

Primljen / Received: 4.10.2021.

Ispravljen / Corrected: 19.7.2022.

Prihvaćen / Accepted: 21.7.2022.

Dostupno online / Available online: 10.3.2023.

Eksperimentalno istraživanje otpornosti na smrzavanje poroznog betona s emulzijom kopolimera etilen vinil acetata i bazaltnim vlaknima

Autori:



¹Prof. dr. sc. **Wenhua Wang**
cgcxywwh@163.com



²Mr. sc. **Xiaojun Cheng**
chenfeng160205@163.com



²Mr. sc. **Jinzhong Zhu**
ccy16@berkeley.edu



²Mr. sc. **Siyu Liu**
lsq1995.95@163.com



³Doc. dr. sc. **Xiangsheng Chen**
chengxiaojun0910@163.com
Autor za korespondenciju

¹ Tehnički institut Changchun, Kina
Građevinski fakultet
Laboratorij za otpornost na potrese i smanjenje opasnosti u građevinskom inženjerstvu provincije Changchun Jilin

² Tehnički institut Changchun, Kina
Građevinski odjel

³ China Construction Eighth Engineering Division, Jinan, Kina

Prethodno priopćenje

[Wenhua Wang, Xiaojun Cheng, Jinzhong Zhu, Siyu Liu, Xiangsheng Chen](#)

Eksperimentalno istraživanje otpornosti na smrzavanje poroznog betona s emulzijom kopolimera etilen vinil acetata i bazaltnim vlaknima

Posljednjih godina široka je primjena poroznog betona u urbanim poroznim kolničkim konstrukcijama. Međutim, otkriveno je u praksi da je pucanje poroznog betonskog kolnika u hladnim klimatskim područjima mnogo ozbiljnije zbog njegove slabije otpornosti na djelovanje smrzavanja, a fenomen ljuštenja je očigledan. Osim toga, uočeno je djelovanje vibracija uslijed kretanja vozila na zdravlje vozača osobnih automobila koji prometuju po gradskim cestama. Kako bi se postigao porozni beton koji zadovoljava zahtjeve otpornosti na smrzavanje u hladnim klimatskim područjima, u ovom se istraživanju proučio porozni beton s bazaltnim vlaknima i emulzijom VAE-707. Zaključak koji se izveo na temelju eksperimenata pokazuje da, ako je zadovoljeno svojstvo vodopropusnosti, rezultati pokazuju da uvođenje 2 kg/m³ bazaltnih vlakana i 2 % emulzije VAE-707 može poboljšati svojstvo otpornosti na djelovanje smrzavanja poroznog betona.

Ključne riječi:

bazalna vlakna, emulzija VAE-707, porozni beton, otpornost na smrzavanje

Research Paper

[Wenhua Wang, Xiaojun Cheng, Jinzhong Zhu, Siyu Liu, Xiangsheng Chen](#)

Experimental study on freezing resistance of permeable concrete mixed with vinyl acetate-ethylene copolymer emulsion and basalt fiber

In recent years, permeable concrete has been widely used in the construction of urban permeable pavement. However, it has been discovered that during practical use, the cracking of permeable concrete pavement in seasonal freezing areas is more severe due to its poor frost resistance, and the phenomenon of threshing is evident. To obtain permeable concrete that meets the freezing resistance requirements of the seasonal freezing areas, the freezing resistance of permeable concrete mixed with basalt fiber and VAE-707 emulsion was studied in this study. The conclusion drawn from the experiments showed that compared to the basic group show that under the premise of satisfying the water permeability, the compounding of 2 kg/m³ of basalt fiber and 2% VAE-707 emulsion can improve the frost resistance of the permeable concrete.

Key words:

basalt fiber, VAE-707 emulsion, permeable concrete, frost resistance

1. Uvod

Porozni beton sadrži velik udio šupljina koje mu omogućuju dobru propusnost. Kako je to zeleni održivi materijal, široka je njegova primjena i u urbanim poroznim kolničkim konstrukcijama. Međutim, naprezanja na kolniku usredotočena su na dodirne točke između zrna agregata koji daje čvrstoću betonu. Otpornost na djelovanje smrzavanja poroznog betona često ne ispunjava propisane zahtjeve. Posebno na sjeveroistoku tijekom niskih temperatura zimi pogođeni su posteljica i kolnik, te dolazi do pucanja betonskog poroznog kolnika. Stoga je važno proučiti otpornost na smrzavanje poroznog betona.

Posljednjih godina uz intenzivno istraživanje razvoja poroznog betona, mnogi znanstvenici su istraživali utjecaj vodocementnog omjera, veličinu čestica agregata, omjer kvalitete agregata isplake, omjer pijeska, mineralnih dodataka i aeranta na svojstvo otpornosti prema djelovanju smrzavanja poroznog betona. Istraživanja pokazuju [1] da ti faktori značajno utječu na otpornost protiv smrzavanja poroznog betona, a stupanj je utjecaja od jakog do slabog. Chen i dr. [2] proveli su ispitivanja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na poroznom betonu primjenom metode brzog smrzavanja. Otkrili su da je glavni nedostatak djelovanja smrzavanja i odmrzavanja bio u obliku pukotina, dok neki uzorci poroznog betona mogu izdržati nakon 125 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Neka istraživanja su pokazala da dodavanje određene količine dodataka poroznom betonu može poboljšati njegova svojstva. Emulzija kopolimera etilen vinil acetata (engl. *vinil acetate-ethylene* - VAE) ima odlično prijanjanje, fleksibilnost, otpornost na vremenske uvjete, otpornost na kiseline i lužine, svojstva stvaranja filma, te također široku primjenu u adhezivima, vanjskoj izolaciji zidova, oblogama i drugim područjima [3]. VAE emulzije jednako tako mogu betonu poboljšati mehanička svojstva cementnih mortova [4]. Osim toga, dodavanje silicijske prašine i letećeg pepela poroznom betonu jednako tako poboljšava njegovu otpornost na smrzavanje [5]. Yang [6] je otkrio da dodavanje određene količine polipropilenskog akrilnog vlakna (engl. *Polypropylene acrylic fiber* - PAF) i silicijske prašine poroznom betonu može učinkovito poboljšati njegovu otpornost na djelovanje smrzavanja. Međutim, s napretkom tehnologije dostupna su mnoga nova vlakna. Među njima, kontinuirana bazaltna vlakna (engl. *Continuous basalt fiber* - CBF), novi, ekološki prihvatljiv, armiranobetonski materijal pokazuje bolja mehanička svojstva, otpornost na visoke temperature u usporedbi s drugim vlaknima [7]. Optimalna duljina, promjer i doziranje bazaltnih vlakana mogu znatno poboljšati mehanička svojstva poroznog betona poput vlačne čvrstoće, čvrstoće na savijanje, udarne čvrstoće, zamorne čvrstoće, kao i svojstva duktilnosti, žilavosti te sposobnosti pucanja [8-10]. Huang [11] i Hasan Dilbas [12] i dr. upotrijebili su mikrografe skenirajućeg elektronskog mikroskopa kako bi analizirali i procijenili mehanizam ojačanja i područje vezivanja sučeljka između vlakana i matrice na mikrorazini. Otkrili su da vlakna prelaze preko mikropukotina te stvaraju prostornu mrežu poroznom betonu, što ima ograničavajuću

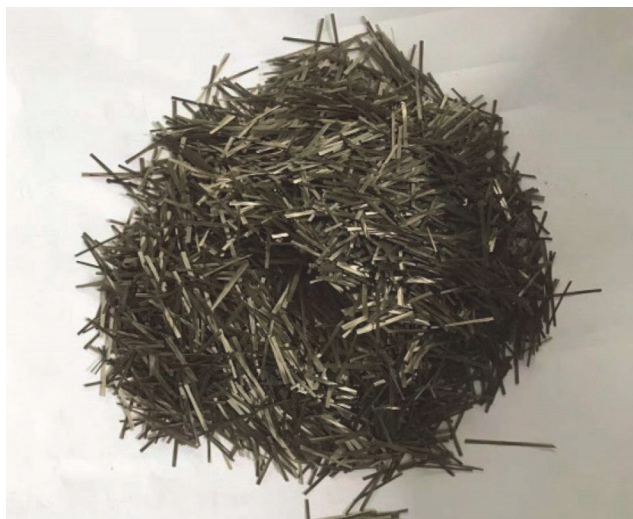
ulogu kad se mikropukotine šire, pri čemu se poboljšavaju mehanička svojstva.

Ukratko, postoji nekoliko istraživanja na temu paralelnog dodavanja bazaltnih vlakana i emulzije VAE-707 propusnom betonu. Uzimajući u obzir takvu pozadinu, ovo je istraživanje posvećeno poboljšanju otpornosti na smrzavanje poroznog betona te smanjenju pucanja betonskog kolnika dodavanjem dvaju dodataka, bazaltnih vlakana i emulzije VAE-707 poroznom betonu. Jednako tako, to omogućava važan teoretski temelj za unaprijeđenje primjene poroznog betona u praksi u sezonskim područjima smrznutog tla.

2. Eksperimentalni materijali i metode

2.1. Eksperimentalni materijali

U ovom radu koristio se obični portland cement: P.O42,5. Glavne kemijske komponente cementa su vapnenac, glina i prah željezne rude. Prema nacionalnim normama "Determination of Cement Density" (GB/T 208-2014) i "Determination of Cement Specific Surface Area (Bureau method)" (GB/T8074-2008), gustoća iznosi 3,1 g/cm³, a specifična površina 380 m²/kg. Nakon eksperimentalnih ispitivanja, tlačna čvrstoća cementa nakon tri dana iznosila je 25,2 MPa, a čvrstoća na savijanje 5,4 MPa. Početno vrijeme vezivanja iznosilo je 225 min, a krajnje 275 min. Što se tiče krupnog agregata, u eksperimentu se koristio obični drobljeni kamen jednostruko drobljen čija je veličina čestice približno 5 - 10 mm. Prema nacionalnoj normi Narodne Republike Kine "Pebble and Gravel for Construction" (GB/T 14685-2011), nasipna gustoća krupnog agregata iznosi 1630 kg/m³, a prividna gustoća iznosi 2720 kg/m³. Bazaltna vlakna koja se koriste u eksperimentu proizvela je tvrtka Tonghua Basalt Fiber (Group) Co., d.o.o. Nasjeckana vlakna bazalta duljine su 18 mm, promjera 14 μm, s doziranjem od 2 kg/m³, kao što prikazuje slika 1. Njihova svojstva prikazuje tablica 1. (svojstva su prihvaćena od strane proizvođača).



Slika 1. Nasjeckana bazaltna vlakna

Što se tiče dodatka, VAE-707 emulzija koja se koristi u eksperimentu bila je bijela pasta kao što prikazuje slika 2., a njezina su svojstva prikazana u tablici 2. U eksperimentu se koristio sustav poli-karboksilne kiseline, superplastifikatora čiji udio smanjenja vode iznosi 37 %. Glavna komponenta silicijske prašine bilo je 96,74 % SiO₂. Proizvođač prihvaća indikatore performansi navedenog dodatka.



Slika 2. Emulzija VAE-707

Tablica 1. Svojstva bazaltnih vlakana

| Promjer [μm] | Duljina [mm] | Gustoća [g/cm ³] | Vlačna čvrstoća [MPa] | Modul elastičnosti [GPa] |
|--------------|--------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 14 | 18 | 2,65 | 3300-4500 | 95-115 |

Tablica 2. Svojstva emulzije VAE-707

| pH vrijednost | Nehlapljiva tvar [%] | Viskoznost [mPa·s] | Veličina čestice [μm] | Udio etilena [%] |
|---------------|----------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| 4,0-6,0 | 54,5 | 500-1000 | 2 | 16 |

2.2. Eksperimentalna metoda

2.2.1. Priprema eksperimenta

Za pripremu uzorka, omjer za mješavinu računa se primjenom metode volumena. Vodocementni omjer bio je 0,3, proračunska poroznost bila je 15 %, udio silicijske prašine bio je 5 %, udio superplastifikatora 0,5 %, a udio emulzije VAE-707 bio je 2 %. Omjeri mješavina četiriju kontrolnih grupa prikazani su u tablici 3. Napravljena su po tri uzorka za svako svojstvo promatrane mješavine, a za rezultat se uzela prosječna vrijednost triju uzoraka. U eksperimentu se primijenilo 8 ciklusa smrzavanja i

Tablica 3. Omjeri mješavina četiriju kontrolnih grupa

| Grupa | Agregat [kg/m ³] | Cement [kg/m ³] | Silicijska prašina [kg/m ³] | Superplastifikator [kg/m ³] | Voda [kg/m ³] | Vlakna [kg/m ³] | Emulzija VAE-707 [kg/m ³] |
|-------|------------------------------|-----------------------------|---|---|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 1597,4 | 392,73 | 20,78 | 2,08 | 124,68 | - | - |
| 2 | 1597,4 | 392,73 | 20,78 | 2,08 | 124,68 | 2 | - |
| 3 | 1597,4 | 377,22 | 20,39 | 2,04 | 122,34 | - | 8,16 |
| 4 | 1597,4 | 377,22 | 20,39 | 2,04 | 122,34 | 2 | 8,16 |

Napomena: Osnovna grupa je prikazana kao 1., grupa s bazaltnim vlaknima kao 2., grupa s emulzijom VAE-707 kao 3. te grupa s bazaltnim vlaknima i emulzijom VAE-707 kao 4.

Tablica 4. Program ispitivanja

| Opis grupe | Svojstvo | Zahtjevi propisani normom | Broj uzoraka |
|--|--|--------------------------------------|--------------|
| 1 - Grupa bez dodatka | promjena gubitka tlačne čvrstoće | ≤ 20 % (after 25 freeze-thaw cycles) | 24 |
| | promjena gubitka mase | ≤ 5 % (after 25 freeze-thaw cycles) | 24 |
| | relativni dinamički modul elastičnosti | < 60 % | 24 |
| 2 - Grupa u kojoj su dodana samo bazalna vlakna | promjena gubitka tlačne čvrstoće | ≤ 20 % (after 25 freeze-thaw cycles) | 24 |
| | promjena gubitka mase | ≤ 5 % (after 25 freeze-thaw cycles) | 24 |
| | relativni dinamički elastični modul | < 60 % | 24 |
| 3 - Grupa s emulzijom EVA-707 | promjena gubitka tlačne čvrstoće | ≤ 20 % (after 25 freeze-thaw cycles) | 24 |
| | promjena gubitka mase | ≤ 5 % (after 25 freeze-thaw cycles) | 24 |
| | relativni dinamički modul elastičnosti | < 60 % | 24 |
| 4 - Grupa s dodanim bazaltnim vlaknima i emulzijom VAE-707 | promjena gubitka tlačne čvrstoće | ≤ 20 % (after 25 freeze-thaw cycles) | 24 |
| | promjena gubitka mase | ≤ 5 % (after 25 freeze-thaw cycles) | 24 |
| | relativni dinamički modul elastičnosti | < 60 % | 24 |

odmrzavanja, te su stoga trebala ukupno 24 ispitna uzorka za svako svojstvo. Tablica 4. prikazuje program ispitivanja. Prema istraživanju [13-15], metode miješanja i ugradnje poroznog betona značajno utječu na mehanička svojstva, vodopropusnost i otpornost na smrzavanje. Tako se s cementnom pastom mogu potpuno obaviti agregati pri čemu se učinkovito povećava kohezivnost između agregata, a što poboljšava raniju i kasniju čvrstoću poroznog betona. Zbog toga se takva metoda miješanja koristi u ovom istraživanju. U miješalicu su najprije dodani agregat i vlakna te su miješani 30 s, zatim je dodano 20 % vode nakon 30 s. Nakon toga dodani su se cement, silicijska prašina, superplastifikatori preostalih 80 % vode, a mješavina se miješala 150 s. Dobivena mješavina prikazana je na slici 3.

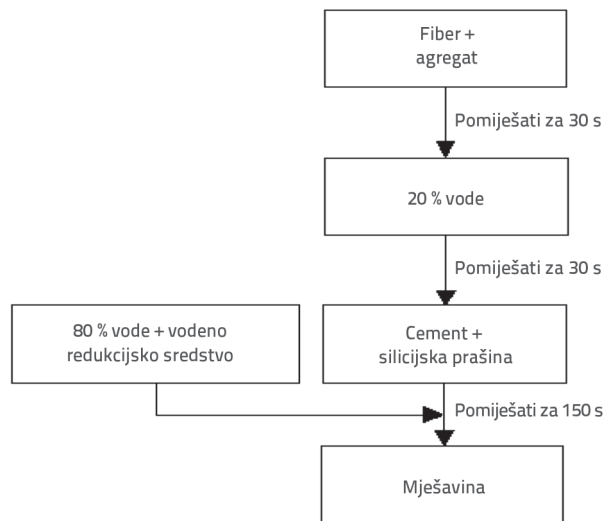


Slika 3. Prikaz dobivene mješavine

Oprema i postupak koji se koristi u eksperimentu prikazani su na slikama 4. i 5. U usporedbi s drugim metodama ugradnje u kalupe, ugradnja uz vibriranje jednostavna je za rukovanje i poboljšava mehanička svojstva i vodopropusnost uzoraka. Iz tog se razloga odabrala metoda vibriranjem prilikom ugradnje betona u kalupe u ovom radu. Tijekom izrade mješavina beton se ugradio u ispitni kalup te položio na vibrostol radi vibriranja. Uzorci su uklonjeni nakon 8 s, a zatim zamiješani uz pomoć čelične šipke Ø40 mm te zaglađeni špatulom.

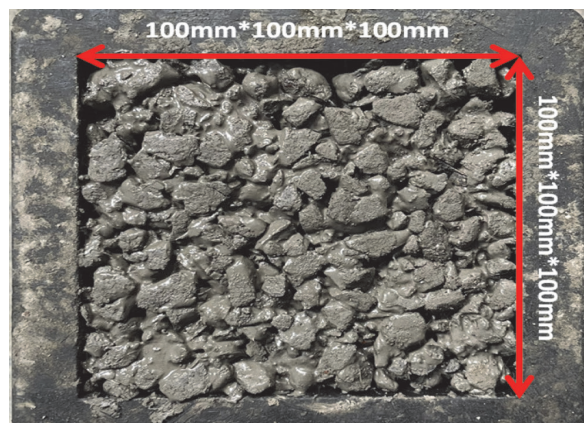


Slika 4. Miješalica HJW-60

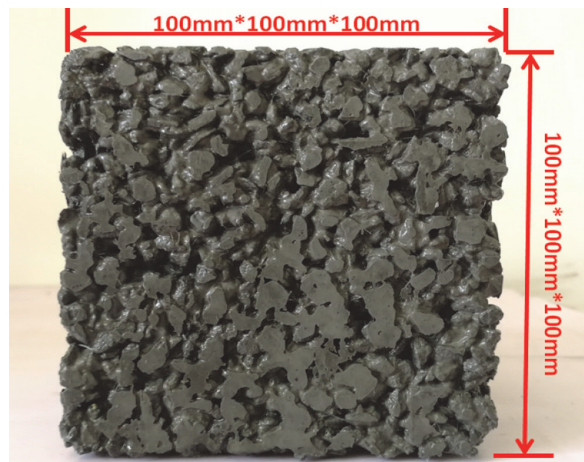


Slika 5. Dijagram toka koji prikazuje metodu miješanja

Kao što je prikazano na slici 6., nakon punjenja mješavine u ispitne kalupe dimenzija 100 mm × 100 mm × 100 mm, uzorci su stavljeni u prostoriju na 48 sati, a nakon toga su izvađeni iz kalupa (slika 7.).



Slika 6. Beton ugrađen u ispitni kalup



Slika 7. Uzorak poroznog betona s bazaltnim vlaknima

Takvi uzorci stavljeni su u prostoriju na 24 dana gdje su se održavali uvjeti standardnog njegovanja (temperatura 20 ± 2 °C, relativna vlažnost veća ili jednaka 95 %). Poslije tog postupka uzorci su četiri dana ostavljeni u 20-30 mm vode kako bi očvrstnuli. Potom su se osušili u tamnoj prostoriji i bili pripremljeni za naknadne eksperimente.

2.2.2. Brzo ispitivanje otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje

Na pripremljenim uzorcima najprije je ispitana otpornost na smrzavanje i odmrzavanje kako bi se usporedila promjena gubitka mase, promjena gubitka tlačne čvrstoće i promjene relativnog dinamičkog modula elastičnosti na uzorcima poroznog betona izloženih različitim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. To ispitivanje podrazumijeva laboratorijsku metodu brzog smrzavanja, pa su uzorci stavljeni u uređaj za ispitivanje brzog smrzavanja i odmrzavanja - TDR-16, kao što prikazuju slike 8. i 9.



Slika 8. Uređaj za ispitivanje brzog smrzavanja i odmrzavanja

Prije no što se započelo s ispitivanjem, namjestila se temperatura uređaja u kojoj se obavlja smrzavanje i odmrzavanje. Prema normi "Standard for Long-term Performance and Durability Test Methods of Ordinary Concrete" GB/T50082-2009, uočava se da je tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja uzoraka poroznog betona središnja temperatura uzoraka najviša, u usporedbi s drugim dijelovima, održavana unutar -18 ± 2 °C, odnosno najniža unutar 5 ± 2 °C. U svakom trenutku najviša temperatura jezgre ne bi trebala biti veća od 7 °C, a najniža ne bi trebala biti

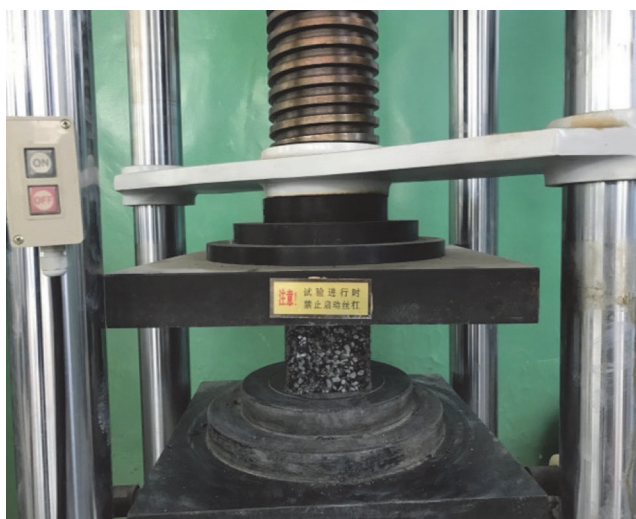
niža od -20 °C. Svaki ciklus smrzavanja i odmrzavanja trebao bi se kontrolirati unutar 2 do 4 sata, a vrijeme odmrzavanja ne bi trebalo biti manje od četvrtine ukupnog vremena ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Uzorci su uzimani nakon 0, 25, 50, 60, 70, 80, 90 i 100 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja kako bi se usporedile promjene gubitka mase, gubitka tlačne čvrstoće i relativnog modula elastičnosti.



Slika 9. Unutrašnjost uređaja za ispitivanje brzog smrzavanja i odmrzavanja

2.2.3. Ispitivanje promjene gubitka tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća ispitana je pomoću računalno upravljane elektrohidrauličke servohidraulične preše kao što je prikazano na slici 10.



Slika 10. Uređaj za ispitivanje tlačne čvrstoće

To ispitivanje provedeno je na uzorcima poroznog betona u različitim kontrolnim grupama i ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Nakon što je ispitana tlačna čvrstoća, izračunana je promjena gubitka tlačne čvrstoće, a jednadžba (1) prikazuje izraz za promjenu gubitka tlačne čvrstoće:

$$\Delta f_c = \frac{f_{c0} - f_{cn}}{f_{c0}} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

gdje je:

Δf_c - promjena gubitka čvrstoće poroznog betona nakon N ciklusa [%]

f_{co} - početna tlačna čvrstoća poroznog betona [MPa]

f_{cn} - tlačna čvrstoća poroznog betona nakon N ciklusa [MPa]

2.2.4. Ispitivanje promjene gubitka mase

Promjena gubitka mase izračunana je mjerenjem mase uzoraka poroznog betona prije i nakon što su bili izloženi različitim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, i to prema izrazu (2):

$$\Delta W_n = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

gdje je:

ΔW_n - promjena gubitka mase nakon N ciklusa smrzavanja i odmrzavanja (precizno u postotku) [%]

w_0 - početna masa uzorka prije ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [g]

w_n - masa uzorka nakon N ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [g].

2.2.5. Ispitivanje relativnog dinamičkog modula elastičnosti

Betonskim ultrazvučnim detektorom ispitan je dinamički modul elastičnosti uzoraka poroznog betona nakon različitih ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, kao što je prikazano na slici 11. Taj se uređaj uglavnom sastoji od hostuređaja i ultrazvučnih sondi. Funkcionira tako da detektira unutarnju homogenost, cjelovitost, jednolikost i druge karakteristike betona mjerenjem brzine prolaska ultrazvučnog vala kroz beton. Prije ispitivanja stavlja se na dio sonde kontaktno sredstvo kako bi osiguralo da ne postoji praznina između sonde i uzorka, a time bi se poboljšala provodljivost te smanjila buka. Tijekom ispitivanja sonda se prisloni na uzorak betona kako bi se izvršilo mjerenje, a brzina prolaska ultrazvučnih valova u betonu mogla se vidjeti na hostuređaju. Brzina prolaska ultrazvučnog vala smanjila bi se s povećanjem stupnja oštećenja unutarnje strukture uzorka. Stupanj oštećenosti unutarnje strukture uzorka može se procijeniti iz brzine prolaska ultrazvučnih valova. Izraz (3) prikazuje relativni dinamički modul elastičnosti:

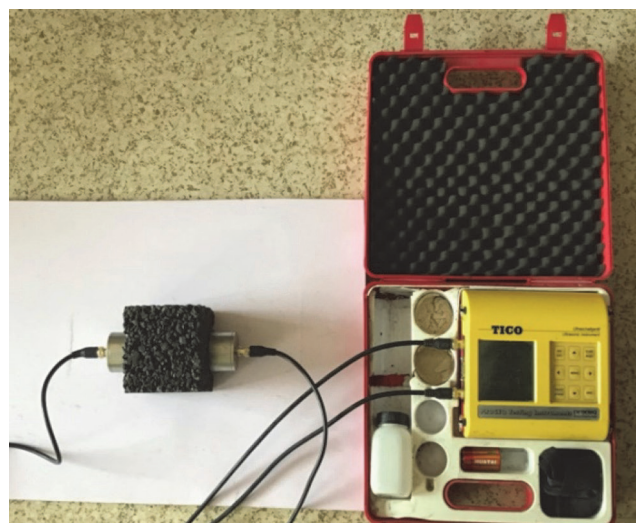
$$E_r = \frac{V_n^2}{V_0^2} \quad (3)$$

gdje je:

E_r - relativni dinamički modul elastičnosti

V_n - brzina prolaska ultrazvučnog vala nakon N ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [m/s]

V_0 - početna brzina vala [m/s₀].



Slika 11. Ultrazvučni uređaj za ispitivanje betona

3. Eksperimentalni rezultati i analiza

3.1. Eksperimentalni rezultati i analiza promjene gubitka tlačne čvrstoće

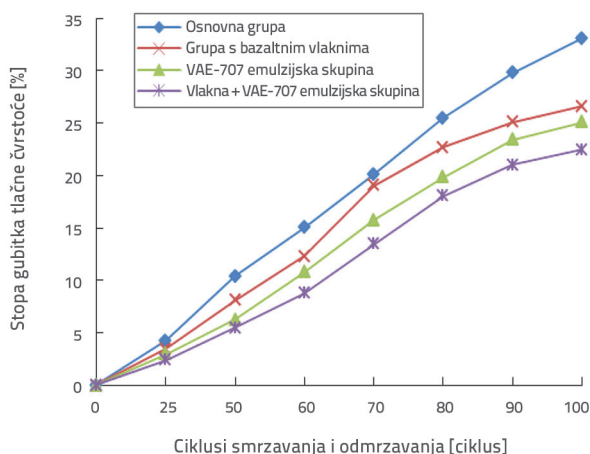
Eksperimentalni rezultati tlačne čvrstoće poroznog betona u osnovnoj grupi, grupi s bazaltnim vlaknima, grupi s emulzijom VAE-707 te grupi s bazaltnim vlaknima i emulzijom VAE-707 prikazani su u tablici 5. Može se zaključiti, na temelju eksperimentalnih podataka, da kad se miješa samo s 2 kg/m³ bazaltnih vlakana, promjena gubitka tlačne čvrstoće poroznog betona smanjena je za 6 % u usporedbi s osnovnom grupom. Kada se miješa samo s 2 % emulzije VAE-707, tlačna čvrstoća poroznog betona smanjuje se za 8 % u usporedbi s osnovnom

Tablica 5. Tlačne čvrstoće uzoraka nakon različitih ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u različitim kontrolnim grupama

| Tlačne čvrstoće uzoraka nakon različitih ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [MPa] | | | | | | | | |
|---|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| Grupa | 0 ciklusa | 25 ciklusa | 50 ciklusa | 60 ciklusa | 70 ciklusa | 80 ciklusa | 90 ciklusa | 100 ciklusa |
| 1 | 23,78 | 22,77 | 21,31 | 20,2 | 18,99 | 17,72 | 16,7 | 15,91 |
| 2 | 25,84 | 24,95 | 23,74 | 22,67 | 20,92 | 19,97 | 19,35 | 18,96 |
| 3 | 20,7 | 20,09 | 19,41 | 18,46 | 17,43 | 16,6 | 15,85 | 15,51 |
| 4 | 21,49 | 20,97 | 20,32 | 19,6 | 18,6 | 17,61 | 16,97 | 16,67 |

Napomena: Osnovna je grupa prikazana kao 1, grupa s bazaltnim vlaknima kao 2, grupa s emulzijom VAE-707 kao 3, te grupa s bazaltnim vlaknima i emulzijom VAE-707 kao 4

grupom. Kada se miješaju s 2 kg/m³ bazaltnih vlakana i emulzije VAE-707, promjena gubitka tlačne čvrstoće poroznog betona smanjila se za 11 % u usporedbi s osnovnom grupom.



Slika 12. Usporedba promjene gubitka tlačne čvrstoće različitih kontrolnih grupa

Prema "Tehničkim specifikacijama za porozni cementni betonski kolnik" (CJJ/T 135-2009), otpornost na smrzavanje poroznog cementnog betona treba biti promjena gubitka tlačne čvrstoće manja ili jednaka 20 % nakon 25 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Može se vidjeti na slici 12. da promjena gubitka tlačne čvrstoće četiriju različitih kontrolnih grupa zadovoljava zahtjeve propisane tehničkom specifikacijom, no sa stalnim povećanjem broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja povećava se promjena gubitka tlačne čvrstoće poroznog betona. Promjena gubitka tlačne čvrstoće u osnovnoj grupi dosegla je 20 % nakon 70 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Promjena gubitka tlačne čvrstoće u grupi s vlaknima dosegla je 20 % između 70 i 80 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Promjena gubitka tlačne čvrstoće u grupi s emulzijom VAE-707 dosegla je 20 % nakon 80 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. U usporedbi s ostale tri skupine, promjena gubitka tlačne čvrstoće u grupi s vlaknima i emulzijom VAE-707 značajno se smanjila, a promjena gubitka doseže 20 % kad je izložena otprilike 90 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, a što je oko 20 ciklusa više odmrzavanja u osnovnoj grupi i oko 10 ciklusa više nego broj odmrzavanja u grupi s vlaknima i emulzijom VAE-707. Wang [16] i Bai i dr. [17] zaključili su da se vrijeme stvaranja gela tijekom hidratacije cementa značajno produljuje nakon dodavanja emulzije VAE-

707 u propusni beton, značajno se može poboljšati učinak gela te se do određene mjere može utjecati na unutarnju mikrostrukturu betona. Određena količina emulzije VAE može značajno poboljšati tlačnu čvrstoću betona.

Istovremeno, u usporedbi s osnovnom grupom, značajno se usporila promjena gubitka tlačne čvrstoće u ostale tri grupe nakon 80 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. To je zbog dodavanja emulzije VAE-707 koja utječe na reakciju hidratacije u betonu, kao i na proces očvršćivanja. Ne samo da može spriječiti brzi gubitak vlage u cementnom mortu što za posljedicu ima jaču adheziju agregata, već može spriječiti brzi gubitak vlage i u reakciji hidratacije cementa, a kad je u kombinaciji s Ca(OH)₂ koji nastaje reakcijom hidratacije, stvara gel koji u potpunosti može obuhvatiti agregat zbog čega se značajno poboljšava sposobnost vezivanja agregata. Osim toga, Akand i dr. [18] proučili su utjecaj vlakana na čvrstoću mikrostrukture i krutost poroznog betona izradom modela, te su zaključili da su vlakna odgodila stvaranje pukotina i poboljšala čvrstoću matrice poroznog betona. Uočava se da povećanje tlačne čvrstoće poroznog beton počinje stvarati mikropukotine. Ovoga puta vlakna se ponašaju kao "most" koji učinkovito sprječava brzo širenje mikropukotina. Iz navedene analize može se zaključiti da spajanje bazaltnih vlakana i emulzije VAE-707 može učinkovito poboljšati otpornost poroznog betona na djelovanje smrzavanje.

3.2. Eksperimentalni rezultati i analiza promjene gubitka mase

Tablica 6. prikazuje mase poroznog betona u osnovnoj grupi, grupi s bazaltnim vlaknima, grupi s emulzijom VAE-707 te grupi s bazaltnim vlaknima i emulzijom VAE-707. Može se vidjeti iz tablice da je, kad se miješa s 2 kg/m³ samo bazaltnih vlakana, promjena gubitka mase poroznog betona smanjena za 0,5 % u usporedbi s osnovnom grupom. Kada se miješa samo s 2 % emulzije VAE-707, promjena gubitka mase poroznog betona smanjila se za 1,2 % u usporedbi s osnovnom grupom. Kada se miješaju s 2 kg/m³ bazaltnih vlakana i 2 % emulzije VAE-707, promjena gubitka mase poroznog betona smanjila se za 1 % u usporedbi s osnovnom grupom.

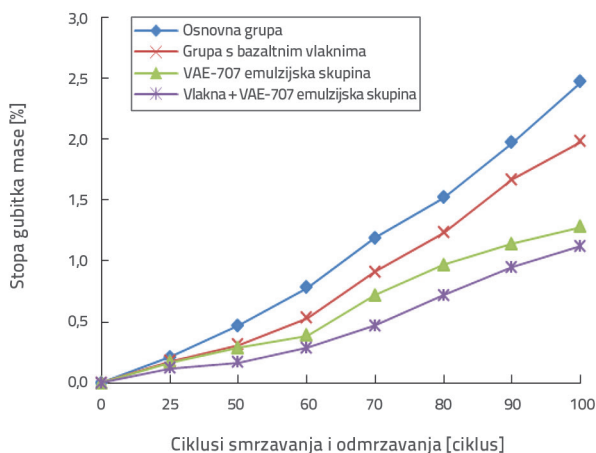
Prema zahtjevima propisanim "Tehničkom specifikacijom za porozni cementni betonski kolnik" (CJJ/T 135-2009), otpornost poroznog cementnog betona na smrzavanje treba zadovoljiti promjenu gubitka mase koja je manja ili jednaka 5 % after 25 freeze-thaw cycles. Rezultati pokazuju da se s

Tablica 6. Izmjerene mase nakon različitih ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u različitim kontrolnim grupama

| Izmjerena masa nakon određenog broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [g] | | | | | | | | |
|---|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| Grupa | 0 ciklusa | 25 ciklusa | 50 ciklusa | 60 ciklusa | 70 ciklusa | 80 ciklusa | 90 ciklusa | 100 ciklusa |
| 1 | 2159,7 | 2155,2 | 2149,5 | 2142,9 | 2134 | 2126,9 | 2117,2 | 2106,4 |
| 2 | 2177 | 2173,1 | 2170,2 | 2165,5 | 2157,2 | 2150,2 | 2140,6 | 2133,9 |
| 3 | 1971,9 | 1968,4 | 1966,2 | 1964,2 | 1957,7 | 1952,9 | 1949,4 | 1946,7 |
| 4 | 2133,3 | 2130,8 | 2129,7 | 2127,1 | 2123,3 | 2117,9 | 2113 | 2109,4 |

povećanjem broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja povećava i promjena gubitka mase oljuštenog materijala četiriju kontrolnih grupa u različitim ciklusima, a što pokazuje da se površina uzoraka poroznog betona počinje oštećivati nakon nekoliko ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, te će se pojaviti očito ljuštenje betona. S povećanjem broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, unutrašnjost betona također će se uništiti, a šteta nastala smrzavanjem i odmrzavanjem pojavit će se kad smrzavanje i odmrzavanje dosegne određenu razinu. Na slici 13. može se vidjeti da promjena gubitka mase četiriju grupa mješavina poroznog betona ne doseže 5 %, čak ni nakon 100 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja što zadovoljava zahtjevima propisanim "Tehničkom specifikacijom". Međutim, promjena gubitka mase postupno usporava nakon 80 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u slučaju grupe s emulzijom VAE-707 te grupe s vlaknima i emulzijom VAE-707 u usporedbi s osnovnom grupom i grupom s vlaknima, a što pokazuje da je dodavanje emulzije VAE-707 poboljšalo kvalitetu veze između cementne paste i agregata u području zone sučeljka, čime se usporava ljuštenje i oštećenost propusnog betona.

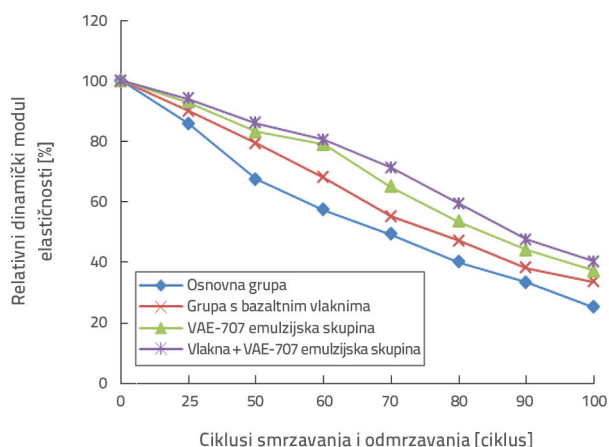
Istraživanja [19-21] pokazuju da je emulzija VAE-707 ekološki prihvatljiv materijal dobre adhezije, otpornosti na vremenske uvjete, otpornosti na kiselinu i lužine i drugih svojstava. Široka je njena primjena u sredstvima za lijepljenje, oblogama i u drugim područjima. Kao dodatak, emulzija VAE-707 može se koristiti u poroznom betonu kako bi nadoknadila mikrostrukturne defekte u cementnom kamenu te kako bi spriječila pojavu i razvoj mikropukotina. Može se jednako tako na slici 4.2. vidjeti da nakon 100 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja promjena gubitka mase osnovne grupe doseže 2,5 %, u grupi s vlaknima doseže 2 %, a u grupi s emulzijom VAE-707 manja je od 2 % i veća od 1 %. Grupa s vlaknima i emulzijom VAE-707 ima najmanju promjenu gubitka mase, od samo 1 %. Sve u svemu, grupa s vlaknima i emulzijom VAE-707 pokazuje sporije povećanje u promjeni gubitka mase u odnosu na ostale tri grupe. Uočeno je da se spajanjem bt poboljšava otpornost poroznog betona na smrzavanje.



Slika 13. Usporedba promjene gubitka mase različitih kontrolnih grupa

3.3. Eksperimentalni rezultati i analiza relativnog dinamičkog modula elastičnosti

Istraživanja pokazuju da je velika pouzdanost relativnog dinamičkog modula elastičnosti kao pokazatelja trajnosti betona. Zasad metode mjerenja dinamičkog modula elastičnosti betona uglavnom uključuju metodu rezonantne frekvencije i metodu ultrazvuka te metodu udarnog elastičnog vala. Među njima, metoda rezonantne frekvencije ne može izmjeriti dinamički modul elastičnosti betona in situ, dok metoda udarnog elastičnog vala funkcionira po istom principu kao i ultrazvučna metoda, a dinamički modul elastičnosti betona računa se mjerenjem brzine elastičnog vala unutar betona [23]. Uvriježeno je mišljenje da kad je relativni dinamički modul elastičnosti betona manji od 60 %, smatra se da dolazi do loma pri smrzavanju i odmrzavanju.



Slika 14. Usporedba promjene relativnog dinamičkog modula elastičnosti različitih kontrolnih grupa

Slika 14. prikazuje grafikon usporedbe četiriju grupa relativnog dinamičkog modula elastičnosti. Prema analizi relativnog dinamičkog modula elastičnosti, kad se s 2 kg/m³ bazaltnih vlakana miješa samo, relativni dinamički modul elastičnosti propusnog betona povećava se za 8 % u usporedbi s osnovnom grupom. Kad se miješa s 2 % emulzije VAE-707, relativni se dinamički modul elastičnosti povećava za 12 % u usporedbi s osnovnom grupom poroznog betona. Kada se miješaju s 2 kg/m³ bazaltnih vlakana i 2 % emulzije VAE-707, promjena gubitka tlačne čvrstoće smanjila se za 11 % u usporedbi s osnovnom grupom poroznog betona. Osim toga, s 50 do 60 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, relativni dinamički modul elastičnosti doseže 60 % u osnovnoj grupi, te dolazi do loma uslijed smrzavanja i odmrzavanja. Tijekom 60 do 70 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, relativni dinamički modul elastičnosti doseže 60 % u grupi s vlaknima pri čemu dolazi do loma uslijed smrzavanja i odmrzavanja. Relativni dinamički modul elastičnosti grupe s emulzijom povećava se u usporedbi s prethodne dvije grupe, dosežući 60 % u slučaju kad je broj ciklusa između 70 i 80 pri čemu dolazi do razaranja uslijed smrzavanja i odmrzavanja. Iako

grupe s bazaltnim vlaknima i emulzijom VAE-707 pokazaju najveću otpornost na djelovanje, relativni dinamički modul elastičnosti doseže 60 % u slučaju 80 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, te dolazi do pojave oštećenja uslijed smrzavanja i odmrzavanja.

Relativni dinamički modul elastičnosti u slučaju različitih kontrolnih grupa pokazuje trend smanjenja kako se povećava broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. To je zato što se oštetila unutarnja struktura poroznog betona s povećanjem broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja i pojavom mikropukotina na sučelju pri čemu dolazi do raspucavanja veze između cementne matrice agregata, a čime se smanjuje pouzdanost poroznog betona. Međutim, bazalna vlakna dodana poroznog betonu mogu imati ulogu "mosta" te poboljšati čvrstoću propusnog betona. Nejednolika raspodjela vlakana može se oduprijeti pojavi unutarnjeg tlaka izazvanog smrzavanjem vode u betonu i nedovoljnim prostorom za širenjem leda u propusnom betonu te odgoditi migraciju vlage u unutrašnjim porama betona pri čemu se sprečava nastanak pukotina tako da uspori brzinu unutarnjeg razaranja poroznog betona. Osim toga, miješanje emulzije također ima primjetan utjecaj. Lou [24] je otkrio da je viši relativni dinamički modul elastičnosti uzoraka poroznog betona pomiješanog s emulzijom VAE-707 nego li onaj u osnovnoj grupi. To pokazuje da je emulzija VAE-707 imala ulogu stabilizatora unutarnje strukture poroznog betona izloženog uvjetima smrzavanja i odmrzavanja. Ukratko, otpornost na smrzavanje poroznog betona značajno se poboljšala kombinacijom bazaltnih vlakana i emulzije VAE-707.

4. Zaključak

Zaključci se izvode na temelju komparativne analize promjene gubitka tlačne čvrstoće, promjene gubitka mase i relativnog dinamičkog modula elastičnosti nakon različitih ciklusa smrzavanja i odmrzavanja propusnog betona u četiri različite kontrolne grupe, točnije osnovne grupe, grupe s bazaltnim vlaknima, grupe s emulzijom VAE-707 i grupe s bazaltnim vlaknima i emulzijom VAE-707:

- U usporedbi s osnovnom grupom poroznog betona, određen stupanj utjecaja na otpornost protiv smrzavanja poroznog betona imaju pojedinačno miješana bazalna vlakna. Nakon 80 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja bilo je manje povećanje gubitka tlačne čvrstoće. Nakon 100 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, a u usporedbi s osnovnom grupom, promjena gubitka tlačne čvrstoće i promjena gubitka mase smanjile su se za 6,5 %, odnosno za 0,5 %. Relativni dinamički modul elastičnosti povećao se za 8,4 %. To pokazuje da bi uključivanje bazaltnih vlakana moglo značajno povećati tlačnu čvrstoću i poboljšati žilavost i duktilnost poroznog betona.
- U usporedbi s osnovnom grupom i grupom s vlaknima, poboljšana je otpornost na smrzavanje poroznog betona dodavanjem emulzije VAE-707. Nakon 100 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja promjena gubitka tlačne čvrstoće i gubitka mase smanjili su se za 8 % i 1,19 % u usporedbi s

osnovnom grupom, a relativni dinamički modul elastičnosti povećao se za 12,07 %. U usporedbi s grupom s vlaknima, promjena gubitka tlačne čvrstoće i gubitka mase smanjili su se za 1,54 % i 0,7 %, a relativni dinamički modul elastičnosti povećao se za 3,63 %. Otkriveno je da emulzija VAE-707 koja se koristi u poroznom betonu nadoknadila je oštećenja mikrostrukture u cementnom kamenu te spriječila pojavu i razvoj mikropukotina.

- Kompozit od vlakna i emulzije VAE-707 dodatno su poboljšali otpornost poroznog betona na smrzavanje. U usporedbi s osnovnom grupom nakon 100 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, promjena gubitka tlačne čvrstoće i gubitka mase smanjila se za 10,6 % i 1,35 %, a relativni dinamički modul elastičnosti povećao za 15,1. Kombinirani učinak bazaltnih vlakana i emulzije VAE-707 poroznog betona poboljšava otpornost na djelovanje smrzavanja poroznog betona sprječavanjem širenja unutarnjih mikropukotina uz pomoć djelovanja vlakana i učinka vezanja emulzije na unutarnji agregat.
- Od svih kontrolnih grupa postavljenih u eksperimentu nakon 50-60 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, osnovna je grupa došla do loma uslijed smrzavanja i odmrzavanja. Grupa s vlaknima došla je do loma nakon 60-70 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Grupa s emulzijom VAE-707 došla je do loma nakon 70-80 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Grupa s vlaknima i emulzijom VAE-707 došla je do loma nakon 70-80 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Ono što je prvo navodilo na to da će doći do loma uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u svim grupama bio je relativni dinamički modul elastičnosti. Miješanjem s 2 kg/m³ bazaltnih vlakana i 2 % emulzije VAE-707 učinkovito se poboljšala otpornost poroznog betona na smrzavanje, a promjena gubitka tlačne čvrstoće i gubitka mase zadovoljile su zahtjeve propisane specifikacijom.

Istraživanje koje se temelji na ispitivanju otpornosti na smrzavanje poroznog betona izrađenog s različitim materijalima pokazuje da u kombiniranom djelovanju bazaltnih vlakana i emulzije VAE-707, otpornost na smrzavanje poroznog betona može se poboljšati sprječavanjem širenja unutarnjih mikropukotina uz pomoć vlakana i jačanjem veze na sučelju cementne paste i agregata djelovanjem emulzije. Stoga je dodavanje 2 kg/m³ bazaltnih vlakana i 2 % emulzije VAE-707 uspješno poboljšalo otpornost propusnog betona na smrzavanje.

Zahvala

Istraživanje je financijski potpomogao Projekt razvoja znanosti i tehnologije pokrajine Jilin: Istraživanje koje se tiče ključne tehnologije u primjeni propusnog betona s bazaltnim vlaknima u propusnom kolniku spužvastog grada u području sezonskog smrzavanja [20210203143SF]. Iskreno zahvaljujemo anonimnim recenzentima na njihovim dragocjenim prijedlozima i konstruktivnim komentarima, koji su u velikoj mjeri poboljšali predstavljanje rezultata ovog istraživanja.

LITERATURA

- [1] Liu, X.Y.: Research on Influencing Factors of Frost Resistance of Pervious Concrete [D]. Harbin Institute of Technology, 2012.
- [2] Chen, D.G., Ma, H.H., Yao, Y., Shen, Z.W., Gu, W., Fu, D.S.: Experimental Research on Frost Resistance Performance of Pervious Concrete Based on Orthogonal Analysis [J]. *Construction Technology*, 48 (2019) 15, pp. 60-64+102.
- [3] Lu, T.R., Zhang, P.P., Gao, W.Z., Wang, Z.J., Wang, L.L., Chen, X.P.: VAE Emulsion Production and Application [J]. *Popular Technology*, 21 (2019) 5, pp. 33-37+32.
- [4] Meng, B.X., Xu, J.Y., Gu, C., Peng, G.: Experimental Study on Mechanical Properties of Styrene-Acrylic Emulsion and VAE Emulsion Modified Cement Mortar [J]. *Building Science*, 35 (2019) 1, pp. 88-94, <https://doi.org/10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2019.01.015>.
- [5] Hu, L.G.: Research on Frost Resistance of Pervious Concrete [D]. Dalian Jiaotong University, 2013.
- [6] Yang, F.J.: Study on the Influence Factors of Frost Resistance of Pervious Concrete with PAN Fiber and Silica Fume [D]. Southwest University of Science and Technology, 2021, <https://doi.org/10.27415/d.cnki.gxngc.2021.000887>.
- [7] Xie, Y.L., Zhan, S.L., Wang, R., Zhang, J.J., Liang, F.: Research on the Influence of Basalt Fiber on the Frost Resistance of Airport Pavement Concrete [J]. *Concrete and Cement Products*, 12 (2012), pp. 48-50.
- [8] Sim, J., Park, C.: Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures[J]. *Composites Part B: Engineering*, 36 (2005) 6-7, pp. 504-512.
- [9] Dias, D.P., Thaumaturgo, C.: Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers [J]. *Cement and concrete composites*, 27 (2005) 1, pp. 49-54.
- [10] Rathod, N., Gonbare, M., Pujari, M.: Basalt fiber reinforced concrete, *International Journal of Science and Research (IJSR)* ISSN (Online Index Copernicus Value Impact Factor, 14 (2013) 5, pp. 2319-7064, Available at: www.ijsr.net, 2013.
- [11] Huang, C.: Study on properties of water purification basalt fiber permeable cement concrete, *South China University of Technology*, 2020, <https://doi.org/10.27151/d.cnki.ghnlu.2020.002291>.
- [12] Dilbas, H., Çakır, Ö.: Influence of basalt fiber on physical and mechanical properties of treated recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 2020, 254: 119216.
- [13] Zhang, M.T., Zhu, Y.J., Xia, H., He, H., Shen, J., Wu, Q.: Study on the Influence of Preparation Technology on The Strength and Water Permeability of Water-Permeable Crushed Stone Concrete, *New Building Materials*, 45 (2018) 12, pp. 14-17.
- [14] Wang, W.Z.: Experimental Study on The Road Performance of Basalt Fiber Permeable Concrete, *Changchun Institute of Technology*, 2020.
- [15] Gong, Y., Li, G.X., Wang, X.L.: Study on the Preparation Technology of Permeable Concrete, *Building Materials Development Orientation*, 17 (2019) 12, pp. 101-104.
- [16] Wang, H.L.: Effect of VAE Polymer Emulsion on The Performance of Steel Slag Permeable Concrete, *Building Technology*, 1 (2017) 4, pp. 54-56.
- [17] Bai, Y.H., Shen, K., Yu, S., et al.: Effects of vinyl acetate-ethylene emulsion on setting time and mechanical properties of alkali-activated cementitious materials, *ACI Materials Journal*, 117 (2020) 1, pp. 187-195.
- [18] Akand, L., Yang, M.: Micromechanical modelling of pervious concrete reinforced with treated fibres, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, pp. 1-11, 2020.
- [19] Li, Z.D., Li, G.N., Yu, M.: VAE Emulsion and Its Adhesive, *Adhesive*, 6 (2001), pp. 27-30.
- [20] Bai, Y.H., Shen, K., Yu, S., et al.: Effects of vinyl acetate-ethylene emulsion on setting time and mechanical properties of alkali-activated cementitious materials, *ACI Materials Journal*, 117 (2020) 1, pp. 187-195.
- [21] Ling, Y.S.: Research on Preparation and Performance of Environmentally Friendly Pervious Concrete, *Southeast University*, 2019.
- [22] Qiao, H.X., Zhou, M.R., He, Z.M., Liu, C.L.: Research on Relative Dynamic Elastic Modulus and Micro-Mechanism of Concrete, *Comprehensive Utilization of Fly Ash*, 5 (2009), pp. 6-10.
- [23] Wang, G., Dong, Y.W., Zheng, L., Lu, H.L.: Research on Frost Resistance of Permeable Concrete Based on Shock Wave Technology, *Concrete and Cement Products*, 8 (2020), pp. 83-87.
- [24] Lou, J.J.: Study on The Performance and Freeze-Thaw Cycle Deterioration of Non-Fines Concrete with Different Admixtures, *Shan Dong University*, 2016.
- [25] Determination of Cement Densit (GB/T 208-2014): General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine o of the People's Republic of China, Standardization Administration, 2014.
- [26] Determination of Cement Specific Surface Area (Bureau method) (GB/T8074-2008): General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine o of the People's Republic of China, Standardization Administration, 2008.
- [27] Pebble and Gravel for Constructio (GB/T 14685-2011): State Administration for Market Regulation, Standardization Administration, 2011.
- [28] Technical Specification for Permeable Cement Concrete Pavement (CJJ/T 135-2009): Beijing,China Construction Industry Press, 2009.
- [29] Standard for long-term performance and durability test methods of ordinary concrete(GB/T50082-2009): Beijing, China Construction Industry Press, 2009.