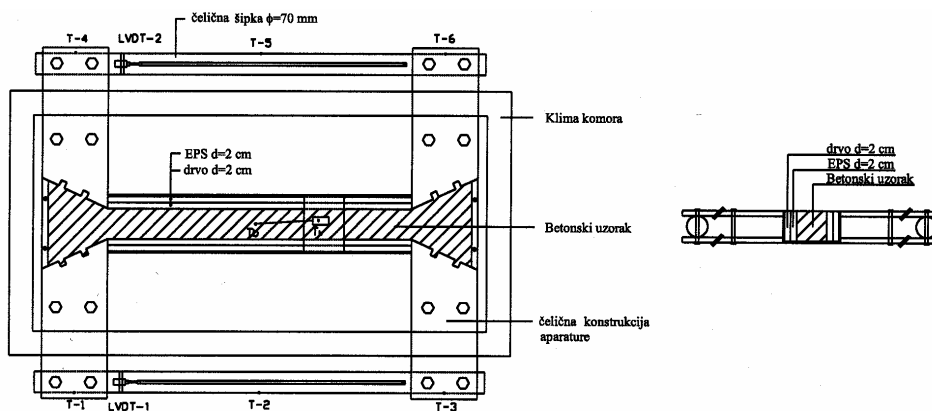
U klima komori se nalazi metalni kalup za uzorak betona dimenzija $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ s trapeznim proširenjima na oba kraja radi sidrenja. Kalup se ispuni svježim betonom pa se iz mjerenja promjena duljina (deformacija) bočnih čeličnih šipki može odrediti naprezanje u betonu uzrokovano promjenom temperature, bubrenjem, skupljanjem i puzanjem betona sve do pojave prve pukotine. Krajevi uzorka betona su upeti u krutu čeličnu konstrukciju aparature, tako da su spriječeni pomaci. Uzorak betona je ugrađen u metalni kalup s bočnih strana dodatno termički izoliran drvenom pločom debljine 2 cm i pločom ekspaniranog polistirena debljine 2 cm. Takvom izolacijom simulirani su toplinski uvjeti (osim toplinskog kapaciteta) betonske ploče širine 1,50 m. Trenje između kalupa i uzorka spriječeno je tankim slojem ulja između dvostruke PVC folije.

3.2 Program laboratorijskih ispitivanja

Zahtjevana svojstva betona bila su MB 30, konzistencije (slump $s = 10\text{--}14\text{ cm}$) i v/c omjer 0,50. Programom ispitivanja mehaničkih svojstava betona normiranim postupcima i ispitivanja u opisanoj komori za mjerenje temperature i određivanje naprezanja u betonu bile su obuhvaćene dvije vrste cementa: PC 30z 45S i PC 15p 35S u količinama od 300, 330 i 360 kg cementa za 1 m^3 betona.

Kombinirane su dvije vrste agregata i dva najveća zrna: prirodni i drobljeni, $D_{\text{max}} = 16\text{ mm}$ i 32 mm .

Aerant se rabi u svim sastavima betona jer umanjuje rizik od pojave pukotina u betonu uzrokovanih evaporacijom vode i povećava otpornost betona na utjecaj smrzavanja.



LVDT - mjerenje promjena duljine bočnih čeličnih šipki
 T_b - temperatura u betonu (na tri mjesta po visini uzorka)

T_k - temperatura u komori (okolina)
 T_i - temperatura u bočnim čeličnim šipkama

Slika 2. Shema konstrukcije aparature za mjerenje temperature i naprezanja u betonu

vanja (to je pojava u zoni ulaza i izlaza iz tunela). Nekim su sastavima betona dodavani još ili plastifikator ili polimerni dodatak (lateks) i mikroarmature od polipropilenskih vlakana koeficijenta oblika $l/d = 30/0,15$.

Ispitivanja su obavljena u dva temperaturna režima koji odgovaraju srednjoj godišnjoj temperaturi zraka u tunelu:

- zimski uvjeti $T = 8 - 12^{\circ}\text{C}$
- ljetni uvjeti - $T = 12 - 16^{\circ}\text{C}$

U tijeku ispitivanja mjerena je i bilježena relativna vlažnost zraka u komori.

Početne temperature betona, ovisno o ljetnim ili zimskim uvjetima, bile su $T_i = 20-23^{\circ}\text{C}$ ljeti odnosno $T_i = 8-17^{\circ}\text{C}$ zimi.

3.3 Analiza rezultata mjerenja specijalnom aparaturom za simulaciju različitih klimatskih okolnosti

U aparaturi za mjerenje temperature i određivanje naprezanja pri različitim termohigrometrijskim uvjetima okoline ispitano je osam sastava betona prikazanih u tablici 1.

Tablica 1. Betoni ispitani u aparaturi za simulaciju različitih klimatskih okolnosti

Oznaka	Sastav	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	
		svježeg betona	okoline
M-I	z330/riječni 16/SB50	20	10
M-II	z330/riječni 32/SB50	20,8	10
M-III	z330/riječni 32/SB50/vlakna	22	10
M-IV	z330/riječni 32/SB50/vlakna	22,8	18
M-V	z330/riječni 32/vlakna	21,6	14
M-VI	z360/drobljeni 32/SB50	14	10
M-VII	z360/drobljeni 32/SB50/vlakna	17,6	10
M-VIII	z360/drobljeni 16/SB50	10	14

Nakon ugradnje u kalup, ponašanje uzorka betona zavisi od sljedećih istodobnih utjecaja, ali različitog intenziteta i trajanja: (1) toplinskog širenja uzorka kao posljedice povećanja temperature zbog topline hidratacije cementa, (2) toplinskog širenja ili skraćivanja uzorka zavisno od temperature okoline u odnosu na početnu i zatim promjenljivu temperaturu mladog betona, (3) skupljanja betona zbog isparavanja vode, (4) promjena mehaničkih svojstava mladog betona, postupnoga porasta čvrstoća i bržeg povećanja modula elastičnosti, (5) relaksacije naprezanja zbog vlačnog ili tlačnog puzanja betona. Analizom svih rezultata ukupnih deformacija uočena su četiri karakteristična područja ponašanja betona čije trajanje i

intenzitet ovise o tome koji od navedenih utjecaja ili svojstava betona prevladava. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Rezultati mjerenja u specijalnoj aparaturi

Sastavi	Vrijeme hlađenja/grijanja betona na temp. okoline [sati]	Deformacija razupora od relaksacije [$\times 10^{-6}$]	Skupljanje betona [$\times 10^{-6}$]	Starost betona pri pojavi pukotine [sati]
M-I	6	0,2	0,9	48
M-II	8	0,6	0,3	52
M-III	6	0,1	-	-
M-IV	2	0,7	1,4	55
M-V	5	1,0	0,4	55
M-VI	6	1,6	2,25	75
M-VII	5	1,25	0,75	35
M-VIII	4	0,6	0,75	70

Dijagrami temperature u komori i deformacija betona tijekom vremena prikazani su na slici 3. Opis pojedinih uzroka na ukupnu deformaciju betona za pojedino karakteristično područje utjecaja dan je za reprezentativni uzorak oznake M-I:

Područje 1

Kada se kalup u komori ispunio betonom kojega je temperatura $\sim 20^{\circ}\text{C}$, beton se istovremeno zagrijava od procesa hidratacije, ali i hladi na temperaturu okoline u komori (10°C). Iz dijagrama temperature betona vidljivo je da se beton ohladio na T_{okoline} za ~ 6 sati. Da se istodobno nije i zagrijavao od hidratacije, bilo bi potrebno i kraće vrijeme. Ovo hlađenje betona izaziva vlačna naprezanja u betonu i skraćivanje razupora ($\varepsilon = 0,8 \times 10^{-6}$) (tlačno naprezanje u razuporama).

Područje 2

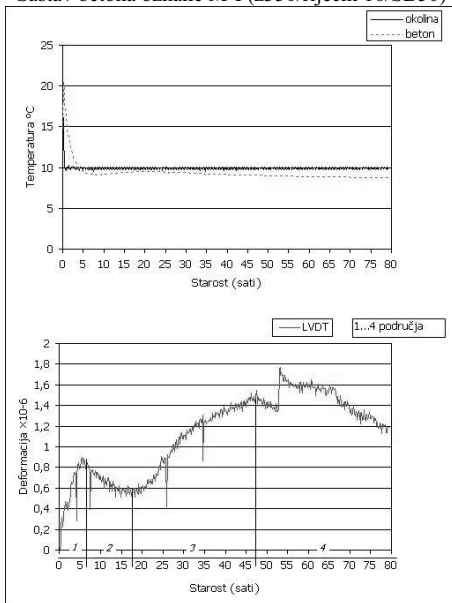
Nakon ohlađivanja betona na temperaturu okoline i vlačnog naprezanja zbog hlađenja u betonu prevladava relaksacija naprezanja koja je velika jer je beton još mlad i ima mali modul elastičnosti ($\sim 0,50 \times E_{28}$). Ova relaksacija naprezanja i proces hidratacije rezultiraju padom vlačnih naprezanja betona i produljenjem bočnih razupora ($\varepsilon = 0,2 \times 10^{-6}$).

Područje 3

Porastom modula elastičnosti betona E (u starosti betona od 18 sati) smanjuje se utjecaj relaksacije i prevladava skraćenje betona od skupljanja umanjeno za djelovanje procesa hidratacije ($\varepsilon = 0,9 \times 10^{-6}$). Skupljanje betona izaziva vlak u betonu odnosno tlak u bočnim razuporama.

Područje 4

Sastav betona oznake M-I (z330/riječni 16/SB50)



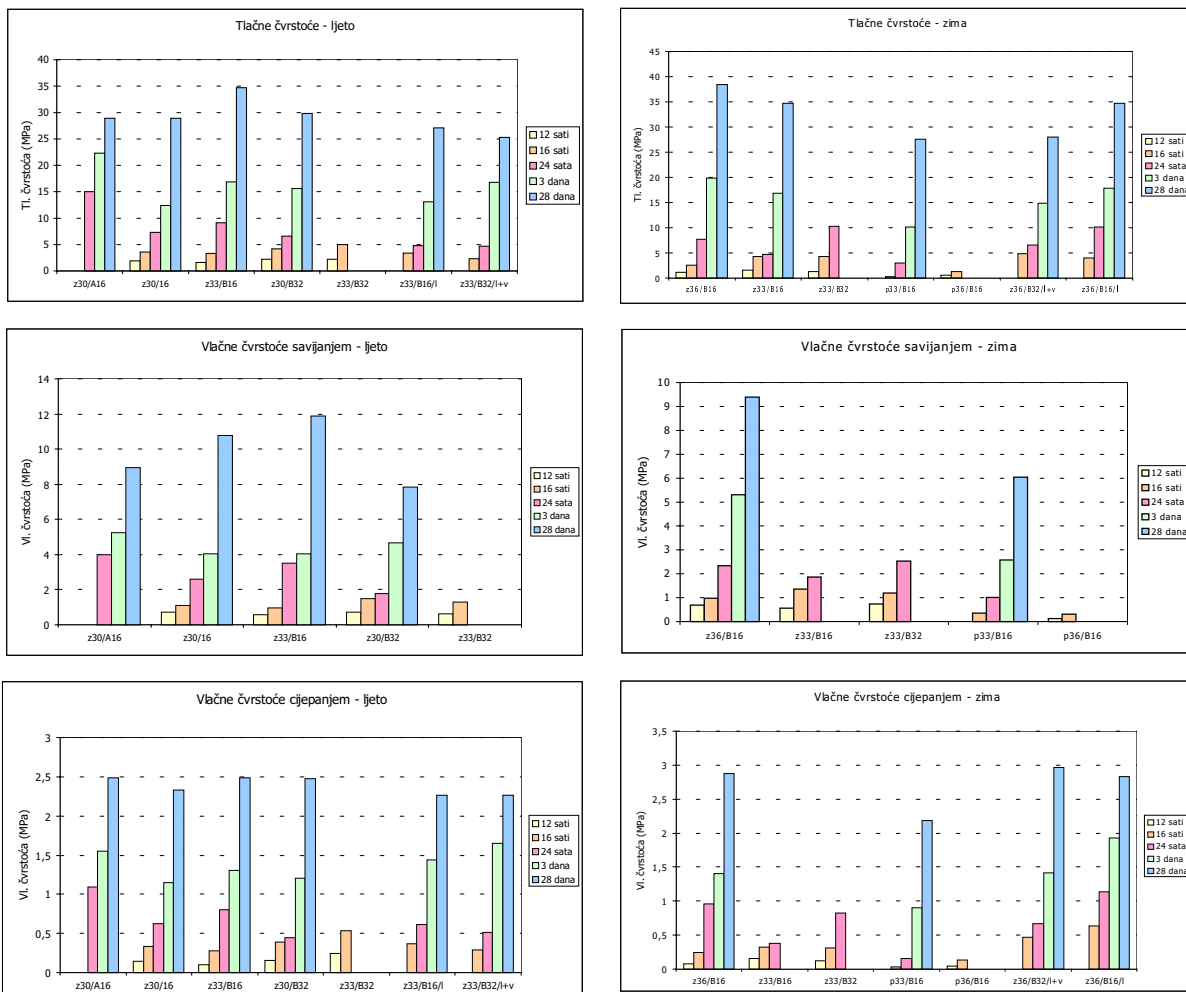
Slika 3. Rezultati mjerenja temperature i deformacija za beton oznake M-I

3.4 Rezultati ispitivanja svojstava betona normiranim postupcima

Svojstva mladog betona mjerodavna za pojavu pukotina ispitana su na standardnim uzorcima mladog betona, tj. u razdoblju kritičnom za nastanak ranih pukotina.

To su: tlačna čvrstoća, vlačne čvrstoće cijepanjem i savijanjem, deformacije prouzročene skupljanjem i pužanjem, i progibi prouzročeni pužanjem prizma opterećenih na savijanje. Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće savijanjem i cijepanjem za ljetne i zimske uvjete prikazani su na slici 4., a rezultati drugih ispitivanja prikazani su u tablici 3. i na slici 5.

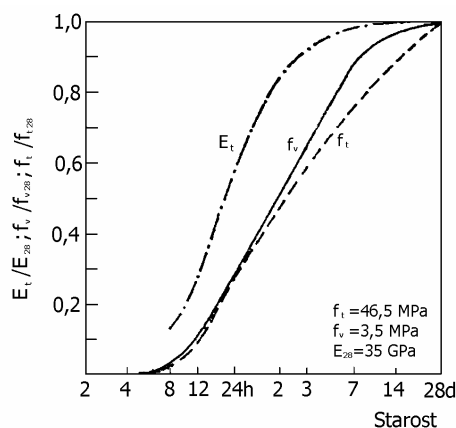
Vidi se da čvrstoću od najmanje 2 MPa potrebnu za smanjenje rizika pojave uzdužne pukotine u tjemenu svoda postižu nakon 12 sati betoni izrađeni s 330 kg cementa u ljetnim uvjetima i nakon 16 sati betoni izrađeni s 360 kg cementa u zimskim uvjetima.



Slika 4. Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće savijanjem i cijepanjem u ljetnim i zimskim uvjetima

Tablica 3. Rezultati ispitivanja skupljanja, puzanja i progiba u ljetnim i zimskim uvjetima

Uvjeti okoline	Sastav	Skupljanje i puzanje $t_0=16$ h	Progib od vlastite težine nakon 2 dana [mm]
Ljetni uvjeti	330 kg/B16	0,104	0,020
	300 kg/B32	0,012	0,045
	330 kg/B32	0,022	0,020
Zimski uvjeti	360 kg/B16	0,034	-
	330 kg/B16	0,007	0,040



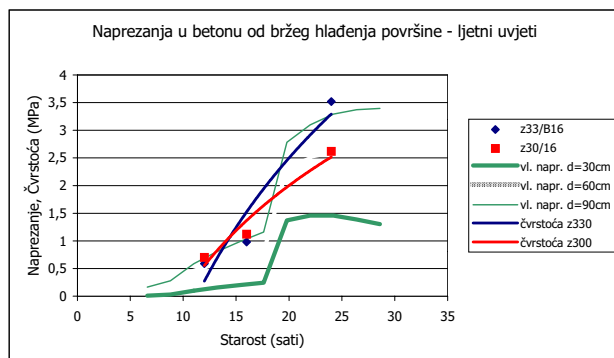
Slika 5. Prirast relativnog modula elastičnosti, vlačne i tlačne čvrstoće [2]

4 Teorijska procjena rizika pojave pukotina

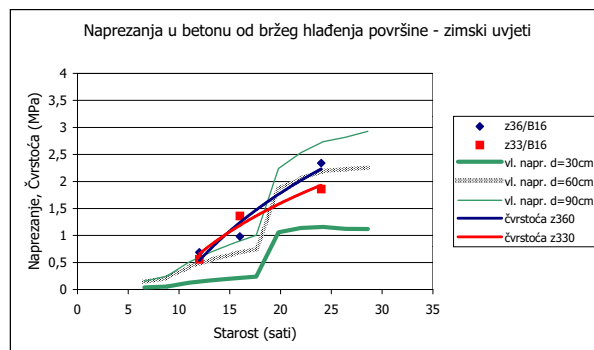
Procjena rizika od pojave pukotina provedena je sljedećim postupkom:

- proračun promjene temperature u betonu kao posljedice razvoja topline hidratacije i disipacije topline u okolinu, zavisno od klimatskih okolnosti, iz čega su odabrani kritični temperaturni gradijenti,
- procjena relativne deformacije zbog skupljanja do trenutka nastanka kritičnoga temperaturnoga gradijenta,
- procjena modula elastičnosti u trenutku nastanka kritičnoga temperaturnoga gradijenta,
- procjena stupnja relaksacije u vremenu od betoniranja do nastanka kritičnoga temperaturnoga gradijenta,
- proračun vlačnih napreznja u betonu uzrokovanih skupljanjem i temperaturnim gradijentom na taj način, da je modul elastičnosti reduciran ovisno o stupnju relaksacije zbog puzanja betona.

Termički proračun metodom konačnih diferencija (Schmidtova metoda) [6] proveden je za dva slučaja mogućeg nastanka pukotina. Jedan je slučaj nastanak pukotine uzrokovane hlađenjem površine betona (vlačna napreznja uz površinu betona), a drugi je slučaj nastanak pukotine od spriječene deformacije (dugotrajno hlađenje unu-

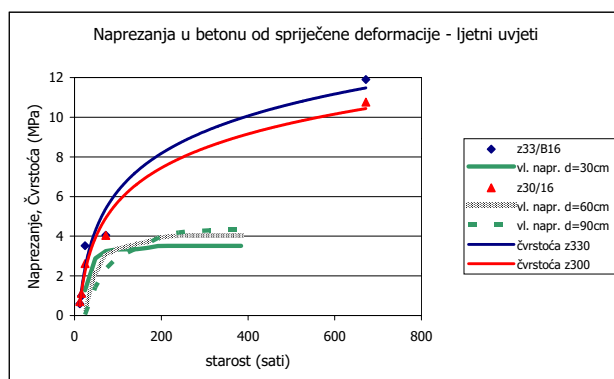


a)

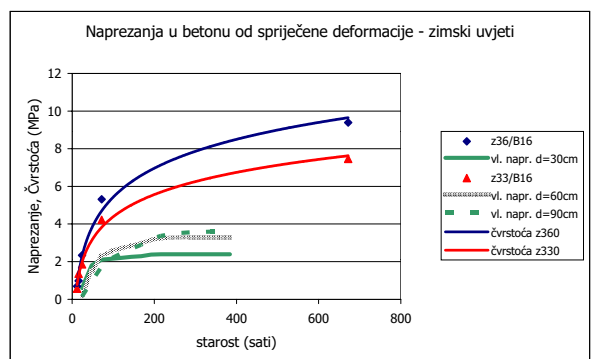


b)

Slika 6. Prirast čvrstoće i napreznja u betonu od bržeg hlađenja površine za a) ljetne uvjete i b) zimske uvjete



a)



b)

Slika 7. Prirast čvrstoće i napreznja u betonu od spriječene deformacije za a) ljetne uvjete i b) zimske uvjete

trašnjosti betona popraćeno vlačnim naprezanjima u unutrašnjosti betona).

Razmatrani su sljedeći relevantni parametri:

- različite debljine sekundarne tunelske obloge (30 cm, 60 cm, 90 cm)
- temperature svježeg betona T_i u zimskim i ljetnim uvjetima ($T_{iz} = 5$ ili 10 ili 15°C; $T_{ilj} = 20$ ili 25 ili 30°C)
- temperature okoline u tunelu T_o u zimskim i ljetnim uvjetima ($T_{oz} = 6$ ili 8 ili 10 ili 12°C; $T_{olj} = 12$ ili 14 ili 16 ili 18°C).

Rezultati proračuna naprezanja u betonu od bržeg hlađenja površine i naprezanja od spriječene deformacije u betonu prikazani su u tablici 4.

U dijagramima na slikama 6.a i 6.b uspoređeni su rezultati izračunatih naprezanja od bržeg hlađenja površine betona za različite debljine obloge i izmjerene vlačne čvrstoće savijanjem u raznim starostima betona.

U dijagramima na slikama 7.a i 7.b uspoređeni su rezultati izračunanih naprezanja od spriječene deformacije u unutrašnjosti za različite debljine obloge i izmjerene vlačne čvrstoće savijanjem u raznim starostima betona.

5 Zaključak

Istraživanja provedena u aparaturi za kompleksno ispitivanje betona omogućila su utvrđivanje svojstava betona s najmanjim rizikom od nastanka pukotina u oblogama tunela. Zbog razlike u temperaturi na površini betona i u unutrašnjosti betonske obloge uzrokovane hlađenjem dolazi do vlačnih naprezanja koja su u ljetnim uvjetima približno 50% veća nego u zimskim uvjetima.

Radi postizanja najmanjeg rizika od pojave uzdužnih tjemnih pukotina kao i vertikalnih bočnih pukotina u oblogama tunela potrebno je optimizirati sastave betona sukladno godišnjim dobima, odnosno klimatskim uvjetima:

- Analiza rezultata ispitivanja sastava betona prilagođenih za ljetne uvjete pokazuje da beton izrađen s 330 kg/m³ cementa PC 30z 45S i najvećim zrnom agregata 32 mm ima zadovoljavajuću ranu čvrstoću i ima najbolja svojstva mjeodavna za najmanji rizik od pojave pukotina.
- Analiza rezultata ispitivanja i karakteristika sastava betona prilagođenih za zimske uvjete pokazuje da beton izrađen s 360 kg/m³ cementa PC 30z 45S i najvećim zrnom agregata 16 mm ima zadovoljavajuću ranu čvrstoću i najbolja svojstva mjerodavna za najmanji rizik od pojave pukotina.

Potom je potvrđeno da dodaci polimera latexa i vlakana u betonu poboljšavaju svojstvo istezljivosti, a time umanjuju mogućnost pojave pukotina.

Sastavi betona s većom količinom cementa imaju veću deformaciju do nastanka pukotine (veću istezljivost), a pukotine se pojavljuju kod veće starosti betona. Betoni s manjim maksimalnim zrnom agregata zbog hlađenja betona na temperaturu okoline manje se deformiraju. Kod betona s više cementa i najvećim zrnom agregata veća je relaksacija naprezanja.

Poradi spriječene deformacije i radi naglih promjena u debljini betonske obloge dolazi do koncentracije naprezanja u betonu koja su i do nekoliko puta veća od naprezanja gdje nema naglih promjena u debljini obloge, pa su to mjesta gdje je rizik od pojave pukotine vrlo velik. Zbog toga je potrebno iskopavanje tunela sa što manje neravnina, odnosno prethodno ih zapuniti, kako bi sekundarna obloga bila jednolike debljine.

Mjerama smanjenja rizika od pojave vertikalnih pukotina u bokovima obloge pripada i smanjenje početne temperature svježeg betona te primjena agregata koji imaju manji toplinski koeficijent.

Smanjenju pojave pukotina u betonu obloge će pridonijeti i pravilna njega mladog betona, posebno zaštitom od isušivanja površine betona.

LITERATURA

- [1] Dettling, H.: *Die Wärmedehnung des Zementsteins, der Gesteine und der Betone*, Heft 164 der Schriftenreihe des DAfStb, Berlin, 1964.
- [2] *** *Materials and structures / research and testing*, RILEM, november-december 1981., no.84
- [3] Springenschmied, R.; Nischer, P.: *Untersuchungen über die Ursache von Querrissen im jungen Beton*, Beton- und Stahlbetonbau 68 (1973) H.9
- [4] Thielen, G.; Hintzen, W.: *Massnahmen zur Vermeidung von Rissen in Tunnelinnenschalen aus Ortbeton*, Beton 44 (1994) H.9. und 10.
- [5] Ukrainczyk, V.: *Beton: struktura, svojstva, tehnologija*, ALCOR, Zagreb 1994.
- [6] ***: *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 1, 207.4R-7, ACI publication, 1996.
- [7] Banjad Pečur, I.: *Optimalizacija sastava betona za tunelske obloge*, Doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2002.