

Mehanizmi i modeliranje oštećenja betona djelovanjem smrzavanja

Mario Ille, Dalibor Sekulić

Ključne riječi

beton, pore, djelovanje smrzavanja, oštećenje, mehanizmi nastanka oštećenja, modeliranje svojstava betona, mikrostruktura betona,

Key words

concrete, pores, freezing action, damage, damage mechanisms, modelling of concrete properties, concrete microstructure

Mots clés

béton, pores, action de gel, endommagement, mécanismes d'endommagement, modélisation des caractéristiques du béton, microstructure du béton

Ключевые слова

бетон, замерзание, повреждение, механизмы появления повреждений, моделирование свойств бетона, микроструктура, поры

Schlüsselworte

Beton, Poren, Frosteinfluss, Beschädigung, Entstehungsmechanismen der Beschädigung, Modellieren der Betoneigenschaften, Betonmikrostruktur

M. Ille, D. Sekulić

Pregledni rad

Mehanizmi i modeliranje oštećenja betona djelovanjem smrzavanja

Dan je pregled mehanizama oštećenja betona od smrzavanja bez dodatka soli za odmrzavanje, prikazani su neki modeli pomoću kojih se može predvidjeti nastajanje oštećenja. Na osnovi mehanizama pojave oštećenja i mjerenja, izrađeni su modeli čija je svrha predviđanje trajnosti betonskih konstrukcija izloženih utjecaju smrzavanja. Pokazuje se da je zbog mikrostrukture betona koja se mijenja i brojnih parametara koji utječu na razvoj degradacije betona teško napraviti uspješan model.

M. Ille, D. Sekulić

Subject review

Mechanisms and modelling of concrete damage due to freezing

An overview of mechanisms of concrete damage due to freezing, but without presence of deicing salt, is presented. Some models enabling prediction of concrete damage are described. The models aimed at predicting durability of concrete structures exposed to freezing action have been developed based on modelling and measurement of damage mechanisms. However, the authors stress that is quite difficult to develop a successful model due to concrete microstructure which is subject to changes, and also because of a multitude of parameters that are responsible for the degradation of concrete.

M. Ille, D. Sekulić

Ouvrage de synthèse

Les mécanismes et la modélisation de l'endommagement du béton par l'action de gel

Un aperçu des mécanismes d'endommagement de béton par l'action de gel, mais sans présence du sel de déglacage, es présenté. Quelques modèles pour la prédiction de l'endommagement du béton sont décrits. Les modèles visant à anticiper la durabilité des constructions de béton soumises à l'action de gel ont été développés suite à la modélisation et au mesurage des mécanismes d'endommagement. Toutefois, les auteurs soulignent qu'il serait très difficile de développer un modèle adéquat à raison de la microstructure de béton que varie dans le temps, et à cause d'un grand nombre des paramètres qui sont responsable pour la dégradation du béton.

M. Ille, D. Секулич

Обзорная работа

Механизмы и моделирование повреждения бетона при замерзании

В работе дан обзор механизмов повреждений бетона от замерзания без добавок соли для оттаивания, показаны некоторые модели, при помощи которых можно предусмотреть возникновение повреждений. На основании механизма появления повреждений и измерений созданы модели, целью которых является предусмотрение века службы бетонных конструкций, подвергнутых влиянию замерзания. Оказывается, что из-за замерзания микроструктуры бетона, которая изменяется, и многочисленных параметров, влияющих на развитие деградации бетона, тяжело создать успешную модель.

M. Ille, D. Sekulić

Übersichtsarbeit

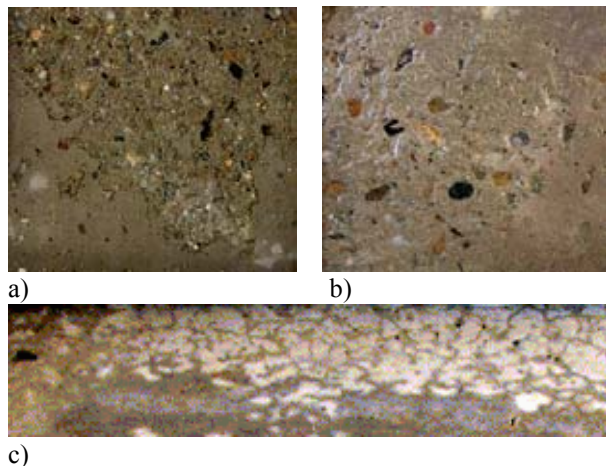
Mechanismen und Modellierung von durch Frost verursachten Betonbeschädigungen

Eine Übersicht der von durch Frost verursachten Betonbeschädigungen ohne Zutat von Entfrostungssalz ist vorgelegt und einige Modelle dargestellt mit welchen man die Entstehung der Beschädigungen vorhersehen kann. Auf Grund der Mechanismen der Entstehung der Schäden und der Messungen sind Modelle hergestellt deren Zweck das Vorhersehen der Dauerhaftigkeit von Betonkonstruktionen ist, die dem Einfluss des Frierens ausgesetzt sind. Es zeigte sich dass wegen der sich ändernden Mikrostruktur des Betons und den zahlreichen Parametern die die Degradierung des Betons beeinflussen ein erfolgreiches Modell schwer herzustellen ist.

Autori: **Mario Ille**, dipl. ing. građ., **Dalibor Sekulić**, dipl. ing. fiz.; Institut građevinarstva Hrvatske, Rakušina 1, Zagreb

1 Uvod

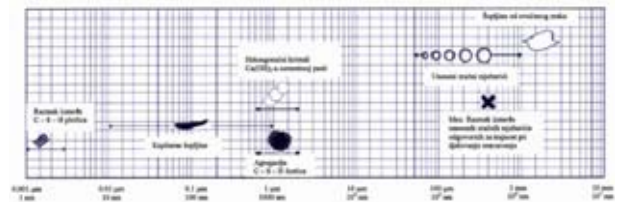
Trajnost betonskih konstrukcija uvjetovana je prvenstveno poroznom strukturom betona. Porozna struktura omogućava prodor različitih agresivnih tvari u beton: iona klora, ugljičnog dioksida, sulfata i kiselina. Prodor iona klora i karbonatizacija betona dovode do korozije čelika za armiranje posljedica čega je nastajanje pukotina u betonu i odvajanje zaštitnog sloja. Kristalizacija soli, prvenstveno klorida i sulfida u porama betona u blizini površine betona, dovodi do pojave vlačnih naprezanja i do ljuštenja površine betona. Od ostalih mehanizama koji dovode do degradacije betona ističe se alkalno-silikatna reakcija između lužina u betonu i silikata u agregatu. Voda se također može smatrati agresivnim medijem jer omogućava difuziju za beton opasnih tvari, a osim toga smrzavanjem u sustavu pora uzrokuje oštećenja betona. U krajevima s oštrom klimom, smrzavanje je jedan od glavnih čimbenika nastajanja oštećenja betonskih konstrukcija. Oštećenja betona zbog smrzavanja pojavljuju se u nekoliko različitih oblika. Najčešće dolazi do pojave pukotina i odlamanja dijelova betona. Kod konstrukcija izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja uz prisutnost vode i soli za odmrzavanje dolazi do ljuštenja površine betona. Osim toga poznato je da nastajanje pukotina između zrna agregata i cementne matrice ovisi o vrsti i podrijetlu agregata. Slika 1. prikazuje različite vrste oštećenja zbog djelovanja smrzavanja, koja se manifestiraju kao površinsko ljuštenje (slika 1.a), pucanje zrna agregata (slika 1.b) i nastajanje pukotina (slika 1.c).



Slika 1. Primjeri različitih vrsta smrzavanjem izazvanih oštećenja betona: a) ljuštenje površine betona; b) oštećenja zbog pucanja zrna agregata, c) pojava pukotina

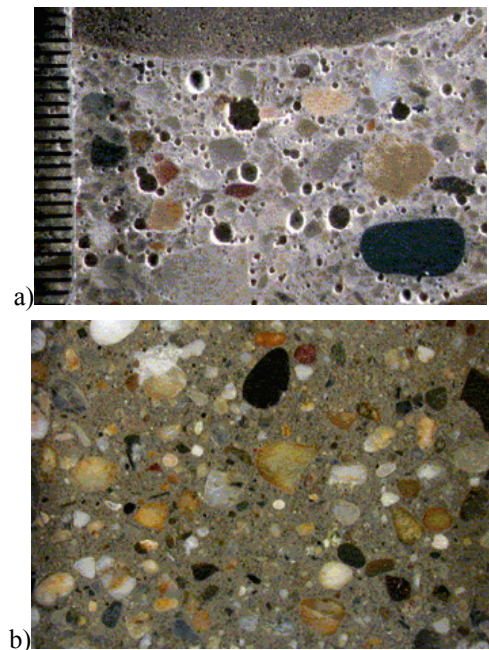
2 Mikrostruktura betona

Beton je kompozitni materijal koji pokazuje heterogenu strukturu na tri uobičajene razine promatranja makroskopskoj, mezoskopskoj i mikroskopskoj (slika 2.).



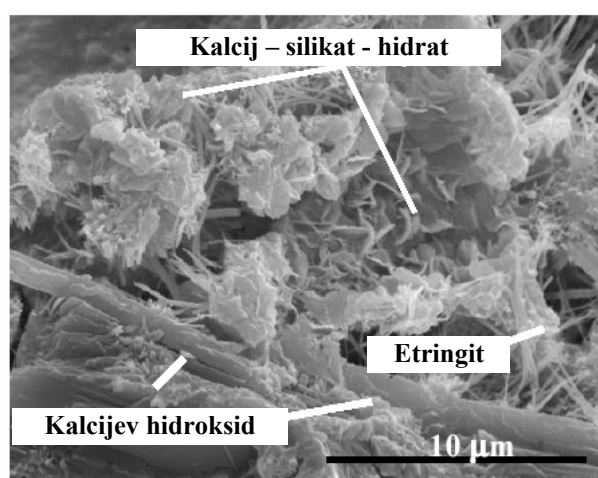
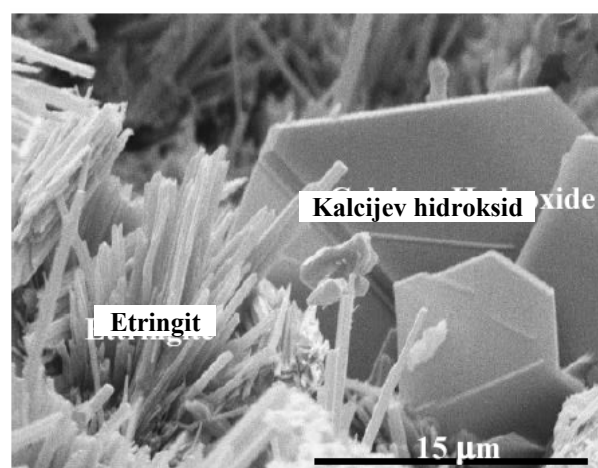
Slika 2. Struktura betona na različitim nivoima promatranja

Kod promatranja na makroskopskoj razini uzima se da je beton homogen materijal s makroskopskim svojstvima poput tlačne i vlačne čvrstoće, poroznosti, modula elastičnosti, puzanja i skupljanja. To je tzv. inženjerska ljestvica. Već na makroskopskoj razini može se uočiti da je beton kompozit agregata i zračnih šupljina koji se nalaze u kontinuiranoj matrici cementne paste. Zračne šupljine obično nastaju zarobljavanjem zraka tijekom miješanja betona i mogu imati promjer do 3 mm. Sferične šupljine unesene dodavanjem aeranta u mješavinu betona obično su promjera 50 do 100 µm i vidljive su na mezoskopskoj razini promatranja strukture (slika 3.a.).



Slika 3. Beton promatran na mezoskopskoj razini: a) beton s dodatkom aeranta, b) beton bez dodatka aeranta

Na mikroskopskoj razini struktura se može promatrati elektronskim mikroskopom. Snimke elektronskim mikroskopom pokazale su da struktura CSH gela nije homogena, u nekim područjima je gusta, a u drugima visoko porozna. U poroznim područjima mogu se razlučiti pojedine hidratizirane faze (slika 4.). Na slici 4.a vidi se kalcijev hidroksid u obliku šesterokutnih pločica i etringit oblika iglica, a na slici 4.b. i kalcij-silikat-hidrat (CSH) gel, gdje se razlikuje CSH1 gel oblika kratkih iglica i CSH2 gel čiji oblik podsjeća na izgužvanu foliju.



Slika 4. Mikrostruktura CSH gela snimljena SEM mikroskopom: (gore) kalcijev hidroksid u obliku šesterokutnih pločica i etringit oblika iglica; (dolje) kalcij-silikat-hidrat (CSH) gel

Opseg strukture betona od makrorazine do mikrorazine obuhvaća devet redova veličine, gdje se kod svakog reda veličine struktura pokazuje različitom. Također, promatra li se isti uzorak na različitim lokacijama snimke elektronskim mikroskopom pokazuju da se mikrostruktura nepredvidljivo mijenja od mjesta do mjesta, a mijenja se također i u vremenu, s napredovanjem procesa hidratacije. Iz toga slijedi da je težak zadatak teorijski povezati mikrostrukturu i makroskopska svojstva. Na žalost, obično se shvaća da je beton materijal kod kojeg su važna jedino makroskopska svojstva i da nema potrebe za razumijevanjem njegove mikrostrukture. Međutim, bez razumijevanja mikrostrukture nemoguće je razumijevanje mnogih svojstava betona koja se vide na makroskopskoj razini.

Mehanizmi nastanka oštećenja smrzavanjem događaju se na mikroskopskoj razini, za što su odgovorni fizikalni procesi u zračnim šupljinama, kapilarnim (veličine od 10 nm do 10 μm) i gel porama (<10 nm).

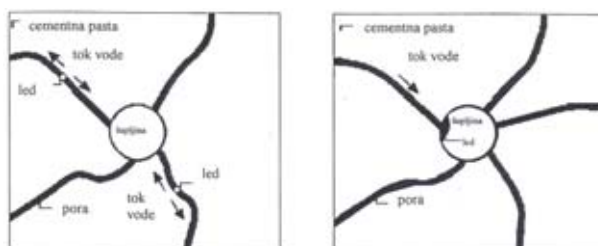
3 Mehanizmi nastanka oštećenja zbog smrzavanja

Najjednostavnije promatrano, moglo bi se reći da oštećivanje betona zbog smrzavanja proizlazi iz pojave da led zauzima 9% veći volumen od vode. Smrzavanjem vode u sustavu pora betona induciraju se naprezanja, a kada naprezanja postanu veća od vlačne čvrstoće betona dolazi do razaranja strukture betona.

Powers [1] je postavio teoriju smrzavanja betona prema kojoj u velikim porama dolazi do pojave hidrauličnog tlaka, dok u kapilarnim porama dolazi do djelomičnog smrzavanja otopina što rezultira osmotskim tlakom. Voda u kapilarama sadrži topljive tvari poput lužina, klorida i kalcijeva hidroksida koje snižavaju točku leđišta. Pritom, osmotski tlak uzrokuju lokalne promjene koncentracije otopina u porama.

Opaženo je međutim da smrzavanjem tekućina poput benzena koji ne povećava volumen prelaskom u krutu fazu dolazi do širenja uzoraka cementne paste.

To navodi na zaključak da postoje i drugi mehanizmi koji uzrokuju nastajanje oštećenja betona zbog smrzavanja. U cementnoj pasti postoje tri vrste vode: kapilarna voda u malim kapilarama (20 nm – 10 μm), adsorbirana voda u gelporama (0,5 nm - 10 nm) i voda između slojeva C-S-H strukture. Utvrđeno je da se voda u gelporama ne smrzava do $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dakle kada se vodom zasićeni beton izloži smrzavanju, u većim se šupljinama pojavljuje led, a u gelporama tekuća voda, zbog čega dolazi do termodinamičke neravnoteže. Smrznuta se voda nalazi u stanju niže energije, od hladne tekuće vode, sustav teži prijeći u stanje niže energije što rezultira gibanjem vode iz gelpora u kapilarne pore, nastajanjem tlaka u kapilarnim porama i širenjem materijala (slika 5.a). Ako u cementnoj pasti postoje zračne šupljine led koji kristalizira u šupljinama može se slobodno širiti. Rast kristala leda u šupljinama crpi vodu iz gel-pora u kojima se smanjuje tlak, posljedica čega je skupljanje cementne paste (slika 5.b). Ovaj mehanizam objašnjava skupljanje uočeno pri smrzavanju cementne paste s velikom količinom uvučenog zraka. Također daje objašnjenje pojavi širenja cementne paste u slučaju benzena koji smrzavanjem ne povećava volumen.



Slika 5. Smrzavanje vode u kapilarama i zračnim šupljinama [1]

Tablica 1. Deformacije uzoraka betona izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja [3]

		NEZASIĆENI BETON u porama je mala količina vode i nema vode u okolini	PROCES ZASIĆIVANJA pore su djelomično napunjene vodom i dostupna je voda iz okoline	ZASIĆENI BETON pore su potpuno napunjene vodom
SMRZAVANJE	od T_{max} do $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	- toplinsko skupljanje betona	- toplinsko skupljanje betona	- toplinsko skupljanje betona
	od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do - $10\text{ }^{\circ}\text{C}$	- skupljanje betona voda iz malih pora kreće se prema fronti leda – negativni hidraulički tlak zbog male količine vode led ne zauzme cijeli volumen velikih pora, pa ne dolazi do pozitivnog hidrauličkog tlaka.	- blago širenje betona u nekim porama led se širi više od volumena pora – pozitivni hidraulički tlak	- veliko širenje betona voda se smrzava u velikim porama - pojava pozitivnog hidrauličkog tlaka
	ispod $10\text{ }^{\circ}\text{C}$	-	- skupljanje betona led ima manji koeficijent toplinskog širenja od betona – neke od pora koje je led potpuno zauzimao postaju djelomično popunjene ledom – transport vode iz manjih pora – pojava negativnog hidrauličkog tlaka.	- veliko širenje betona voda se smrzava u manjim porama - povećavanje pozitivnog hidrauličkog tlaka
ODMRZAVANJE	od T_{min} do - $5\text{ }^{\circ}\text{C}$	- širenje betona dolazi toplinskog širenja leda koje je veće od toplinskog širenja betona	- širenje betona dolazi do toplinskog širenja leda koje je veće od toplinskog širenja betona	-toplinsko širenje betona
	od $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $0\text{ }^{\circ}\text{C}$		- skupljanje betona led se topi, a kako voda zahtijeva manji volumen dolazi do transporta vode iz manjih pora – negativni hidraul. tlak	
	od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do T_{max}	- toplinsko širenje betona (u okolini nema dostupne vode)	- dodatno širenje zbog kapilarnog upijanja vode iz okoline	

Za pojavu oštećenja u betonu zbog smrzavanja može biti odgovoran i agregat. Agregati male poroznosti i velike čvrstoće ne dovode do oštećenja betona jer su elastična naprezanja u porama agregata manja od njegove vlačne čvrstoće. Kod agregata srednje poroznosti zbog hidrauličkog tlaka može doći do pucanja zrna i pojave iskakanja dijelova zrna iz betona, čime nastaju točkasta oštećenja (slika 1.b). Propusnost agregata ima dvostruku ulogu, određuje stupanj zasićenosti agregata vodom i određuje stupanj u kojem će voda izlaziti iz agregata. Eksperimenti [2] pokazali su da je beton sa sitnijim frakcijama agregata otporniji na djelovanje smrzavanja od betona s krupnim agregatom. Ovo se objašnjava time što kod sitnijeg agregata dio vode pri smrzavanju uspijeva izaći van i smanjiti tlak. Agregati velike poroznosti smrzavanjem se ne oštećuju, no uočava se pojava razdvajanja veze između cementne paste i agregata do koje dolazi zbog izlaska vode iz zrna agregata.

Muttaqin [3] promatrao je deformacije uzoraka betona pod utjecajem ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Mehanizam oštećenja podijelio je u tri faze – nezasićeni uvjeti, proces zasićivanja, zasićeni uvjeti. Uočio je različito ponašanje nezasićenih uzoraka, uzoraka u fazi zasićivanja i potpuno zasićenih uzoraka što je prikazano u tablici 1.

3.1 Sniženje temperature ledišta u porama

Do sniženja temperature ledišta u malim porama dolazi zbog efekata energija na rubu između cementne matrice i vode u porama. Tako u sferičnoj zračnoj šupljini postoji sloj nesmrznute vode između matrice i ledene sfere.

Jednadžbu koja povezuje veličinu pora i temperaturu izveli su npr. Skapski i suradnici [4]:

$$\Delta T = - \frac{2T_m \gamma_{iw}}{H_f r \delta_i} \quad (1)$$

gdje je:

$$T_m = 273 \text{ K}$$

γ_{iv} – površinska napetost između vode i leda (0,031 N/m)

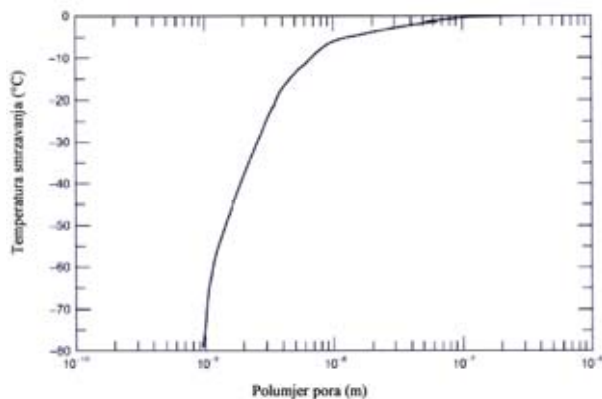
H_f – normalna toplina fuzije (333,3 J/kg)

r – polumjer kristala leda

ρ – gustoća leda (917 kg/m³)

U pornoj strukturi uvijek preostaje sloj nezaleđene vode adsorbirane na zidove pora. Ovaj je sloj približne debljine kao 4 molekule vode što iznosi 12×10^{-10} m. Dakle, da bi se dobio promjer pore, na rezultat iz jednadžbe (1) se mora dodati debljina sloja adsorbirane vode. U krajevima s hladnom klimom zimske temperature rijetko pa-

daju ispod -40°C . Pri toj temperaturi dolazi do smrzavanja vode u porama većim od 3,3 nm. Kako je promjer kapilarnih pora 20 nm – 10 μm , a gel pora 0,5 nm - 10 nm, slijedi da se u betonu može smrznuti samo voda u kapilarnim porama i većim gel porama. Na slici 6. prikazana je ovisnost temperature smrzavanja o polumjeru pora.



Slika 6. Temperatura smrzavanja vode kao funkcija polumjera pora [4]

4 Modeli nastajanja oštećenja smrzavanjem

Modeli predstavljaju pojednostavnjene koncepte koji pomažu pri razumijevanju fizikalnih pojava. Mogu se podijeliti na matematičke i fizikalne modele. Kako se mehanizmi nastanka oštećenja betona radi smrzavanja događaju na mikroskopskoj rzini i modeliranju se mora pristupiti s mikroskopskog stajališta. Zbog kompleksnosti i nehomogenosti mikrostrukture betona, veoma je teško teorijski povezati mikrostrukturu s makroskopskim svojstvima betona.

Fizikalni modeli

Fizikalni se modeli zasnivaju na prirodnim zakonima. Pri oštećivanju betona zbog smrzavanja, fizikalni modeli opisuju fazne prijelaze, transport vlage kroz poroznu strukturu betona, promjene koncentracije topljivih soli u pornoj otopini, sniženje točke leđišta u malim porama i interakcije ovih različitih mehanizama.

Matematički modeli

Matematički su modeli empirijski i sastoje se od prilagođavanja mjerenih podataka matematičkim funkcijama. Treba naglasiti da jedni modeli mogu upotpunjavati druge. Kada zbog velikog broja interakcija koje dovode do velikog broja varijabli i rubnih uvjeta fizikalni modeli ne daju objašnjenje opaženim pojavama, pribjegava se matematičkom modeliranju.

4.1 Modeli zasnovani na utjecaju zasićenja betona vodom

Jedan od faktora o kojima ovisi otpornost betona na smrzavanje jest stupanj zasićenja pora vodom, koji kod

betonskih konstrukcija, ovisno o njihovu smještaju i klimatskim utjecajima može varirati u širokom rasponu.

Stupanj zasićenja pora definira se jednadžbom:

$$S = \frac{V_w}{V_p} = \frac{V_w}{V_w + V_a} \quad (2)$$

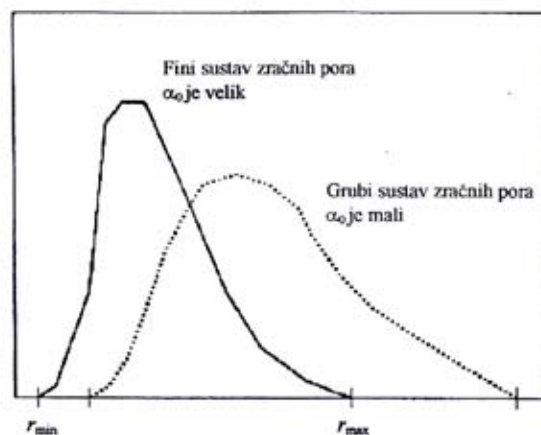
gdje je:

V_w – volumen vode u porama betona

V_p – volumen pora, koji je jednak zbroju volumena vode (V_w) i volumena zraka (V_a)

Može se uvesti pojam kritičnog stupnja zasićenja pora (S_c), koji predstavlja stupanj zasićenja pri kojem dolazi do pojave oštećenja betona, dakle do oštećenja dolazi za $S \geq S_c$

Slika 7. prikazuje raspodjelu pora $f(r)$ u betonu po njihovoj veličini (r), gdje je r_{\min} promjer najsitnijih pora, dok je r_{\max} promjer najkrupnijih pora. Vrijednost specifične ploštine svih zrakom napunjenih pora (α_0 za beton sa sitnim porama je velika, dok je za beton s krupnim porama vrijednost α_0 mala. α_0 se definira kao $\alpha_0 = s_0/a_0$, gdje je s_0 ukupna ploština envelope svih zrakom napunjenih pora u sustavu, a a je ukupni volumen tih pora, tj. sadržaj zraka u betonu.



Slika 7. Raspodjela pora po veličini za sitne i krupne pore [6]

Kritični stupanj zasićenja pora može se proračunati s pomoću jednadžbe:

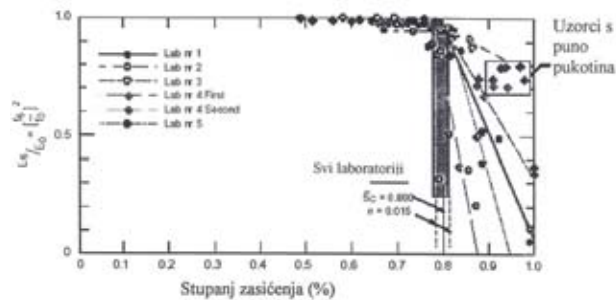
$$S_c = \frac{P_p - a_c}{P_p} = 1 - a_c/P_p \quad (3)$$

gdje je:

P_p – ukupni volumen pora cementne paste, uključujući zračne šupljine (m^3)

a_c – kritični udio zraka u cementnoj pasti (m^3).

Fagerlund [5] eksperimentalno je proučavao utjecaj stupnja zasićenja pora vodom na nastanak oštećenja betona tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.



Slika 8. Normirani dinamički modul elastičnosti u ovisnosti o stupnju zasićenosti betona nakon 6 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [5]

Stupanj zasićenosti betona S određen je iz jednadžbe (2) na osnovi vaganja uzorka sušenog u sušioniku i uzorka zasićenog vodom pod djelovanjem vakuuma. Provedeno je cikličko smrzavanje uzoraka različitih stupnjeva zasićenja. Nastanak oštećenja praćen je mjerenjem pada dinamičkog modula elastičnosti. Izvedeno je više eksperimenata i kod svih je opaženo da kada stupanj zasićenja pora vodom premaši 0,8 dolazi do naglog pada dinamičkog modula elastičnosti, što indicira pojavu razaranja unutarnje strukture betona. Iz niza mjerenja (slika 8.) može se uočiti da je kritični stupanj zasićenja pora vodom $S_c = 0,8$ veoma dobro definiran i ako se samo malo premaši dolazi do nagle pojave oštećenja. Važno je istaknuti da su ovi eksperimenti provedeni na betonima kod kojih nije upotrijebljen aerant.

Kritični udjeli vlage razlikuju se za različite vrste betona. Ako je udio vlage u betonu manji od S_c , tada bez obzira na broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja ne dolazi do pojave oštećenja betona. Također je opaženo da S_c ne ovisi o brzini hlađenja, no blago ovisi o najnižoj dosegnutoj temperaturi. Na nižoj temperaturi dolazi do smanjenja kritičnog zasićenja vlagom S_c , što je i razumljivo pogleda li se jednadžba (3).

Na osnovi teorijskih i eksperimentalnih razmatranja kritičnog stupnja zasićenja, izrađeni su modeli za predviđanje uporabnog vijeka betonskih konstrukcija [6].

4.2 Model hidrauličkog tlaka (Powersov model)

Prema Powersovoj se teoriji [7] s mjesta u porama u kojima dolazi do rasta kristala leda istiskuje voda, što stvara naprezanja na zidovima pora pa kada se naprezanja dovoljno povećaju dolazi do njihova proboja. Maksimalni tlak može se opisati u terminu viskoznosti vode (η), stupnja zasićenja (s), iznosa formiranja leda (u), brzine hlađenja (c), propusnosti (k), i najveće udaljenosti koju mora prijeći voda (λ) da bi izašla iz materijala, što je dano jednadžbom (4).

$$P_{\max} = \eta(1,09 - 1/s)\mu c \lambda / 3\kappa \quad (4)$$

Iz jednadžbe (4) vidi se da Powersov model uključuje efekte zasićenja i zraka uvučenog u beton (λ opada kako poroznost raste), te efekte brzine hlađenja.

4.3 Termodinamički modeli

Termodinamički modeli objašnjavaju gibanje vode u sustavu pora prema mjestima smrzavanja, gdje su važni koncepti kemijski potencijal i njegov gradijent odgovoran za gibanje vode u porama. Kemijski potencijal je funkcija temperature (T) i tlaka (P) i njegove se promjene mogu izraziti jednadžbom:

$$d\mu = VdP - SdT \quad (5)$$

gdje je:

V – molarni volumen

S – molarna entropija.

Promatraju li se tri faze vode, led ima najmanju entropiju, voda veću a vodena para najveću entropiju. Iz jednadžbe (5) vidi se da promjena temperature najviše utječe na kemijski potencijal vodene pare, a najmanje utječe na kemijski potencijal leda koji ima malu entropiju. Slično, plinovi imaju veliki molarni volumen, pa stoga kod njih na kemijski potencijal najviše utječe promjena tlaka.

Iz ovog razmatranja nije jasno na koji način nastaju razorni unutarnji tlakovi. Everett [8] 1961. je godine objasnio kako dolazi do rasta kristala koji generira razorna naprezanja u sustavu pora. Zamisli li se struktura betona kao niz zračnih šupljina povezanih porama, hlađenjem će doći do rasta kristala leda u zračnoj šupljini, a kako led zauzima veći volumen od utrošene vode, trebalo bi doći do pojave tlaka ako je brzina hlađenja dovoljno velika da spriječi izlazak vode na površinu uzorka. Međutim, Everett je pokazao da ne dolazi do porasta tlaka sve dok kristal ne popuni zračnu šupljinu. Nakon toga se smrzavanje nastavlja na jedan od dvaju načina:

- Voda se giba kroz pore prema mjestu nastajanja leda, zbog toga što led ima manji kemijski potencijal od vode, te sustav teži uspostaviti termodinamičku ravnotežu. Na nekoj konstantnoj temperaturi, kristal leda će rasti sve dok se ne izjednače kemijski potencijali leda i vode.
- Kada se šupljina popuni ledom, led može početi prodirati iz šupljina u pore. Porast tlaka ΔP_p pri kojemu rast kristala leda inicira prodor u pore je dan s:

$$\Delta P_p = 2\gamma_{sl}(1/r - 1/R) \quad (6)$$

gdje je:

γ_{sl} – energija ruba između leda i vode ($29,1 \text{ m J/m}^2$)

R – polumjer zračne šupljine

r – polumjer najveće kapilare

Ovo se očekuje pri temperaturi T_p

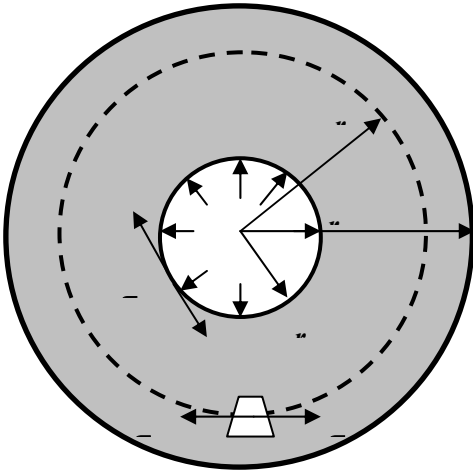
$$T_p = T_0(1 - V_s \Delta P_p / L) \quad (7)$$

gdje je V_s molarni volumen leda ($2 \cdot 10^5 \text{ m}^3$).

Iz ovog se razmatranja vidi da sa snižavanjem temperature rastu tlakovi koji uzrokuju naprezanja u betonu. Dakle smrzavanjem betona na niže temperature očekuju se veća oštećenja.

4.4 Mikromehanički model naprezanja induciranih smrzavanjem u sustavu pora

Ovaj model zasnovan na termodinamici opisuje smrzavanjem izazvane deformacije u betonu [9]. Pora u betonu modelira se kao cilindar s tankim stijenkama što je prikazano na slici 9.



Slika 9. Model pore u betonu [9]

Tangencijalno naprezanje na stijenku pore jednako je unutarnjem tlaku P . Snižavanjem temperature naprezanje $\sigma(\Theta)$ raste i kada postane veće od čvrstoće stijenke pore f , nastaju pukotine. Čvrstoća je u korelaciji sa stupnjem hidratacije α , što je dato jednadžbom (8).

$$f = \frac{f_t}{\sqrt{1 - c_d^2}}, \text{ gdje je } c_d = \frac{1,82\alpha}{2\alpha + 0,32} \quad (8)$$

Naprezanju očvrstnule betonske paste doprinos daju toplinsko naprezanje, širenje tlaka u porama, naprezanje zbog akumulacije pukotina i skupljanje zbog smrzavanja te gibanje vode iz gel pora prema ledu u kapilarnim porama, što se prikazuje jednadžbom (9).

$$\varepsilon = \varepsilon_T + \varepsilon_\sigma + \varepsilon_C + \varepsilon_S. \quad (9)$$

Širenje pornim tlakom može se izraziti jednadžbom:

$$\varepsilon_\sigma = \frac{\Delta p_f A_i(T)}{E_C} \quad (10)$$

gdje $A_i(T)$ opisuje doprinos pora smrznutih na T :

$$A_i(T) = \int_T^{\max} q(r) dr$$

Naprezanje akumulacijom pukotina

Ovo se naprezanje može staviti u korelaciju s razlikom između volumenskih širenja vode smrzavane na temperaturi T i na T_c . Volumenska promjena materijala na temperaturi T nakon pojave pukotina jest:

$$Dd = (V_f^T - V_f^{T_c}) \quad (11)$$

Naprezanje betona uzrokovano ovim inkrementalnim volumenskim širenjem može se približno izraziti s:

$$\varepsilon_c = \lambda D_d / 3 \quad (12)$$

gdje je λ faktor kojim se mikroskopsko naprezanje stijenki pora povezano s nastajanjem pukotina pretvara u makroskopsko naprezanje betona.

Skupljanje dano gibanjem nezaleđene vode

Skupljanje betona zbog smrzavanja je, kao što je prije objašnjeno, uzrokovano gibanjem vode iz gel pora, što je slično mehanizmu skupljanja sušenjem pa se za opis može primijeniti jednadžba:

$$\sigma_f = A_f(T) \Delta \delta_w \quad (13)$$

gdje je:

σ_f srednje skupljanje u lokalnom području u kojem se akumuliraju naprezanja dana negativnim tlakom u porama.

$A_f(T)$ je faktor koji daje djelovanje nezaleđene vode u lokalnom području:

Skupljanje i naprezanje povezuje relacija:

$$A_f(T) = V_0 - \int_{r_i}^{r_{\max}} q(r) dr \quad (14)$$

$$\varepsilon_s = \frac{A_i(T) \sigma_f}{V_0 K_s} \quad (15)$$

Model je izveden na osnovi uvjeta termodinamičke ravnoteže na mikroskopskoj razini. Jednadžbe koje opisuju naprezanja korigirane su za određene faktore da bi se dobila makroskopska naprezanja.

Eksperimenti [8] su pokazali dobro slaganje s ovim teorijskim modelom.

4.5 Model tlak - naprezanje

Muttaqin [3] je razvio matematički model koji se zasniva na naprezanjima i deformacijama betona izloženog djelovanju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Model simulira ponašanje realnih konstrukcija, gdje je beton izložen ciklusima smrzavanja i odmrzavanja i ciklusima tlačnih i vlačnih naprezanja.

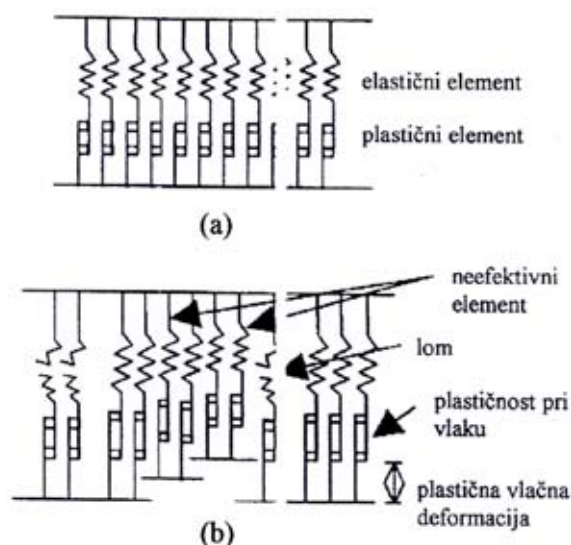
Provedeni su eksperimenti cikličkog smrzavanja i odmrzavanja različitih uzoraka, pri čemu su praćene deformacije uzoraka u uzdužnom i poprečnom smjeru. Nakon ciklusa smrzavanja provedeno je ispitivanje savijanjem u tri točke uz mjerenje deformacija do sloma uzorka. Provedena su i ciklička ispitivanja opterećivanja i rasterećivanja uzoraka, da bi se dobila oslobođena elastična energija uzoraka oštećenih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Provedena su i ispitivanja tlačnih napreznja s kontroliranim pomakom. Plastična napreznja i krutost pri rasterećivanju dobiveni su na osnovi ciklusa opterećivanja i rasterećivanja uzoraka. Napreznja uzoraka mjerena su s pomoću tzv. π -osjetila koja su bila tako raspoređena da se dobije raspodjela napreznja u uzdužnom smjeru.

Rezultati eksperimenata pokazali su da plastična vlačna napreznja kod uzoraka bez dodatka aeranta s brojem ciklusa smrzavanja rastu, dok kod uzoraka s uvučenim zrakom ostaju približno ista.

Opažen je pad tlačne čvrstoće, krutosti, dinamičkog modula elastičnosti i statičkog modula elastičnosti pri vlačnom napreznju. Ovi su rezultati poslužili kao ulazni podaci za izradu modela.

Pojava plastičnosti betona nakon provedenih ciklusa smrzavanja rezultat je pucanja zidova pora što rezultira nakupljanjem mikropukotina, i klizanja između cementne paste i krupnih zrna agregata tijekom opterećivanja betona.

U modelu je uzeto da se beton sastoji od niza elemenata plastičnosti i elastičnosti postavljenih u paralelu, što prikazuje slika 10.



Slika 10. Model tlak – napreznje [3]

Nakon oštećenja mikrostrukture ciklusima smrzavanja dolazi do pucanja pojedinih elastičnih elemenata i do povećanja plastičnosti što je prikazano na slici 10.b.

Može se napisati jednadžba koja povezuje mehanički jednakovrijedno napreznje (E) i mehanički jednakovrijednu deformaciju (S) za beton oštećen ciklusima smrzavanja (16).

$$S = \gamma_r \alpha \beta K_0 C_0 (E - E_p) \quad (16)$$

gdje su faktori α , β , K_0 i γ_r empirijski dobiveni jednadžbama:

$$\alpha = e^{-1.70E_{pf}} e^{1.70E_{pf}^{0.15} E_{max}^{0.85}} \Rightarrow E_{max} < E_{pf} \quad (17)$$

$$\alpha = 1.0 \Rightarrow E_{max} \geq E_{pf}$$

$$\beta = e^{-0.45E_{pf} (1 - e^{-30E_{pf}})} \quad (18)$$

$$K_0 = e^{-0.73E_{max} (1 - e^{-1.25E_{max}})} \quad (19)$$

$$\gamma_r = 1/6(9.0 - 4.0S_{max})(1.0 - 0.334E_{pf}) \left[1.062 + \frac{1}{100}(12.42E - 9.15)\log N \right] \quad (20)$$

α - efektivni faktor, jer je dio elastičnih elemenata slomljen i oni više ne nose efektivno opterećenje

β - parametar sloma nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

K_0 - parametar mehaničkog sloma

C_0 - početna krutost

γ - faktor koji opisuje nelinearnost krutosti pri opterećivanju i rasterećivanju.

Parametri α , β i K_0 su funkcije jednakovrijednog plastičnog napreznja (E_{pf}), maksimalnoga jednakovrijednog plastičnog napreznja (E_{max}).

U modelu je uzeto da mehanički jednakovrijedno plastično napreznje nije samo funkcija mehaničkog jednakovrijednog napreznja, već i ekvivalentnoga plastičnog napreznja zbog ciklusa smrzavanja:

$$E_p = E_{max} - a(1 - e^{-bE_{max}}) \quad (21)$$

Gdje su parametri a i b određeni s:

$$a = \frac{20}{7} - 2.10E_{pf} + 0.34E_{pf}^2 \quad (22)$$

$$b = 0.35 + 0.25E_{pf} + 0.18E_{pf}^2$$

Proračuni prema ovom modelu pokazali su dobro slaganje s eksperimentalnim podacima.

5 Zaključak

Smrzavanjem izazvana oštećenja strukture betona na makroskopskoj se razini manifestiraju smanjivanjem statičkog i dinamičkog modula elastičnosti i tlačne čvrstoće. Kod većih se oštećenja vide pukotine i odvajanje cementne paste na rubu zrna agregata. Ove se pojave mogu objasniti jedino na osnovi promatranja mikroskopskih svojstava betona. U radu su opisani mehanizmi koji dovode do pojave oštećenja betona zbog smrzavanja, iz

čega se vidi da se tijekom smrzavanja vode u sustavu pora betona događaju vrlo kompleksne pojave. Prikazano je i nekoliko modela svrha kojih je predviđanje ponašanja betona pod utjecajem mehanizama smrzavanja. Pokazuje se da razvoj modela s pomoću kojih se mogu uspješno predvidjeti smrzavanjem uzrokovana oštećenja betona nije nimalo jednostavan zadatak. Razlog tome je kompleksnost mikrostrukture betona koja se mijenja s vremenom.

LITERATURA

- [1] Powers, T.C.: *A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete*, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 16., (1945), 4, 245-272.
- [2] Verbeck, G.J.; Landgren, R.: *Influence of Physical Characteristics of Aggregate on the Frost Resistance of Concrete*, Proceedings. American Society of Testing and Materials. Vol. 30., (1960), 1063-1079.
- [3] Muttaqin, H.: *Modelling of Stress-Strain Relationships for Concrete Damaged by Freezing and Thawing Cycles*, Doctoral thesis, Graduate School of Engineering Hokkaido University, Japan, 2003
- [4] Skapski, A.; Billups, R.; Rooney, A.: *Capillary cone method for determination of surface tension of solids*. Journal of Chemical Physics, Vol. 26, (1957), 5, 1350-1351.
- [5] Fagerlund, G.: *The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete*, Materials and Structures, Vol. 10, (1977), 58, 217-229.
- [6] Fagerlund, G.: *Predicting the service life of concrete exposed to frost action through a modeling of the water absorption process in the air-pores system*, The Modelling of Microstructure and its Potential for Studying Transport Properties and Durability, ed. by H. Jennings et al., (1996), 503-537
- [7] Powers, T.C.: *The air requirement of frost-resistant concrete*, Proc. Highway Res. Board 29, (1949), 184-202
- [8] Everett, D.H.: *The thermodynamics of frost damage to porous solids*, Transactions of the Faraday Society, Vol. 57, (1961), 1541-1551
- [9] Mihashi, H.; Zhou, Z.: *Micro mechanics model to describe freezing induced strain behavior of concrete*, Proceedings of the International Workshop on Microstructure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures Sapporo, Japan, 2004.