

Primljen / Received: 25.6.2023.

Ispravljen / Corrected: 23.4.2024.

Prihvaćen / Accepted: 5.7.2024.

Dostupno online / Available online: 10.11.2024.

Fizikalna i mehanička svojstva modificiranog trošnog pješčenjaka pri ciklusima smrzavanja i odmrzavanja

Autori:



Mr.sc. **Zhang Zhen**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Qinghai, Xining, Kina
Građevinski fakultet
symzoro@163.com



Izv.prof.dr.sc. **Wang Qingzhi**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Qinghai, Xining, Kina
Građevinski fakultet
Ministarstvo prometa, Xining, Kina
Laboratorij za tehnologiju izgradnje i održavanja
autocesta u regiji permafrosta
wangqingzhi87@qhu.edu.cn
Autor za korespondenciju



Mr.sc. **Zhang Kui**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Qinghai, Xining, Kina
Građevinski fakultet
2020990090@qhu.edu.cn



Prof.dr.sc. **Fang Jianhong**, dipl.ing.građ.
Ministarstvo prometa, Xining, Kina
Laboratorij za tehnologiju izgradnje i održavanja
autocesta u regiji permafrosta
13709719909@163.com

Prethodno priopćenje

Zhang Zhen, Wang Qingzhi, Zhang Kui, Fang Jianhong

Fizikalna i mehanička svojstva modificiranog trošnog pješčenjaka pri ciklusima smrzavanja i odmrzavanja

Pri projektiranju donjeg ustroja prometnica na području permafrosta često se za izvedbu nosivih slojeva koristi blokoviti stijenski materijal. Međutim, uslijed značajnih temperaturnih fluktuacija i čestih ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, neki od ovih slojeva se dodatno troše i lome. Kontinuirano trošenje stijenskog materijala dovodi do zapunjavanja praznina u slojevima trupa ceste, smanjujući količinu makropora i veličinu poroznog medija. Posljedično, funkcija konvektivnog prijenosa topline kroz sloj od blokovitog stijenskog materijala smanjuje se te se ne uspijeva adekvatno zaštititi smrznuto tlo. Cilj ovog istraživanja je procijeniti mogu li reciklirani trošni stijenski materijali, modificirani cementom, odgovarati mehaničkim svojstvima i karakteristikama širenja oštećenja netrošnog stijenskog materijala. Trošni pješčenjak odabran je za modifikaciju u materijal sličan stijeni. Provedena su detaljna istraživanja njegovih fizikalnih i mehaničkih svojstava, zajedno s karakteristikama napredovanja oštećenja nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. U usporedbi s crvenim pješčenjakom, modificirani trošni pješčenjak pokazuje značajno povećanje tlačne čvrstoće, što usklađuje modele oštećenja uzrokovanih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja s karakteristikama crvenog pješčenjaka, čime se potvrđuje mogućnost recikliranja trošnih pješčenjaka.

Ključne riječi:

fizikalna i mehanička svojstva, pješčenjak, ciklusi smrzavanja i odmrzavanja

Research Paper

Zhang Zhen, Wang Qingzhi, Zhang Kui, Fang Jianhong

Physical and mechanical properties of weathered sandstone rock-like materials under freeze-thaw cycles

Block stone structural layers are commonly utilized in roadbed projects within permafrost areas. However, due to significant temperature fluctuations and frequent freeze-thaw cycles, some of these rock layers have weathered and fractured. Continuous weathering of these rocks results in the block stone embankment gaps becoming clogged, reducing macropore and porous media areas. Consequently, the convective heat transfer function of the block stone roadbed diminishes, failing to adequately protect the frozen soil. This study aims to assess whether recycled weathered rock materials, modified with cement, can match the mechanical properties and damage expansion characteristics of unweathered rocks. Weathered sandstone was selected for modification into rock-like materials. Detailed investigations were conducted into their physical and mechanical properties, alongside damage propagation characteristics following freeze-thaw cycles. Compared to red sandstone, weathered sandstone rock materials exhibit significantly enhanced compressive strength, aligning freeze-thaw damage models with red sandstone rock characteristics, thereby affirming the feasibility of reusing weathered sandstone rocks.

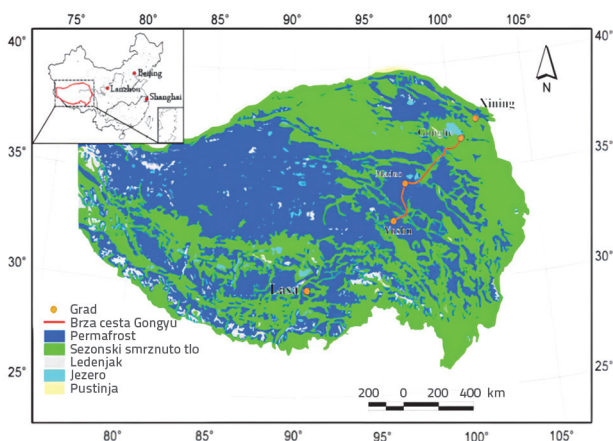
Key words:

physical and mechanical properties, sandstone, freezing and thawing cycles

1. Uvod

Kina ima jednu od najvećih rasprostranjenosti hladnih regija u svijetu, s permafrostom koji pokriva 22,4 % njezine kopnene površine [1]. Područje permafrosta u provinciji Qinghai prostire se na približno 450 000 kvadratnih kilometara, odnosno 62,5 % površine provincije [2]. Nosivi slojevi od blokovitog stijenskog materijala naširoko se koriste u područjima permafrosta pri projektiranju i izvedbi posteljice prometnice. Kao što je prikazano na slici 1 [3], autocesta Gonghe-Yushu, prva takve vrste u Kini, izgrađena je na visoravni u području permafrosta.

Ukupna duljina posteljice prometnice od blokovitog stijenskog materijala iznosi 55,9 km [4]. Od otvorenja u kolovozu 2017., trup autoceste Gonghe-Yushu od blokovitog stijenskog materijala prošao je različite stupnjeve nejednolikog slijeganja dok su se na kolniku razvile poprečne i uzdužne pukotine, kao što je prikazano na slici 2.



Slika 1. Gonghe-Yushu autocesta

Čimbenici koji pridonose narušavanju integriteta donjeg ustroja su raznoliki i složeni. Ključni problem je što se slojevi od blokovitog stijenskog materijala dobro ponašaju u područjima permafrosta s niskom temperaturom, ali loše u područjima permafrosta visoke temperature (gdje se temperature kreću od 0,0 do -2°C) [5]. U ovim područjima, toplinski uvjeti permafrosta visoke temperature ispod posteljice prometnice nepovoljno utječu na njihovu stabilnost. Za razliku od tipičnih



Slika 2. Stanje GongYu autoceste: a) Uzdužna pukotina; b) Nejednoliko slijeganje ceste

cesta i željezničkih pruga, autoceste visoke kvalitete primjenjuju kolnike veće širine, koji se sastoje od crnog asfalta koji upijaju značajnu količinu topline. Ovo rezultira povećanom apsorpcijom topline, što pojačava smetnje i utjecaj na permafrost, čime se povećava vjerojatnost nejednolikog slijeganja i deformacija slojeva donjeg ustroja. Osim toga, trošenje blokova stijenskog materijala dodatno doprinosi daljnjem narušavanju integriteta posteljice.

Blokoviti stijenski materijal se dodatno troši zbog čestih ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, velikih temperaturnih varijacija između dana i noći te intenzivnih ultraljubičastih zraka na visoravni Qinghai-Tibet, kao što je prikazano na slici 3.



Slika 3. Trošni stijenski materijal na padini autoceste Gongyu

Trošenje smanjuje tlačnu čvrstoću stijena, čineći ih podložnim pojavi površinskih pukotina i odlamanju pod opterećenjem vjeta i ljudskog djelovanja, što rezultira njihovim slomom i značajnim začepjenjem pora. Ovi problemi znatno ugrožavaju svojstva konvekcije i prijenosa topline kroz slojeve od blokovitog stijenskog materijala, ne osiguravaju adekvatnu zaštitu sloja permafrosta i dovode do narušavanja integriteta posteljice. Kako trošenje napreduje, nakupljeni ostaci dodatno zapunjuju pore, uzrokujući zadržavanje topline u sloju smrznutog tla, a time i njegovo otapanje i slijeganje, rezultirajući značajnim ekonomskim gubicima za inženjerske projekte. Stoga je

recikliranje ovakvih trošnih stijena kao zamjena za prirodne agregate u projektiranju donjeg ustroja prometnica ne samo učinkovito u pogledu očuvanja prirodnih resursa, već ublažava i ekološke probleme. Nadalje, istraživanje mogućnosti korištenja trošnih stijena za primjenu u donjem ustroju uspostavlja znanstvenu osnovu za projektiranje i izgradnju autoceste.

Iako postoji nekoliko domaćih i inozemnih istraživanja o trošnim

stijenama kao punilu za donji ustroj prometnice, Zheng i sur. [6] istraživali su potencijalnu upotrebu trošne meke stijene kao ispune posteljice. Razmotrili su mineralni sastav, otpornost na trošenje, mehaničku čvrstoću i rezultate ispitivanja zbijenosti, predlažući preliminarni pristup kako bi se procjenila prikladnost meke stijene za ispunu posteljice. Guo i sur. [7] analizirali su granulometrijski sastav, parametre zbijanja i karakteristike drobljenja četiriju reprezentativnih trošnih stijena. Također su proučavali čimbenike koji utječu na dugoročnu stabilnost posteljice od trošnih stijena. Drugi znanstvenici su istraživali različita svojstva trošnih stijena. Zhao i sur. [8] proveli su eksperimentalnu analizu posmične čvrstoće potpuno trošnog granita, ističući da njegove karakteristike deformacije i čvrstoće ponajviše ovise o mikrostrukturnim svojstvima. Song i sur. [9] istraživali su obrasce deformacije i sloma trošnih stijena u tunelima. Yang i sur. [10] koristili su nerazorna ispitivanja nuklearnom magnetskom rezonancijom za otkrivanje oštećenja stijenjskog materijala i temeljito analizirali mehanizme njegovog oštećenja u uvjetima smrzavanja i odmrzavanja. Otkrili su da mramor pokazuje najveću otpornost na trošenje uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, zatim granit te pješčenjak, što je u skladu s prirodnim zakonitostima. Yahaghi i sur. [11] proučavali su fizikalna i mehanička svojstva pješčenjaka i njegovo ponašanje pri slomu pod različitim uvjetima ciklusa smrzavanja i odmrzavanja kroz različita laboratorijska ispitivanja, uključujući ispitivanja brzine valova, pokuse smrzavanja i odmrzavanja, ispitivanja tlačne čvrstoće i Brazilski test ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem. Li i sur. [12] proveli su jednoosna i troosna ispitivanja tlačne čvrstoće na trošnom granitu pri različitim temperaturama i tlačnim opterećenjima. Vjerovali su da temperatura i troosno tlačno djelovanje imaju drukčije mehanizme utjecaja na oblik sloma uzoraka od trošnih granita. Smanjenje temperature uzrokuje skupljanje mineralnih čestica i unutarnjih mikropukotina i praznina, čime se povećava čvrstoća veza između čestica. Neki su znanstvenici također istraživali korištenje trošnih stijena za gornje nosive slojeve kolnika. Felix i sur. [13] proučavali su stabilnost trošnog dolomita modificiranog cementom i mogućnost njegovog korištenja u nosivim slojevima kolnika kroz ispitivanja zbijenosti i druge metode ispitivanja. Xuan i sur. [14] proučavali su mehanička svojstva cementom stabiliziranih makadamskih materijala te saželi utjecaj parametara mješavine materijala na ta mehanička svojstva. Chen i sur. [15] proučavali su mehanička svojstva glinovitog škriljevca modificiranog cementom. Utvrdili su da su statička i dinamička svojstva značajno poboljšana i da je učinak poboljšanja bio pozitivan. Yan i sur. [16] procijenili su učinkovitost modifikacije trošnog glinovitog škriljevca cementom i vapnom, uzimajući u obzir čimbenike kao što su uvjeti njegovanja, starost i razine zbijenosti. Njihova su istraživanja pokazala da škriljevac modificiran vapnom pokazuje značajno smanjenje čvrstoće kada se uroni u vodu, dok je škriljevac modificiran cementom pokazao izvanrednu stabilnost na koju nije utjecalo trajanje izlaganja vodi. Nekoliko je istraživača koristilo materijale kao što su troska iz visokih peći, čelična troska i vlakna za poboljšanje

svojstava, postičući rezultate koji pokazuju izuzetnu stabilnost i trajnost [17-21]. Zhao i sur. [22] odabrali su vrlo trošni filit iz područja Nanchanga i modificirali ga cementom. Proučili su i analizirali utjecaj različitih granulometrijskih sastava na performanse cementom modificiranog filitnog punila posteljice, potvrđujući prikladnost primjene pomoću računalnog programa metodom konačnih elemenata. Njihovo istraživanje otkrilo je da korištenje vrlo trošnog filita modificiranog cementom kao punila za slojeve donjeg ustroja optimizira njihova mehanička svojstva i propusnost, značajno smanjujući slijeganja cestovne konstrukcije, čime se produljuje njezin vijek trajanja. Slično tome, Guo i sur. [23] pokazali su da filit modificiran cementom pokazuje superiorna svojstva zbijanja, modul elastičnosti i vodonepropusnost, uz minimalno trošenje i s poboljšanom otpornosti na to. Ta poboljšanja vodonepropusnosti i otpornosti na trošenje ispunjavaju zahtjeve za visokokvalitetnim donjim ustrojem autoceste [24, 25].

Ukratko, suvremena istraživanja usmjerena su na analizu mehaničkih svojstava trošnih stijena i na prikladnost korištenja modificiranih geomaterijala u izgradnji donjeg ustroja prometnice. Istraživanja pokazuju da je upotreba cementa za poboljšanje svojstava trošnih stijena održivo rješenje punila donjeg ustroja. Međutim, i dalje postoje značajni izazovi u procjeni trajnosti tih materijala pri ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, kao i u unaprjeđenju metoda za recikliranje i modificiranje trošnih stijena u hladnim područjima. Predmet istraživanja je trošni pješčenjak, prađen u simuliranu stijenu uz modifikaciju cementom i podvrgnut eksperimentalnim istraživanjima fizikalnih i mehaničkih svojstava te karakteristika širenja oštećenja tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Cilj je utvrditi pokazuju li modificirani, reciklirani trošni stijenjski materijali mehanička svojstva i karakteristike širenja oštećenja usporedive s onima netrošnih stijena, čime se potvrđuje mogućnost korištenja recikliranih materijala od trošnih pješčenjaka. Ovo istraživanje nastoji ponuditi eksperimentalni okvir za buduću primjenu recikliranih trošnih stijena kao punila za donji ustroj prometnice.

2. Eksperimentalne postavke

2.1. Pregled istraživanja

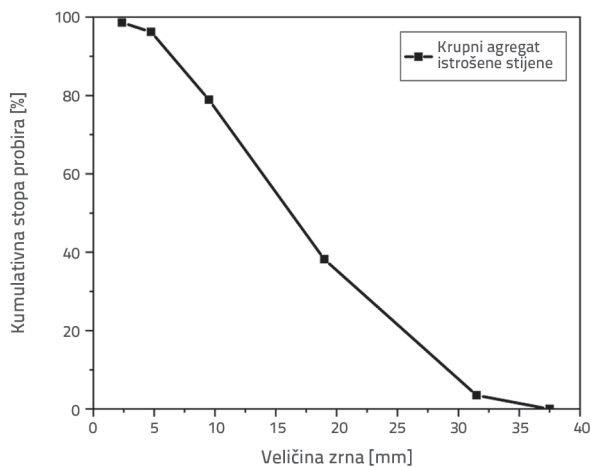
Kako bi se istražila mogućnost korištenja recikliranih trošnih stijena u izgradnji cesta, u ovom je istraživanju kao materijal odabran trošni pješčenjak izvađen iz autoceste GongYu. Najprije je trošni pješčenjak modificiran cementom kako bi se izradili stjenoviti uzorci. Nakon toga je proveden niz fizikalnih i mehaničkih ispitivanja. Promatranjem i analizom učinka različitog broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na modificiranim uzorcima, istraživanju je bio cilj uspostaviti vezu između njihovih makroskopskih i mikroskopskih svojstava. Cilj je procijeniti odgovaraju li mehanička svojstva i karakteristike širenja oštećenja modificiranog recikliranog trošnog materijala onima netrošne stijene, čime se potvrđuje njegova primjenjivost.

Tablica 1. Osnovni fizikalni parametri modeliranog uzorka stijene

Fizikalni parametar	Suha gustoća	Zasićena gustoća	Brzina uzdužnog vala	Udio vode	Poroznost
Mj. jedinica	g/cm ³	g/cm ³	km/s	ω [%]	P [%]
Vrijednost	2,31	2,47	4,21	4,70	10,70

2.2. Priprema uzoraka

Ovo istraživanje koristilo je uzorke trošnog pješčenjaka prikupljene s gradilišta autoceste GongYu koji su usitnjeni pomoću drobilice. Za krupni agregat odabran je trošni pješčenjak veličine čestica u rasponu od 5,0 do 31,5 mm; granulometrijska krivulja prikazana je na slici 4. Kao vezivni materijali korišteni su klasični portland cement P.O.42.5 iz Qinghaija i voda iz slavine. Sitni agregat sastojao se od riječnog pijeska veličine čestica od 0,15 do 4,75 mm, a dodano je i visokoučinkovito sredstvo za redukciju vode na bazi naftalena sa stopom redukcije vode od 20 %. Omjeri cementa, trošnog pješčenjaka, pijeska i vode u smjesi bili su 1:2, 72:1, 11:0,38 sa količinom dodatka u iznosu od 1,5 % mase cementa. Trošni pješčenjak se zatim oblikovao i očvrstnuo kako bi se modelirali uzorci stijena. Slijedeći specifikacije, stvrdnuti uzorci su izrezani i polirani u modelirane uzorke stijena koji odgovaraju međunarodnim standardima: promjera 50 mm i visine 100 mm [26, 27].



Slika 4. Granulometrijska krivulja krupnog agregata

Prije ispitivanja uklonjeni su uzorci koji su pokazivali očite površinske nedostatke. Korištenjem NM-4B ultrazvučnog uređaja za ispitivanje nemetala, izmjerena je brzina P-valova preostalih uzoraka kako bi se osigurala dosljednost između 24 uzorka odabranih za ispitivanje. Zatim su uzorci podijeljeni u šest skupina po četiri uzorka. Nakon toga su stavljeni u aparat za vakuumsko zasićenje pri tlaku od 0,1 MPa i zabilježene su njihove pojedinačne težine. Uzorci su podvrgnuti mjerenju brzine P-valova pri različitom broju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, a zatim je određena i jednoosna tlačna čvrstoća. Tablica 1 detaljno opisuje temeljne fizikalne karakteristike ispitnih uzoraka od modificiranog trošnog pješčenjaka.

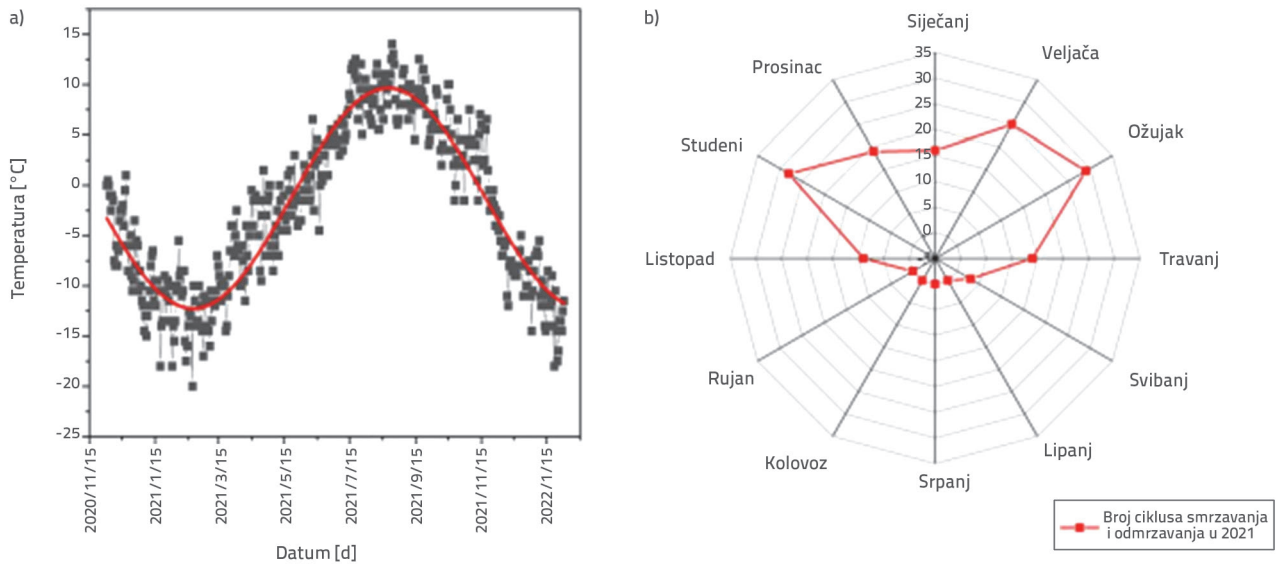
2.3. Eksperimentalna oprema

Ispitivanje ciklusa smrzavanja i odmrzavanja provedeno je primjenom TMS-9018 sustava, koji simulira kontinuirane promjene klime tijekom godine kako bi se zadovoljila preciznost i postojanost zahtjeva ispitivanja za temperaturno polje i osigurali potrebni temperaturni uvjeti. FRTX-1000 niskotemperaturni, visokotlačni sustav za trošno ispitivanje stijena, koji se kontrolira servo-mehanizmom, ima maksimalnu uzdužnu silu od 1000 kN i raspon tlačnog pritiska od 0 do 2 MPa. Sustav kontrole temperature može održavati temperaturu između -30 °C i 80 °C. Brzina opterećenja iznosila je 0,05 mm/min.

2.4. Eksperimentalni postupak

Ovo istraživanje analiziralo je klimatske i temperaturne promjene u okrugu Maduo, provincija Qinghai, tijekom 2021. godine, otkrivajući temperaturne razlike u rasponu od -25 °C do 15 °C. Kako bi se olakšala kontrola temperature i simulirali ciklusi smrzavanja i odmrzavanja, prikupljeni podaci o temperaturi su se aproksimirali sinusoidnom krivuljom. Ta je krivulja upotrijebljena za repliciranje temperaturnih varijacija u komori ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, kao što je prikazano na slici 5.a. Kako bi se imitirali dnevni ciklusi smrzavanja i odmrzavanja svojstveni za regiju, sinusoidna krivulja simulirala je 12 sati smrzavanja nakon čega je slijedilo 12 sati odmrzavanja. Daljnja analiza, prikazana na slici 5.b, pokazala je da su od veljače do travnja i od listopada do prosinca 2021. ciklusi smrzavanja i odmrzavanja bili češći, u prosjeku gotovo 30 ciklusa mjesečno. Posljedično, 0, 5, 10, 15, 20 i 30 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja odabrani su kao varijable za eksperiment, a uzorci su podvrgnuti ispitivanju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

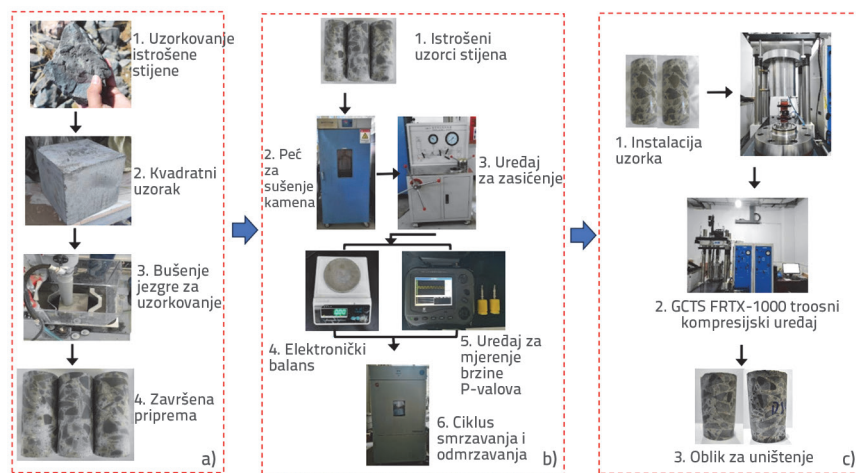
Modelirani uzorci modificiranog trošnog pješčenjaka, koji zadovoljavaju specifikacije stavljaju se u pećnicu i suše na 105 °C tijekom 24 sata dok se ne postigne konstantna težina [28, 29]. Nakon što se ohlade na sobnu temperaturu, uzorci se vade i mjeri se njihova masa. Ovi standardni uzorci su zatim podvrgnuti vakuuskom prisilnom zasićenju u uređaju koji održava tlak od 0,1 MPa, uz kontinuirano ispušavanje zraka tijekom 6 sati. Zatim se uzorci zasićuju u posudi tijekom 24 sata dok se na površini više ne pojavljuju mjehurići. Nakon zasićenja, masa svakog uzorka se mjeri kako bi se zabilježila njegova zasićena težina. Istovremeno se određuju visina, radijus i brzina P-valova uzoraka. Ova se mjerenja koriste za izračun osnovnih fizikalnih parametara kao što su udio vode, poroznost i gustoća. Na temelju tih parametara kvalificirani uzorci se odabiru za daljnja ispitivanja smrzavanja i odmrzavanja.



Slika 5. Ilustracija koja prikazuje temperaturni trend te cikluse smrzavanja i odmrzavanja u 2021.: a) Temperaturni trendovi u 2021.; b) Ciklusi smrzavanja i odmrzavanja u 2021.

Tablica 2. Plan za ispitivanje ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

Parametar	Sušenje	Vrijeme zasićenja	Ciklusi smrzavanja i odmrzavanja	Vrijeme ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja
Modificirani trošni pješčenjak	24 h	Prisilno zasićenje 6 h Stajanje u vodi 12 h	0,5, 10, 15, 20 i 30 ciklusa	Zamrzavanje 12 h Odmrzavanje 12 h



Slika 6. Shematski prikaz eksperimentalnog procesa

Program ispitivanja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja detaljno je prikazan u tablici 2. Nakon što se dovrši određeni broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u skladu s eksperimentalnim zahtjevima, provodi se jednoosno tlačno ispitivanje, kao što je prikazano na slici 6.

povećala tijekom prvih pet ciklusa. To povećanje prije svega se pripisuje visokoj poroznosti uzoraka od modificiranog trošnog pješčenjaka. Tijekom smrzavanja, voda unutar uzoraka zamrznuća se i proširila, uzrokujući dilatacijske sile koje su proširile postojeće pukotine i stvorile nove. Tijekom odmrzavanja

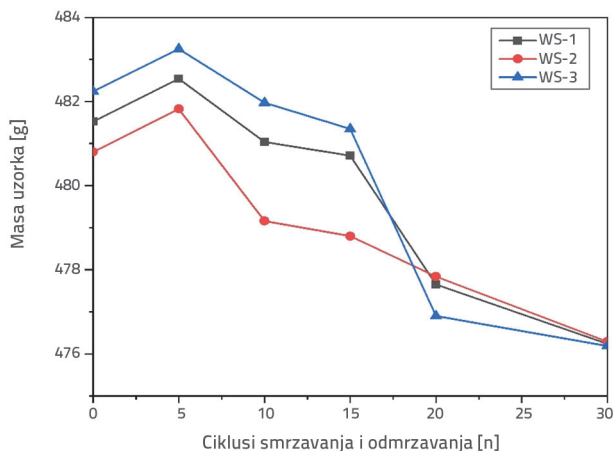
3. Rezultati pokusa i analiza

3.1. Promjene u masi uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka

Za jasniju analizu promjena mase i brzine valova u uzorcima, odabrana su tri uzorka (WS-1, WS-2 i WS-3) na kojima su promatrane promjene tijekom 30 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. "WS" je kratica za trošni pješčenjak (eng. *weathered sandstone*).

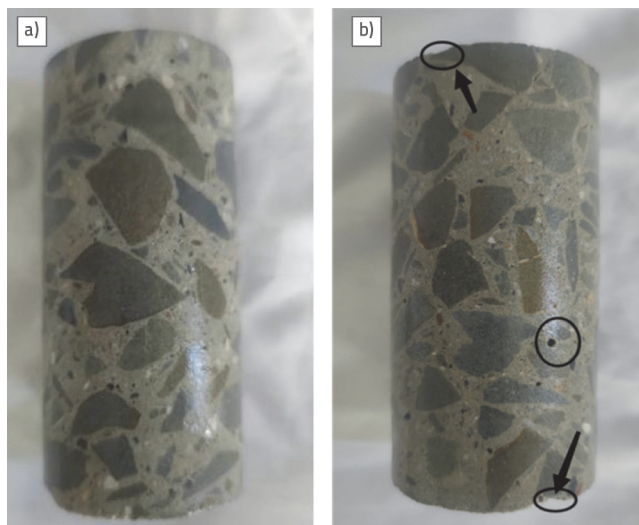
Krivulja promjene mase uzoraka prikazana je na slici 7. Iz slike 7 vidljivo je da se masa triju uzoraka podvrgnutih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja

voda je prodrla u uzorke pješčenjaka, ispunjavajući novonastale pukotine i rezultirajući povećanjem mase uzoraka. Nakon petog ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, slobodne čestice počele su se odvajati od površine uzoraka, što je dovelo do smanjenja mase.



Slika 7. Krivulja promjene mase uzorka

Do petnaestog ciklusa masa uzorka dodatno se smanjila zbog gubitka agregata ili cementnog materijala, pukotina i drugih oblika oštećenja, kao što je prikazano na slici 8. Kako se broj ciklusa povećavao, ljuštenje i mrvljenje površine uzoraka se pojačalo, što je rezultiralo značajnim smanjenjem mase.

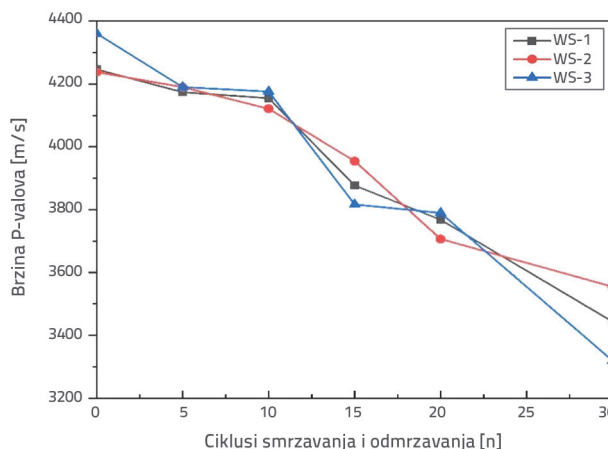


Slika 8. Uočena morfologija modificiranog materijala pri različitom broju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja: a) 0 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja; b) 30 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

3.2. Promjene u brzini P-valova

Na temelju eksperimentalnih podataka, slika 9. prikazuje krivulje varijacije brzine valova u uzorcima za različite brojeve ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Brzina P-valova smanjuje se s povećanjem broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, kao što je prikazano na slici 9. za tri reprezentativna uzorka podvrgnuta tim

ispitivanjima. Analiza uzorka WS-1 pokazuje da se tijekom prvih pet ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, brzina prolaska valova smanjila za relativno skromnih 1,71 %. Naknadni ciklusi (15, 20 i 30) smrzavanja i odmrzavanja smanjili su brzinu valova za 8,69 %, 11,46 % odnosno 18,92 %. Kod preostala dva uzorka, stopa promjene brzine valova linearno opada s porastom broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. To je uglavnom zbog širenja postojećih pukotina unutar uzoraka tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, uzrokovanih faznim prijelazom vode u led i neravnomjernim skupljanjem agregata ili cementa, što omogućava značajno prodiranje vode u uzorke. Brzina prolaska vala u vodi je manja od one u uzorku, a brzina vala se smanjuje zbog refrakcije, refleksije i gubitka energije prilikom prolaska kroz napuknuti uzorak.

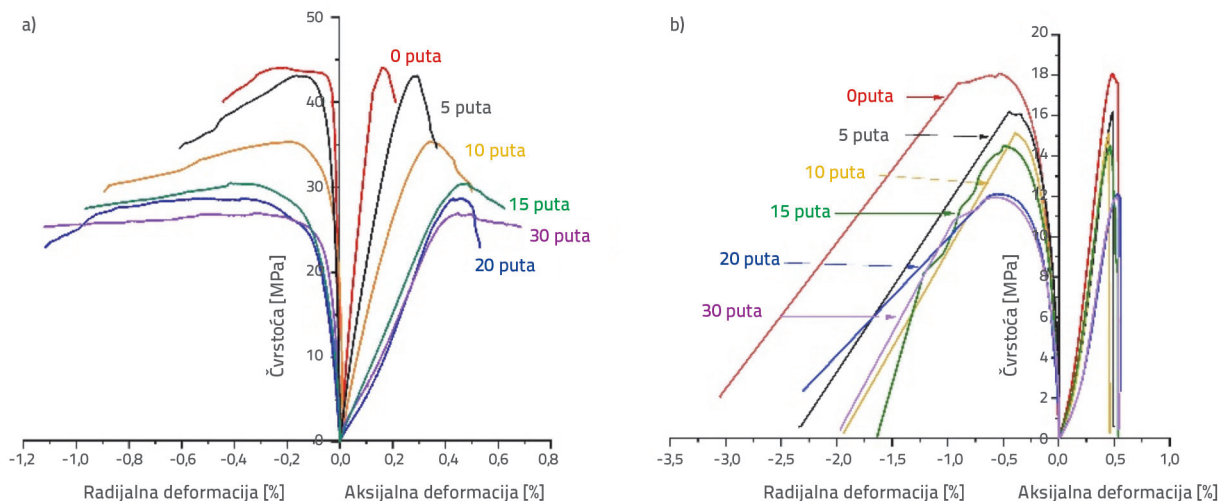


Slika 9. Krivulja varijacije brzine P-valova

3.3. Naponsko-deformacijske krivulje

Slika 10. prikazuje naponsko-deformacijske krivulje zajedno s tlačno stanje modeliranih uzoraka trošnih pješčenjaka koji su podvrgnuti različitom broju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Jednoosna tlačna čvrstoća uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka smanjuje se za 39,01 %, sa 44,048 MPa pri 0 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na 26,863 MPa pri 30 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, kao što je prikazano na slici 10.a. Stoga je očigledno da broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja značajno utječe na jednoosnu tlačnu čvrstoću modificiranog trošnog pješčenjaka.

Iz analize (a) i (b) [30] na slici 10. vidljivo je da je pri 0 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, čvrstoća uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka 143,51 % veća od one crvenog pješčenjaka. Do trenutka kada je broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja dosegao 30, čvrstoća uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka premašila je čvrstoću uzoraka crvenog pješčenjaka za 125,085 %. Pri istom broju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, jednoosna tlačna čvrstoća uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka veća je od vrijednosti za crveni pješčenjak. To se događa zbog povećane adhezije između istrošenog krupnog agregata pješčenjaka i cementnog morta, smanjenog udjela pora unutar uzorka, povećane zbijenosti i posljedično povećane



Slika 10. Naponsko-deformacijske krivulje za jednoosni tlak: a) Modificirani trošni pješčenjak; b) Crveni pješčenjak

tlačne čvrstoće uzorka modificiranog trošnog pješčenjaka. Stoga modificiranje trošnog pješčenjaka, kako bi nalikovao stijenskom materijalu, značajno povećava njegovu tlačnu čvrstoću.

Iz slike 10. vidljivo je da naponsko-deformacijske krivulje modificiranog trošnog pješčenjaka i crvenog pješčenjaka, pri različitom broju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, pokazuju različite faze od opterećenja do sloma: zbijanje, elastična deformacija, plastično popuštanje, deformacijsko omekšavanje te na kraju slom. Kako se broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja povećava, faza zbijanja naponsko-deformacijske krivulje postaje izraženija, modul elastičnosti se smanjuje, a vršna čvrstoća i odgovarajuća deformacija se smanjuju. Istodobno, plastičnost se nastavlja povećavati. Nakon vršnog područja naponsko-deformacijske krivulje stopa smanjenja naprezanja u uzorcima modificiranog trošnog pješčenjaka manja je u usporedbi s onom crvenog pješčenjaka, što upućuje na prijelaz iz krtog u duktilni način sloma u uzorcima. Nadalje, slika 11. ilustrira promatrane načine sloma uzoraka.



Slika 11. Način sloma modificiranog materijala pri različitom broju ciklusima smrzavanja i odmrzavanja: a) 0 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja; b) 30 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

3.4. Zakon varijacije vršne čvrstoće i modula elastičnosti

Aproksimacija točaka krivuljama na slici 12 rezultirala je sljedećim izrazima za odnos između broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja i jednoosne tlačne čvrstoće, te modula elastičnosti:

$$\sigma_w = 25,09 \cdot \exp(-n/19,64) + 20,44 \quad (1)$$

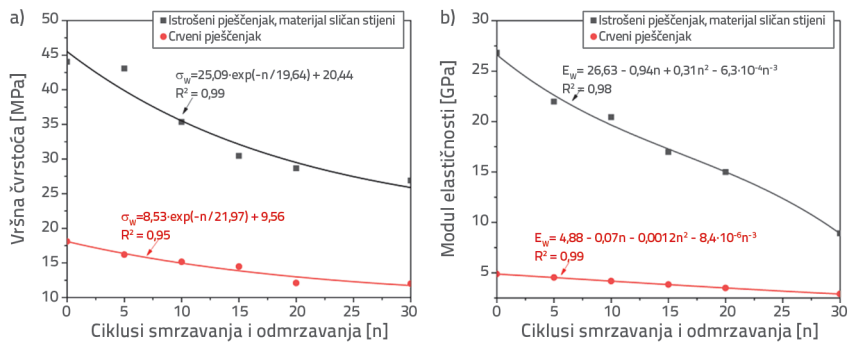
$$\sigma_R = 8,53 \cdot \exp(-n/21,97) + 9,56 \quad (2)$$

$$E_w = 26,63 - 0,94n + 0,031n^2 - 6,3 \cdot 10^{-4}n^3 \quad (3)$$

$$E_R = 4,88 - 0,07n + 0,0012n^2 - 8,4 \cdot 10^{-6}n^3 \quad (4)$$

gdje σ_w predstavlja tlačnu čvrstoću (MPa) uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka, σ_R predstavlja tlačnu čvrstoću (MPa) uzoraka crvenog pješčenjaka, E_w predstavlja modul elastičnosti (GPa) uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka, E_R predstavlja modul elastičnosti (GPa) uzoraka crvenog pješčenjaka, a n predstavlja broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

Kako se broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja povećava, tlačna čvrstoća uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka progresivno se smanjuje, kao što je prikazano na slici 12.a: 44,048 MPa za 0 ciklusa, 43,063 MPa za 5 ciklusa (smanjenje od 2,3 %), 35,342 MPa za 10 ciklusa (smanjenje od 19,8 %), 30,454 MPa za 15 ciklusa (smanjenje od 30,9 %) i 26,9 MPa za 30 ciklusa (smanjenje od 38,9 %). To smanjenje čvrstoće posljedica je formiranja pukotina i pora u materijalu za hidrataciju cementa, C-S-H gelu, kako se povećava broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Navedene pore i pukotine oslabljuju vezu između grubog agregata i cementnog morta, što rezultira progresivnim smanjenjem tlačne čvrstoće uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka. Iako je tlačna čvrstoća uzoraka trošnog pješčenjaka u početku veća od one crvenog pješčenjaka, stopa smanjenja čvrstoće je veća.



Slika 12. Aproximacijske krivulje broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja s tlačnom čvrstoćom i modulom elastičnosti: a) Tlačna čvrstoća; b) Modul elastičnosti

Nadalje, formule dobivene krivuljama aproksimacije otkrivaju negativan odnos između jednoosne tlačne čvrstoće i broja ciklusa za obje vrste uzoraka. Čvrstoća se jednoliko smanjuje s povećanjem broja ciklusa. Tijekom ciklusa ispitivanja smrzavanja i odmrzavanja, oštećenje uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka odražava ono na uzorcima crvenog pješčenjaka, budući da obje kategorije trpe usporediva oštećenja. Ovo se događa zbog učinka smrzavanja i odmrzavanja, koji omogućava da voda uđe u uzorke kroz njihove pore. Kako se voda smrzava, ona se širi, vršeći pritisak koji povećava unutarnje naprsline i razvija ih u pukotine koje se dalje šire. Sa svakim sljedećim ciklusom smrzavanja i odmrzavanja, veza između agregata i cementnog materijala slabi, što dovodi do kumulativnog oštećenja i smanjenja otpornosti uzoraka na vanjske sile. Jednom kada oštećenje uslijed ponavljajućih ciklusa smrzavanja i odmrzavanja dosegne kritični prag, modelirani uzorci imaju unutarnji slom, što rezultira smanjenom čvrstoćom.

Slika 12.b prikazuje kako se modul elastičnosti uzoraka od modificiranih trošnih pješčenjaka kontinuirano smanjuje i pokazuje nelinearni trend s povećanjem broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. U početku modul elastičnosti iznosi 26,814 GPa pri 0 ciklusa. Smanjuje se za 18,02 % pri 5 ciklusa, 23,79 % pri 10 ciklusa, 36,71 % pri 15 ciklusa, 44,12 % pri 20 ciklusa i 66,74 % pri 30 ciklusa. S druge strane, modul elastičnosti uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka pokazuje blagi porast s brojem ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, što pokazuje da su ti uzorci tvrdi i kruti u usporedbi s uzorcima crvenog pješčenjaka. Navedeni rezultati ispitivanja pokazuju da je utjecaj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja i vanjskih naprezanja na uzorke modificiranog trošnog pješčenjaka usporediv s onima na crvenom pješčenjaku. Tlačna čvrstoća, krutost i tvrdoća uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka značajno su veće od onih crvenog pješčenjaka. Na kontaktu između cementnog materijala i zrna agregata javljaju se različiti mehanizmi vezivanja, kao što su fizička adsorpcija, elektrostatska interakcija i kemijske reakcije. Ti mehanizmi omogućavaju stvaranje kohezivne strukture, čime se povećava čvrstoća uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka. Nadalje, reakcija hidratacije cementa ima ključnu ulogu. Cement reagira s vodom i proizvodi hidratizirane

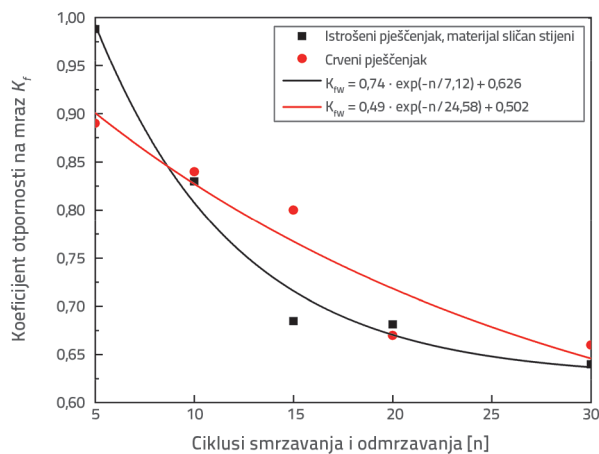
spojeve poput kalcijevog silikata i hidratiziranog aluminija, koji ispunjavaju praznine između zrna agregata u uzorku. Navedeno smanjuje količinu pora unutar agregata i povećava efektivnu kontaktnu površinu između čestica agregata. Posljedično, čvrstoća veza između cementa i agregata raste, što doprinosi povećanju čvrstoće uzorka. Ovakve interakcije zajednički povećavaju čvrstoću uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka izloženog vanjskim uvjetima. Koeficijent otpornosti na smrzavanje kvantitativno opisuje otpornost

pješčenjaka pri različitim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Definira se kao omjer tlačne čvrstoće uzorka nakon svakog ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u odnosu na uzorak zasićen vodom bez smrzavanja i odmrzavanja. Formula je sljedeća:

$$K_f = R_f / R_s \tag{5}$$

gdje R_f predstavlja vrijednost tlačne čvrstoće (MPa) uzoraka pješčenjaka nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, R_s predstavlja vrijednost tlačne čvrstoće (MPa) uzoraka pješčenjaka prije ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, a K_f predstavlja koeficijent otpornosti na smrzavanje, koji je između 0 i 1.

Koristeći gornju jednadžbu, možemo utvrditi aproksimacijsku krivulju koeficijenta otpornosti na smrzavanje za uzorke trošnog pješčenjaka podvrgnute različitom broju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Ova krivulja je prikazana na slici 13.



Slika 13. Aproximacijska krivulja koeficijenta otpornosti na smrzavanje i broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

Rezultati prilagodbe koeficijenta otpornosti na smrzavanje i broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja dobiveni su aproksimacijom krivulje prema točkama na krivulji na slici 13.

$$K_{fw} = -0,74 \cdot \exp(-n/7,12) + 0,626 \tag{6}$$

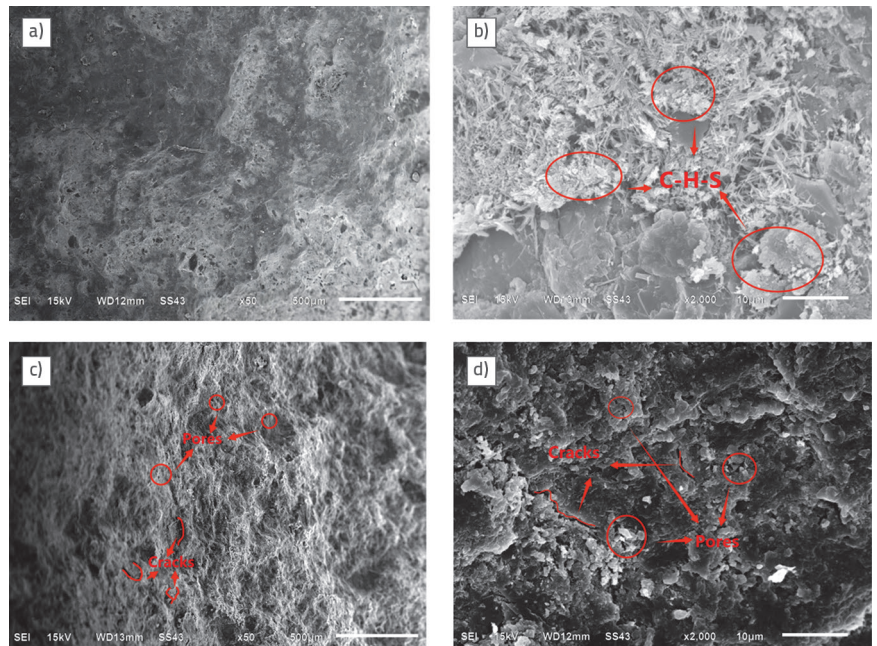
$$K_{FR} = -0,49 \cdot \exp(-n/24,58) + 0,502 \quad (7)$$

K_{FW} i K_{FR} predstavljaju koeficijente otpornosti na smrzavanje uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka, odnosno crvenog pješčenjaka. Iz analize aproksimiranih krivulja i jednadžbi jasno je da koeficijenti otpornosti na smrzavanje uzoraka pješčenjaka variraju s brojem ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, što pokazuje da ti uzorci imaju različite stupnjeve oštećenja od smrzavanja i odmrzavanja tijekom različitih ciklusa. Kao što je prikazano na slici 12., uzorci modificiranog trošnog pješčenjaka i crvenog pješčenjaka pokazali su progresivno smanjenje koeficijenata otpornosti na smrzavanje kako se povećavao broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, s oštrim padom u prvih 20 ciklusa nakon čega je slijedila postupna stabilizacija. Ovo pokazuje da djelovanje smrzavanja i odmrzavanja značajno utječe na uzorke modificiranog trošnog pješčenjaka.

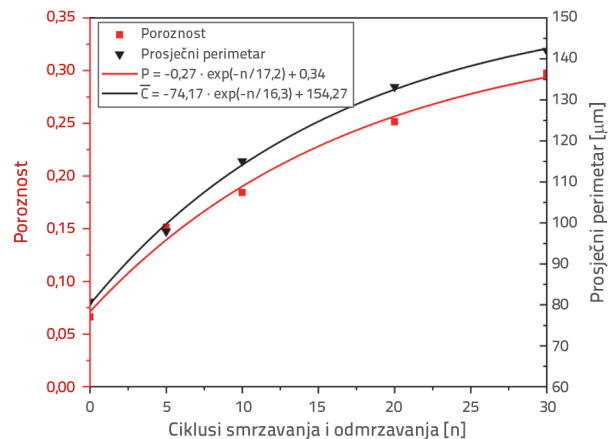
4. Proučavanje mikroskopskih oštećenja trošnog pješčenjaka u uvjetima smrzavanja i odmrzavanja

Kako bi se istražio utjecaj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na mikrostrukturu uzoraka trošnih stijena, u ovom su istraživanju provedeni pokusi skeniranja elektronskim mikroskopom na uzorcima podvrgnutim različitom broju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Iz rezultata je vidljivo da se tlačna čvrstoća uzorka značajno mijenja nakon 0 i 30 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Slika 13. ilustrira mikrostrukturu uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka nakon različitog broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Unutarnja struktura modificiranog trošnog pješčenjaka prije ciklusa smrzavanja i odmrzavanja je gusta i jednolika, s nekoliko pukotina, kao što je prikazano na slikama 14.a i 14.b. C-S-H gel izgleda flokulento i ima oblik pahuljica, sadržavajući štapičaste strukture. Unutar uzoraka te se štapičaste i flokulente strukture isprepleću i čine rešetkast ili sačasti uzorak, s nekim porama ispunjenim gelom. Struktura je čvrsta, kompaktna i bez vidljivih lomova.

Za razliku od toga, kao što je prikazano na slikama 14.c i 14.d, formacije modificiranog trošnog pješčenjaka pokazuju brojne pukotine i šupljine. Struktura pora je veća i poroznija, sa relativno neorganiziranim rasporedom i obogaćena flokulentnim C-S-H gelom. Međutim, prisutnost brojnih pora u gelu i razvoj mikropukotina nepovoljno utječu na čvrstoću modificiranog trošnog pješčenjaka.



Slika 14. Slike modificiranog trošnog pješčenjaka snimljene pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa: a) 0 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja: povećanje 2000x; b) 0 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja: povećanje 50x; c) 30 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja: povećanje 50x; d) 30 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja: povećanje 2000x



Slika 15. Volumen pora, prosječna veličina pora i aproksimacijska krivulja broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

Kvantitativna analiza poroznosti i prosječnog promjera provedena je pomoću računalnog programa PCAS koristeći slike uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka dobivene elektronskim mikroskopom. Slika 15. prikazuje odnos između poroznosti, prosječnog promjera i broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Prilagođavanjem točkama na slici 15., rezultati aproksimacije za poroznost (P), prosječni promjer (\bar{C}), i broju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja (n) mogu se dobiti kako slijedi:

$$P = -0,27 \cdot \exp(-n/17,2) + 0,34 \quad (8)$$

$$C = -74,17 \cdot \exp(-n/16,3) + 154,27 \quad (9)$$

Kako se broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja povećava, poroznost uzoraka modificiranog trošnog pješčenjaka također raste, što dovodi do postupnog povećanja poroznosti njihove unutarnje strukture te stvaranja većih i zaobljenijih pukotina. Štoviše, povećava se i broj otvora. Osim toga, prosječni promjer pora postupno se povećava s brojem ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, što pokazuje da se male pore razvijaju i šire tijekom tih ciklusa. Molekule vode smrzavaju se i šire tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, uzrokujući razvoj pora i pukotina u više smjerova. Ovaj proces širenja povećava pore, što dovodi do njihovog postupnog stapanja i spajanja. Na makroskopskoj razini, oštećenje uzorka se progresivno povećava, a čestice se postupno odvajaju što rezultira smanjenom čvrstoćom.

Oba otkrića pokazuju da voda unutar pora modificiranog trošnog pješčenjaka stvara značajne sile povećanog izdizanja uzrokovane smrzavanjem. Ovaj proces rezultira raspadanjem strukture koja okružuje pore i postupnim povećanjem poroznosti. Nadalje, rezultati analize mikrostrukture modificiranog trošnog pješčenjaka prije i nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja su u skladu s uočenim promjenama tlačne čvrstoće.

5. Karakteristike širenja oštećenja modificiranih uzoraka opterećenih smrzavanjem i odmrzavanjem

Konstitutivni model oštećenja razvijen je za modificirani trošni pješčenjak opterećen smrzavanjem i odmrzavanjem koristeći procese mehanike oštećenja i eksperimentalne podatke o čvrstoći i mehaničkim svojstvima materijala nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

5.1. Konstitutivni odnos modificiranog uzorka pod utjecajem ciklusa smrzavanja i odmrzavanja i opterećenja

Zasad postoje tri prikaza varijable oštećenja D uslijed različitih oblika i broja oštećenja modificiranog materijala. Međutim, kako se broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja povećava, fazni prijelaz vode i leda unutar uzorka i neravnomjerno širenje i skupljanje minerala dovode do kontinuiranog stvaranja i povećanja novih pukotina. Makroskopske fizikalne veličine reagiraju u skladu s time. Stoga se promjena modula elastičnosti može koristiti za određivanje stupnja oštećenja stijene, a njegova varijabla oštećenja uzrokovana smrzavanjem i odmrzavanjem definirana je na sljedeći način:

$$D_n = 1 - (E_n/E_0) \quad (10)$$

gdje je E_0 početni modul elastičnosti stijene prije smrzavanja i odmrzavanja. E_n je modul elastičnosti stijene nakon n ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

Budući da većina stijena ima početna oštećenja, stanje oštećenja smrznute i odmrznute stijene definira se kao osnovno

stanje oštećenja, prema Lemaitrevom principu ekvivalentnosti deformacije [30-33]. Općeniti princip ekvivalentnosti deformacije predlaže se na sljedeći način:

$$\sigma = E\varepsilon(1-D) \quad (11)$$

gdje je E modul elastičnosti neoštećenog materijala, a D varijabla oštećenja uzrokovanog opterećenjem.

Prvo stanje oštećenja javlja se nakon oštećenja uzrokovanog smrzavanjem i odmrzavanjem, dok drugo stanje oštećenja odražava kumulativno oštećenje uzrokovano opterećenjem smrzavanja i odmrzavanja. Stoga, kako bismo utvrdili vezu između oštećenja uzrokovanog smrzavanjem i odmrzavanjem i unutarnjih oštećenja:

$$\sigma = E_n \varepsilon (1-D) \quad (12)$$

gdje je E_n modul elastičnosti stijene nakon smrzavanja i odmrzavanja.

Izrazi (10) i (12) mogu se koristiti za proračun odnosa promjene naprezanja uzrokovane opterećenjem smrzavanjem i odmrzavanjem modificiranog uzorka, koje je predstavljeno varijablom oštećenja uzorka uslijed opterećenja smrzavanjem i odmrzavanjem.

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1-D_m) \quad (13)$$

$$\text{Jedna od } D_m = D + D_n - DD_n \quad (14)$$

gdje je D_m varijabla ukupnog oštećenja modificiranog uzorka podvrgnutog opterećenju smrzavanja i odmrzavanja.

Izraz (14) pokazuje da kombinirani učinci smrzavanja, odmrzavanja i opterećenja povećavaju oštećenje granita. U međudjelovanju učinaka prikazano je, kroz detaljnu analizu oštećenja smrzavanjem i odmrzavanjem, da dvostruko međudjelovanje povećava ukupno oštećenje i utječe na unutarnju mikrostrukturu. Prilikom opterećenja, zatvorene mikročestice unutar modificiranog uzorka čvrsto prijanjaju jedna uz drugu, pokazujući značajnu nelinearnost u svojim karakteristikama i smanjuju ukupno oštećenje.

5.2. Zakon razvoja oštećenja modificiranog uzorka opterećenog smrzavanjem i odmrzavanjem

Uzorak pod opterećenjem se može promatrati kao polje oštećenja. Unutarnji nedostaci uzorka nastavljaju se razvijati i širiti, što dovodi do progresivnog smanjenja čvrstoće. Razvoj takvih oštećenja se nastavlja sve dok ne dođe do sloma tijekom procesa opterećivanja. Kako se opterećenje akumulira, svaki mikroelement unutarnjih strukturalnih nedostataka rastavlja se na brojne elemente, uvodeći nasumičnost i složenost u mehanizam sloma mikroelemenata unutar uzorka.

Iz perspektive oštećenja, uzorak pod opterećenjem može se promatrati kao polje oštećenja. Unutarnja oštećenja modificiranog uzorka nastavljaju se širiti, što rezultira progresivnim smanjenjem čvrstoće. Ovaj proces se nastavlja sve dok ne dođe do sloma uslijed naprezanja. Kako opterećenje postupno raste, svaki mikroelement unutarnjih strukturnih nedostataka rastavlja se na brojne elemente. Slom tih mikroelemenata unutar uzorka je slučajan i složen. Pod pretpostavkom da čvrstoća mikroelementa slijedi funkciju Weibullove distribucije, funkcija gustoće vjerojatnosti sloma mikroelementa može se izraziti na sljedeći način:

$$P(\varepsilon) = \frac{m}{\lambda} \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{(m-1)} e^{-\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m} \quad (15)$$

gdje je ε naprezanje mikroelementa. $P(\varepsilon)$ je funkcija distribucije mikroelementa, m i λ su dva parametra Weibullove statističke distribucije.

Slom materijala jednak je velikom oštećenju čvrstoće mikroelementa modificiranog uzorka. Varijabla oštećenja modificiranog uzorka pod opterećenjem definirana je kao omjer broja oštećenih mikroelemenata n_1 prema ukupnom broju mikroelemenata materijala N , odnosno: $D = n_1/N$. Broj elemenata u stanju sloma u bilo kojem intervalu $[\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon]$ je $NP(\varepsilon)d\varepsilon$, tada:

$$D = \frac{n_1}{N} = \frac{\int_0^\varepsilon NP(\varepsilon)d\varepsilon}{N} = 1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_\lambda}\right)^m} \quad (16)$$

gdje je ε_λ vrijednost deformacije koja odgovara vršnoj vrijednosti σ_λ , a m je parametar materijala koji karakterizira razvoj oštećenja materijala, $m = 1/\ln(E_0\varepsilon_\lambda/\sigma_\lambda)$.

Izrazi (10), (14) i (16) mogu se koristiti za proračun kontrolnih varijabli razvoja oštećenja kada se deformacija i broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja koriste kao kontrolne varijable:

$$D_m = 1 - \frac{E_n}{E_0} e^{-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_\lambda}\right)^m} \quad (17)$$

Izraz (13) može se koristiti za određivanje evolucijske jednadžbe ukupne stope oštećenja stijene kada se promijene deformacija i broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

$$D_m = (1 - D_n) \frac{\partial D}{\partial \varepsilon} + (1 - D) \frac{\partial D_n}{\partial n} \quad (18)$$

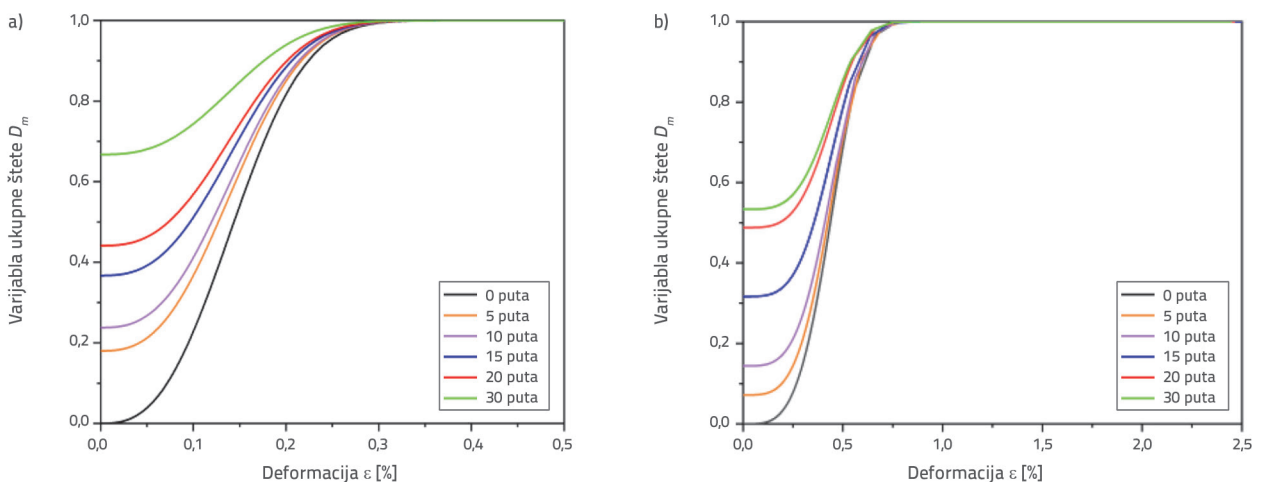
Prema načelu ekvivalencije deformacija koje je predložio Lemaitre, konstitutivni model oštećenja stijene u normalnim uvjetima je sljedeći:

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 - D_m) = E_n \varepsilon e^{-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_\lambda}\right)^m} \quad (19)$$

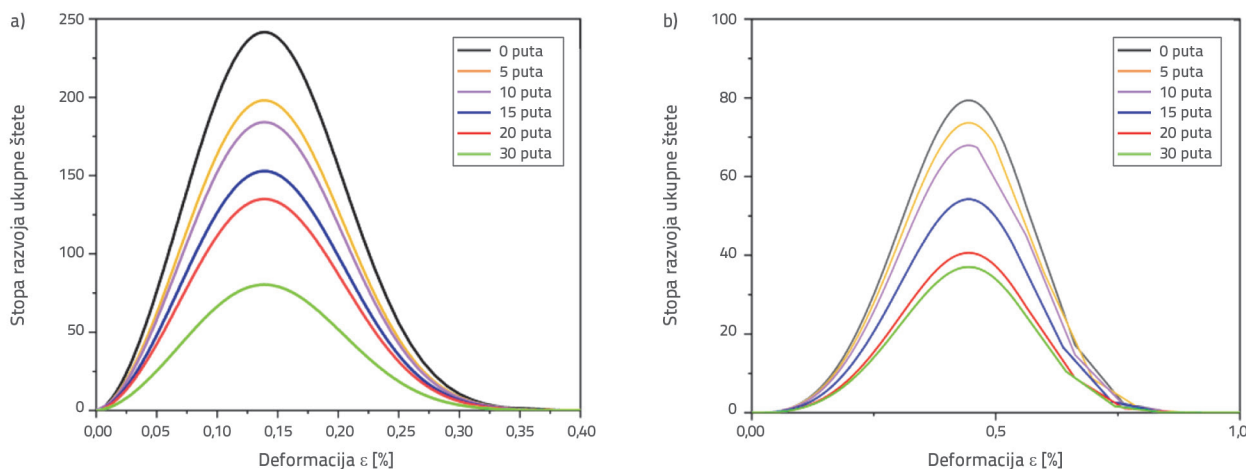
Krivulja razvoja oštećenja modificiranog trošnog pješčenjaka pod naprezanjem smrzavanja i odmrzavanja određuje se pomoću izraza (17), na temelju rezultata ispitivanja sa slike 10., a prikazana je na slici 16.

Pri istom broju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, slika 16. pokazuje da se oštećenja uzrokovana smrzavanjem i odmrzavanjem modificiranog pješčenjaka i crvenog pješčenjaka značajno povećavaju s povećanjem broja ciklusa. Do prvih 15 ciklusa, trend linija varijabli oštećenja je za oba uzorka gotovo identična, pokazujući postupno smanjenje intenziteta. Međutim, između 15 i 30 ciklusa, varijabla oštećenja modificiranog trošnog pješčenjaka pokazuje sporo povećanje nakon čega slijedi nagli skok, dok varijabla oštećenja crvenog pješčenjaka pokazuje brzi prirast nakon kojeg slijedi usporavanje. Nakon određenog broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, stopa oštećenja modificiranog trošnog pješčenjaka smrzavanjem i odmrzavanjem raste.

Tijekom početne faze opterećenja, izvorne pukotine i mikropukotine nastale smrzavanjem i odmrzavanjem postupno se zatvaraju i slabe pod pritiskom. Kako se opterećenje povećava, stopa oštećenja



Slika 16. Krivulja razvoja oštećenja: a) Modificirani trošni pješčenjak; b) Crveni pješčenjak



Slika 17. Krivulja stope razvoja ukupnog oštećenja: a) Modificirani trošni pješčenjak; b) Crveni pješčenjak

ubrza, a mikropukotine se nastavljaju formirati i povezivati, što na kraju dovodi do makropukotina. Jednom kada deformacija dosegne postavljeni prag, oštećenje se počinje razvijati, šireći se kontinuirano dok ne ubrza i približi vrijednosti varijable oštećenja od 1. Nakon što dosegne svoj vrhunac, stopa oštećenja uzorka pod stalnim opterećenjem progresivno se smanjuje. Do ove promjene dolazi jer uzorak prelazi iz lomljivog stanja u plastično nakon što je pretrpio oštećenja, što usporava brzinu oštećenja pod naprezanjem sve dok se varijabla oštećenja ne približi vrijednosti 1.

Koristeći izraze (10), (16) i (19), slika 17. prikazuje krivulju stope razvoja ukupnog oštećenja modificiranog trošnog pješčenjaka i crvenog pješčenjaka. Slika 17. prikazuje kako, pri istom broju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, stopa oštećenja modificiranog trošnog pješčenjaka i crvenog pješčenjaka raste s naprezanjem i postupno pada nakon dostizanja vrhunca. Na ekvivalentnim razinama deformacija stopa razvoja oštećenja za oba uzorka progresivno se smanjuje kako se povećava broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, što upućuje na kontinuirano povećanje njihove plastičnosti. Područje ispod krivulje stope razvoja ukupnog oštećenja na slici 17. predstavlja varijablu ukupnog oštećenja D_m . Karakteristike oštećenja uočene u modificiranom trošnom pješčenjaku i crvenom pješčenjaku dosljedne su onima prikazanim na slikama 16. i 17. Štoviše, porast oštećenja modificiranog trošnog pješčenjaka pri ciklusima smrzavanja i odmrzavanja odgovara predviđenim varijacijama u mehaničkom ponašanju stijene, koje je prikazano modelom oštećenja pod opterećenjem izazvanim smrzavanjem i odmrzavanjem, potvrđujući nalaze i analitičke zaključke izvedene iz ispitivanja mehaničkih karakteristika provedenih na uzorcima podvrgnutim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja.

6. Zaključak

Iz ovog istraživanja mogu se izvući sljedeći zaključci: Ciklusi smrzavanja i odmrzavanja značajno smanjuju otpornost modificiranog trošnog pješčenjaka na vanjska opterećenja. Ti ciklusi uzrokuju mikropukotine, gubitak agregata ili cementa

i pukotine u modificiranom trošnom pješčenjaku. U početku se masa uzorka blago povećava s brojem ciklusa smrzavanja i odmrzavanja prije smanjenja. Nadalje, brzina P-valova kontinuirano se smanjuje s povećanjem broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

Tlačna čvrstoća modificiranog trošnog pješčenjaka smanjuje se s povećanjem broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. U usporedbi s crvenim pješčenjakom, modificirani trošni pješčenjaci pokazuju znatno veću tlačnu čvrstoću. Ovo povećanje može se pripisati produktima hidratacije nastalim iz reakcije između cementa i agregata koji ispunjavaju praznine unutar agregata trošnog pješčenjaka. Ovo smanjuje praznine, povećava efektivnu kontaktnu površinu između čestica agregata i povećava čvrstoću cementa.

Skeniranje elektronskim mikroskopom pruža uvid u unutarnju strukturu i promjene poroznosti modificiranog trošnog pješčenja pri različitom broju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Kako se broj ciklusa povećava, poroznost modificiranog trošnog pješčenjaka se povećava, njegova unutarnja struktura slabi, a oblik pora se povećava s porastom njihovog broja. Posljedično, prosječni promjer pora postupno se povećava, što dovodi do progresivnog međusobnog povezivanja pora i smanjenja čvrstoće modificiranog trošnog pješčenjaka.

Uspostavljanje modela oštećenja uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja otkriva da je oštećenje modificiranog trošnog pješčenjaka intenzivirano kombiniranim učincima ciklusa smrzavanja i odmrzavanja te opterećenja. Ovo otkriće je u skladu s karakteristikama varijacije oštećenja uočenim u stijenama crvenog pješčenjaka, dodatno potvrđujući primjenjivost modificiranog trošnog pješčenjaka.

Zahvala

Ovaj rad je podržan od strane Nacionalne zaklade za prirodne znanosti Kine (br. 42161026 & 41801046), Projekta plana znanosti i tehnologije provincije Qinghai (br. 2023-QY-206) i Zaklade za istraživanje mladih Sveučilišta Qinghai (br. 2022-QGY-5).

LITERATURA

- [1] Zhou, Y., Guo, D., Qiu, G., et al.: *Geocryology in China*. Beijing: Science Press, 2000.
- [2] Xu, X., Wang, J., Zhang, L.: *Frozen soil physics*. Science Press, 2010.
- [3] Wang, Q., Fang, J., Zhao, X., et al.: The influence of pavement type on the thermal stability of block-stone embankments in the warm permafrost region. *Transportation Geotechnics*, 23 (2020) 11, pp.100334.
- [4] Wang, Q., Fang, J., Chao, G., et al.: Analysis of the cooling effect of high grade highway block stone subgrade in high temperature frozen soil area. *Rock and Soil Mechanics*, 41 (2020) 1, pp. 305-314.
- [5] Xu, Y., Shen, M., Zhou, Z., et al.: Study on long-term thermal stability of typical subgrade in high temperature permafrost region of Qinghai-Tibet Railway. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 44 (2022) 06, pp. 1784-1795.
- [6] Zheng, M., Fang, T., Diao, X., et al.: Laboratory test on the feasibility of filling roadbed with weathered soft rock. *Geotechnical mechanics*, 51 (2005), pp. 53-56.
- [7] Guo, Y., Shen, A., Gao, T., et al.: Road performance test and weathering degree evaluation of weathered rock roadbed filler. *Journal of Transportation Engineering*, 2014, 14 (2014) 3, pp. 15-23.
- [8] Zhao, J., Wang, S., Shang, Y., et al.: Analysis of Influencing Factors on Shear Strength of Completely Weathered Granite. *Geotechnical Mechanics*, 4 (2005), pp. 624-628.
- [9] Ki-Il, S., Gye-Chun, C., Seok-Won, L.: Effects of spatially variable weathered rock properties on tunnel behavior. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 26 (2010) 3.
- [10] Yang C, Zhou K, Xiong X, et al.: Experimental investigation on rock mechanical properties and infrared radiation characteristics with freeze-thaw cycle treatment. *Cold Regions Science and Technology*, 183 (2021), pp.103232.
- [11] Yahaghi, J., Liu, H., Chan, A., et al.: Experimental and numerical studies on failure behaviours of sandstones subject to freeze-thaw cycles. *Transportation Geotechnics*, 31 (2021), pp. 100655.
- [12] Li, J., Li, G., Peng, W., et al.: Analysis of the strength and deformation characteristics of saturated water weathered granite under different temperature conditions. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 42 (2020) 2, pp. 23-531.
- [13] Felix, N., Okonta Oluwapelumi, O.O.: The Stabilization of Weathered Dolerite Aggregates with Cement, Lime, and Lime Fly Ash for Pavement Construction. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, pp. 11.
- [14] Xuan, D., Houben, L., Molenaar, A., et al.: Mechanical properties of cement-treated aggregate material-A review. *Materials & Design*, 33 (2012) 1, pp. 496-502.
- [15] Chen, L., Zhang, J., Chen, J., et al. Static and dynamic characteristics test of cement-improved argillaceous slate coarse-grained soil. *Geotechnical mechanics*, 38 (2017) 7, pp. 1903-1910.
- [16] Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M., İnce, C.B.: Investigation of Use Potential of Fiber Added Concretes as Road Pavement on Weak Soils, *GRADEVINAR*, 75 (2023) 7, pp.665-678, <https://doi.org/10.14256/JCE.3619.2022>.
- [17] Es-Samlali, L., Haloui, Y. E., Amrani, M., Oudrhiri-Hassani, F., Tlidi, A., Bekri, A.: Potential valorisation of steel slag waste as an alternative material for pavement layers, *GRADEVINAR*, 75 (2023) 2, pp. 163-176, <https://doi.org/10.14256/JCE.3571.2022>.
- [18] Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M., İnce, C.B.: Benefit-cost relationship of using concrete with blast furnace slag as road pavement, *GRADEVINAR*, 75 (2023) 1, pp. 23-37, <https://doi.org/10.14256/JCE.3570.2022>.
- [19] Karadag, H., Firat, S., Işık, N.S., Yılmaz, G.: Determination of permanent deformation of flexible pavements using finite element model, *GRADEVINAR*, 74 (2022) 6, pp.471-480, <https://doi.org/10.14256/JCE.2708.2019>.
- [20] Kulkarni, S., Ranadive, M.: Effect of soil stabilization on design of conventional and perpetual pavement in India, *GRADEVINAR*, 74 (2022) 9, pp. 779-787, <https://doi.org/10.14256/JCE.3337.2021>.
- [21] Yan, G., Li, L., Shu, H., et al.: Experimental study on unconfined compressive strength of fully weathered argillaceous slate improved soil. *Geotechnical Engineering*, 12 (2009) 7, pp. 73-76.
- [22] Zhao, Y., Li, Y., Wang, C., et al.: Road performance of ordinary Portland cement improvement of strongly weathered phyllite filler. *Construction and Building Materials*, 350 (2022), pp. 128801.
- [23] Guo, Z., Ji, X., Wang, Y., et al.: Cement modified phyllite roadbed filler test. *China Science and Technology Paper*, 17 (2022) 7, pp. 724-730.
- [24] Wei, S., Wang, C., Yang, Y., et al.: Physical and mechanical properties of gypsum-like rock materials. *Advances in Civil Engineering*, 2020 (2020), pp. 1-17.
- [25] Wu, Y., He, Q., Wang, Y.: Creep characteristics of rock-like materials under freeze-thaw cycles. *Industrial building*, 50 (2020) 10, pp. 106-110+62.
- [26] Changjiang Academy of Science: Code for rock tests in water and hydro power projects, SL/T264-2020, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2020.
- [27] Ministry of Transport of China: Test Methods of Rock for Highway Engineering. People's Transportation Publishing House, 2017.
- [28] Selen, L, Panthi, K.K., Vistnes, G.: An analysis on the slaking and disintegration extent of weak rock mass of the water tunnels for hydropower project using modified slake durability test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79 (2020), pp. 1919-1937.
- [29] ISRM: Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slakedurability index properties: Part 1: suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 16 (1979) 2, pp. 143-151.
- [30] Zhang, Q., Wang, Q., Fang, J., et al.: Study of the characteristics mechanical damage and constitutive model of crushed-rocks from high-grade highway in permafrost region. *Geofluids*, 2022 (2022), pp. 1-17.
- [31] Zhang, Q., Yang, G., Ren, J.: New discussion on damage variable and constitutive equation of rock. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22 (2003) 1, pp. 30-34.
- [32] Yuan, X., Liu, H., Liu, J.: A damaging model of jointed rock under coupled action of freezing and the wing. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34 (2015) 8, pp. 1602-1611.
- [33] Xu, W., Wei, L.: Research on statistical constitutive model of rock damage. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21 (2002) 6, pp. 787-791.