

Primljen / Received: 16.10.2022.

Ispravljen / Corrected: 10.4.2023.

Prihvaćen / Accepted: 19.4.2023.

Dostupno online / Available online: 10.6.2023.

Nelinearno mikromehaničko ponašanje heterogenog makadama stabiliziranog cementom

Autori:



Mr.sc. **Cheng-cheng Luo**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Shijiazhuang Tiedao, Kina
Fakultet prometnih znanosti
2737974189@qq.com



Izv.prof.dr.sc. **Zhan-you Yan**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Shijiazhuang Tiedao, Kina
Građevinski fakultet
yanzhanyou@163.com
Autor za korespondenciju



Mr.sc. **Jun-zhuo Liu**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Shijiazhuang Tiedao, Kina
Fakultet prometnih znanosti
752903581@qq.com



Mr.sc. **Han Li**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Shijiazhuang Tiedao, Kina
Fakultet prometnih znanosti
1030215096@qq.com

Izvorni znanstveni rad

Cheng-cheng Luo, Zhan-you Yan, Jun-zhuo Liu, Han Li

Nelinearno mikromehaničko ponašanje heterogenog makadama stabiliziranog cementom

Ovim istraživanjem nastoji se ispitati unutarnje mehaničko ponašanje makadama stabiliziranog cementom koje je oštećeno opterećenjem uslijed uranjanja u vodu. Izradom modela numeričke analize ispitani su mehanizam slabljenja makadamskog materijala stabiliziranog cementom i unutarnje mikromehaničko ponašanje uzoraka. Rezultati dobiveni numeričkom simulacijom uspoređeni su s laboratorijskim podacima. Pogreška uslijed vršnog naprezanja iznosila je 2,414 %, a najveća je pogreška u naprezanju odgovarala vršnom naprezanju uzoraka pri različitim trajanju uranjanja te je iznosila 3,05 %. Usporedbom razdiobe smjera normalnih i tangenčnih kontaktnih sila u svakoj fazi ustanovilo se da su tangენტne sile pri približno 0°, 90°, 180° i 270° puno manje nego one pri drugim kutovima. U fazi vršnog naprezanja, normalni kontaktni kutovi između 45–135° i 225–285° znatno su viši od onih pod drugim kutovima. Kad je model M (srednji faktor) manji od 20, vršno naprezanje značajno se promijenilo i povećalo kao funkcija M. Kad je M bio veći od 20, vršno naprezanje variralo je unutar malog raspona kao funkcija M. Prikazano istraživanje nudi novu metodu ispitivanja u svrhu analize strukturnih mehaničkih učinaka koje imaju kolničke konstrukcije temeljene na makadamima stabiliziranim cementom i oštećenim uslijed uranjanja u vodu.

Ključne riječi:

makadam, stabilizacija cementom, oštećenje izazvano uranjanjem, ispitivanje jednoosnog zbijanja, diskretni element

Original research paper

Cheng-cheng Luo, Zhan-you Yan, Jun-zhuo Liu, Han Li

Non-linear micro-mechanical behavior of heterogeneous cement-stabilized macadam

This study aims to examine the internal meso-mechanical behaviour of cement-stabilised macadam subjected to loading damage following water immersion. By constructing a numerical analysis model, the mechanism of water-immersion weakening of the cement-stabilised macadam material and the internal micro-mechanical behaviour of the specimen were analysed. The numerical simulation results were compared with laboratory test data. The peak stress error was 2.414 %, whereas the maximum error in the strain corresponding to the peak stress of the specimens with different immersion durations was 3.05 %. By comparing the direction distributions of the normal and tangential contact forces in each stage, it was found that the tangential forces at approximately 0°, 90°, 180°, and 270° were much smaller than those at other angles. In the peak stress stage, the normal contact angles between 45–135° and 225–285° were higher than those at other angles. For model M (mean factor) less than 20, the peak stress was significantly affected and increased as a function of M. When M was greater than 20, the peak stress fluctuated within a small range as a function of M. This study provides a new research method for the study of the structural mechanical effect of pavement structures based on cement-stabilised macadam materials damaged following water immersion.

Key words:

macadam, cement stabilization, immersion damage, uniaxial compression test, discrete element

1. Uvod

Makadami stabilizirani cementom (engl. *Cement-stabilised macadam* - CSM) materijali su koji imaju izvrsna mehanička svojstva poput velike čvrstoće, velike krutosti i dobre stabilnosti. Štoviše, oni imaju sposobnost da zamijene određene agregate što može učinkovito smanjiti projektne troškove [1, 2], a zbog čega se široko primjenjuju kao nosivi slojevi kolničkih konstrukcija. Ovaj materijal je nehomogen, diskontinuiran, umjetan i polukrt, te je važan istraživački pravac unutar mehanike krutih tijela. CSM kao nosivi sloj kolničke konstrukcije može prenijeti opterećenje s površine kolničke konstrukcije ravnomjerno na posteljicu. Povećanjem čvrstoće nosivog sloja može se učinkovito poboljšati stabilnost površinskog sloja [3]. Zato je za dugotrajnost i kvalitetu kolničke konstrukcije ključno detaljno istraživanje strukturnih mehaničkih svojstava posteljice, a to znači da je vrlo smisleno istražiti mehanička svojstva CSM materijala [4].

Većina istraživanja na temu CSM-a fokusira se na analizu obrasca pucanja posteljice, često na temelju laboratorijskih ispitivanja, a s ciljem da se analiziraju makromehanička svojstva strukture. Razvoj intrinzičnog strukturnog modela kolnika postupno je napredovao od rane faze linearno elastičnih modela do faze elastično-plastičnih modela loma [5]. U numeričkim simulacijama kolničkih konstrukcija, glavne metode uključuju konačne, granične i metode diskretnih elemenata. Zasad su prve dvije metode u zreloj fazi, a modeli izračuna su učinkoviti zbog čega daju stabilne rezultate. Razvoj makromehanike temelji se na raznim ispitivanjima kojima je cilj optimizacija mehaničkih svojstava CSM materijala. U svom istraživanju ponašanja vlačnih i posmičnih oštećenja slojeva stabiliziranih cementom, a koji su izloženi perimetralnom pritisku, Namikawa primjenjuje vlačne sile na uzorke uz pomoć testa troosnog dreniranog naprezanja [6]. Zhang je proveo ispitivanje savijanjem u tri točke na CSM-u primjenom različitih omjera i vremena stvrdnjavanja te analizirao karakteristike loma materijala određivanjem žilavosti loma, energije loma i deformacije CSM-a [7]. Kako bi se poboljšala računalna učinkovitost većina numeričkih analiza bazira se na homogenim modelima. Namikawa je primjenom metode konačnih elemenata razvio tri modela podloge koja je cementom stabilizirana i to tijekom izravnog vlačnog naprezanja, podijeljenog vlačnog naprezanja i tijekom ispitivanja savijanja kako bi se objasnile razlike u vlačnoj čvrstoći [8]. Karadag je stvorio model dvodimenzionalnog simetričnog konačnog elamenta za savitljivi kolnik koji bi mogao učinkovito simulirati interakcije između slojeva [9]. Energija loma značajno je smanjila indeks lomljivosti velikih čestica kao što predlaže Tasdemir [10]. Mihashi je tvrdio da postoji nesigurnost između čvrstoće materijala i veličine agregata [11], a Chen da se čvrstoća smanjila pri povećanju veličine čestice [12]. Makroskopsko mehaničko ponašanje koje pokazuje konstrukcija ne može se predložiti kao pravilo zbog toga što se ispitivanjima na makrorazini ne može odrediti mehanizam mehaničke interakcije između unutarnjih mezoskopskih čestica te se ne može precizno kontrolirati unutarnja raspodjela mikropukotina, poroznost i drugi mezoskopski parametri. Kako su

Roelfstra i sur. prvi analizirali nehomogena svojstva numeričkog modela betonskih materijala iz mikroskopske perspektive, beton se ispitivao tako što se je razdijelio na agregate, cementnu žbuku i presjeke. Zato, kako bi se analizirala mehanička svojstva betona, mezomehanička ispitivanja moraju se oslanjati na numeričke analize [13]. Odnosi regresije moraju se uspostaviti primjenom makroskopskih mehaničkih ponašanja poput elastičnog modula materijala, broja slojeva kolničke konstrukcije i strukture posteljice te linearnog odnosa između makroskopskih parametara koji se može koristiti kako bi promijenio granulometrijski sastav čestica s ciljem poboljšanja ekonomskih dobiti. Detaljna analiza interakcije između makroskopskih parametara temeljnog tla poput uključivanja mezoskopskih mehaničkih svojstava i matematičkog modela utjecaja parametra dat će potpunije i točnije razumijevanje. Štoviše, kad je granulometrijska krivulja prilagođena, promjene u unutarnjem strukturnom mehaničkom ponašanju omogućavaju dubinsko razumijevanje [14]. Proces stvaranja modela diskretnih elemenata uzima u obzir poroznost, raspodjelu pora, granulometrijsku krivulju te oblik agregata na mehanička svojstva modela, pri čemu se simulira razvoj pukotina u asfaltbetonu pri ispitivanjima kružnom pločom i savijanja u tri točke. Štoviše, uočava se učinak veličine čestica na proces loma materijala [15–17]. Stvorio se trodimenzionalni model mješavine diskretnog elementa kako bi simulirao ispitivanja indirektnog vlačnog naprezanja nehomogenih lomljivih materijala i svi su postigli dobru podudarnost. Prema tome, ispitani su učinci unutarnje raspodjele mezoskopskog polja pomaka i varijacije u strukturi, granulometrija agregata, koeficijent trenja i udio tangente krutosti pomaka na strukturnu čvrstoću [18, 19]. Iako trenutni model diskretnog elementa može povezati utjecaje mezoskopskih čestica između struktura materijala, CSM kao umjetni polukrti materijal mora prikazati slučajnu raspodjelu mezoskopskih fizičkih parametara unutar strukture materijala. Očito je da se mezoskopski parametri uzimaju u obzir kao stalne vrijednosti kad se izvode numeričke simulacije, a to se razlikuje od stvarne situacije. Utjecaj raznih faktora na promjenu kontakta između različitih kontakata čestica bio je zanemariv. Osim toga, u fazi opterećenja modela, simulirani rezultati pokazuju linearni odnos između naprezanja i deformacije, a što ne upućuje na postupno povećanje naprezanja u ranoj fazi opterećenja zbog zbijenosti pora. Međutim, kako bi se poboljšala uporabljivost kolnika, samo probabilistička predviđanja parametara ulaska vode u kolničku konstrukciju mogu se napraviti u fazi projektiranja [20]. Štoviše, postoji ozbiljan nedostatak iz mezoskopske perspektive u trenutačnoj analizi mehanizma oštećenja uslijed uranjanja CSM materijala u vodu.

Prema tome, ovo je istraživanje primijenilo teoriju diskretnog elementa kako bi stvorilo model numeričke analize kojim bi se simulirali eksperimenti jednoosnog tlačnog naprezanja na CSM koji je oštećen uranjanjem u vodu. Prema tome, dodana je funkcija Weibullove razdiobe multiplikatora radijusa kako bi se predočila slučajna raspodjela radijusa kontakta čestica u modelu, te kako bi se ostvarile nehomogene karakteristike materijala. Da bi se ostvario nelinearni dinamički proces u

obliku krivulje naprezanje - deformacija tijekom opterećenja, kontrolne funkcije mezoskopskog parametra dodane su modelu numeričke analize. Utjecaj modela diskretnih elemenata na oštećene potopljene uzorke koristio se kako bi se analizirao trend vršnog naprezanja i kontaktne površine, distribucija normalnih i smjerova tangencijalne kontaktne sile, učinak faktora homogenosti na vršno naprezanje te druga istraživanja koja se bave mezoskopskim mehaničkim ponašanjima.

2. Jednoosno tlačno ispitivanje CSM-a oštećenog vodom u laboratorijskim uvjetima

2.1. Standardi pripreme uzoraka i oštećenja izazvana uranjanjem u vodu

Prema normi JTG E51-2009, standardna je pripremna veličina granulometrije šljunka u uzorku 150 mm x 150 mm (tablica 1.). Uzorci su uronjeni u vodu na početku pripremne faze kako bi nestali unutarnji mjehurići zraka, a povećala se interferencija za 37,5 cm svaka 2 sata. Dužina uranjanja evidentirana je nakon 8 sati. Svaka se grupa određena dužinom uranjanja kontrolirala nakon 3, 7, 15, 20, 25 i 30 dana (d).

Tablica 1. Granulometrija šljunka

Otvor sita [mm]	2,36	4,75	9,5	19	26,5
Postotak prolaska [%]	28	45	55	83	100

2.2. Jednoosna tlačna ispitivanja

Kako bi se precizno odredio proces promjene naprezanja kojem je uzorak izložen tijekom opterećenja, tenzometar je zalijepljen na sredinu uzorka (25 mm od gornje i donje površine dna) u okomitom smjeru te na ravnoj i glatkoj površini, kao što prikazuje slika 1. Tenzometar i vodič zavareni su, kao što je prikazano na slici 2., s ciljem da smanje promjenu otpornosti koju izaziva opterećenje u točki kontakta spoja između tenzometra i vodiča te stoga stvore pogreške u mjerenju. Slijedom toga, to je omotano izolacijskom vrpcom radi izolacije.



Slika 1. Položaj i smjer vrpce tenzometra

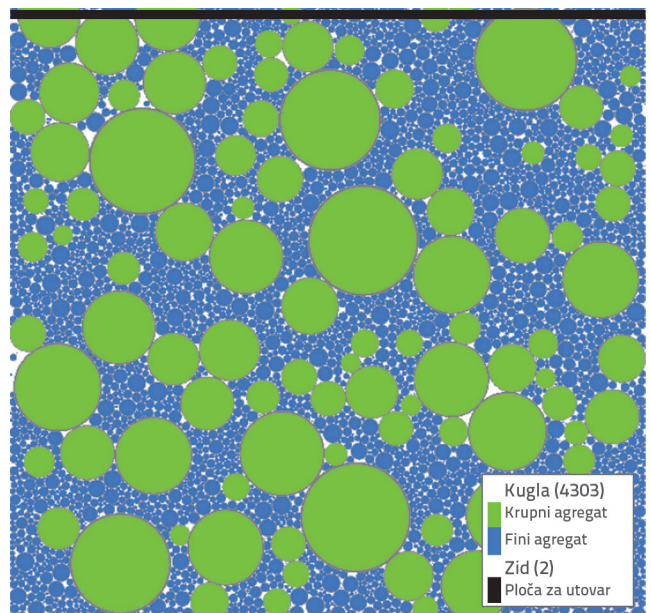


Slika 2. Zavarivanje kontaktne točke

3. Stvaranje modela diskretnog elementa

3.1. Stvaranje modela agregata

Prema granulometriji laboratorijskog materijala, agregat prikazan na slici 3. nastao je u modelu, a dijametar čestice nastao je u svakom malom rasponu određenom u tablici 1. na temelju nasumične teorije. Čestice su se nasumično raspodijelile u modelu. Čestice promjera $\geq 4,75$ mm smatrane su grubim agregatom (zeleno čestice na slici). One promjera $< 4,75$ mm smatrane su finim agregatima i cementnim materijalima (plave čestice na slici). Gornja i donja faceta dodane su modelu kao ploče opterećenja (na slici je to crna linija).



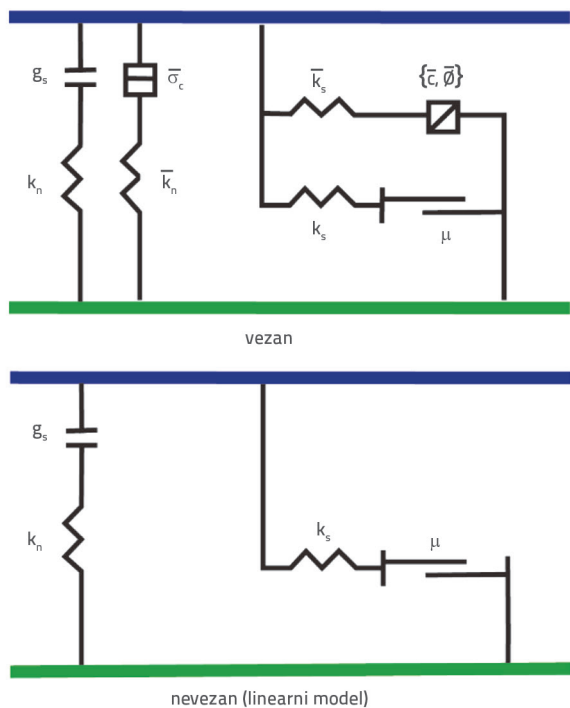
Slika 3. Model raspodjele agregata

3.2. Model konstitutivnog kontakta

Mehanički kontakt primijenjen je između svakog agregatnog sučelja za nastale modele agregata. Model diskretnog elementa odabire model paralelnog kontaktnog spajanja [21], kao što je prikazano na slici 4., gdje \bar{c} označava jačinu spoja, $\bar{\Phi}$ je kut trenja, $\bar{\sigma}_c$ je normalna vlačna čvrstoća, \bar{K}_s je paralelna posmična krutost, a \bar{K}_n je paralelna normalna krutost. Paralelni kontakti mogu se klasificirati kao vezana i nevezana stanja. Kada naprezanje spoja prelazi granicu energije veze, ono puca i degenerira se u linearni kontaktni model. Štoviše, kada se relativni pomak pojavljuje između čestica, na silu kontakta u modelu spoja utječe linearna kontaktna sila, sila prigušenja te sila \bar{F} koju proizvodi paralelni vezni kontakt. Rezultirajući kontaktni moment M_c određuje se jedino primjenom paralelnog veznog momenta M_c

$$F_c = F + F^d + \bar{F} \tag{1}$$

$$M_c = \bar{M} \tag{2}$$



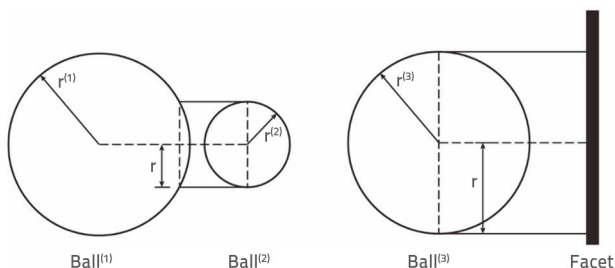
Slika 4. Paralelno kontaktno spajanje

3.3. Model heterogene raspodjele mezoskopskih parametara

U modelu spajanja s paralelnim kontaktom, radijus kontakta izravno određuje temeljne parametre međučestičnih vlačnih čvrstoća i savojnih torzijskih čvrstoća. U tradicionalnim numeričkim simulacijama izračuna diskretnih elemenata multiplikator radijusa obično nije postavljen (postavljena je zadana vrijednost jednaka jedan) kao što prikazuje slika 5. Ako su spojem povezane dvije čestice (radijusa $r^{(1)}$ i $r^{(2)}$), smatra se

da je radijus kontaktnog spoja jednak radijusu male čestice $r^{(2)}$. Ako je spojem čestica povezan sa zidom, kontaktni radijus smatra se jednakim radijusu čestice $r^{(3)}$. Multiplikator radijusa paralelne veze λ faktor je povećanja ili smanjenja kontaktnog radijusa, pri čemu se kontaktni radijus može izraziti izrazom (3). Proces oštećenja modela uslijed uranjanja u vodu temeljio se na morfologiji stalne čestice, a multiplikator radijusa nije se uzeo u obzir. Nehomogene karakteristike vezivnog materijala mogu se postići postavljanjem u stanje raspodjele multiplikatora radijusa, a homogenost modela može se kontrolirati.

$$\bar{r} = \lambda \begin{cases} \min(r^{(1)}, r^{(2)}) \text{ ball - ball} \\ r^{(3)} \text{ ball - facet} \end{cases} \tag{3}$$



Slika 5. Shema koja prikazuje radijus kontakta

Ipak, kao umjetan polukrti materijal, distribucija multiplikatora radijusa CSM-a trebala bi pokazivati određenu slučajnost koja će se razlikovati od stvarne situacije. Stoga je uveden model Weibullove razdiobe u ovom istraživanju. Kako je to funkcija neprekidne distribucije, funkcija vjerojatne gustoće Weibullove razdiobe izražava se kako je prikazano izrazom (4):

$$f(x; u, k) = \begin{cases} \frac{k}{u} \left(\frac{x}{u}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{u}\right)^k}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \tag{4}$$

gdje x predstavlja slučajnu varijablu, $u > 0$ predstavlja parametar mjerila, a $k > 0$ predstavlja parametar oblika.

Statistika Weibullove razdiobe daje:

$$\text{Srednju vrijednost: } \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \tag{5}$$

$$\text{Odstupanje: } \lambda^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)^2 \right] \tag{6}$$

Simbol Γ predstavlja gama funkciju,

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (x > 0) \tag{7}$$

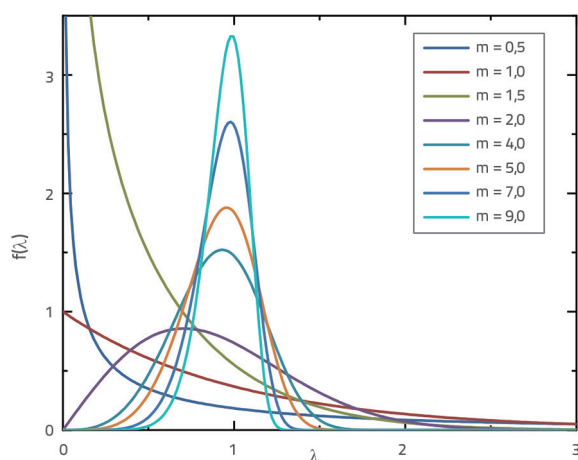
Stoga nastali multiplikator radijusa u modelu vjerojatnosti razdiobe diskretnog modela oslanja se na Weibullovu razdiobu koja se može izraziti kao

$$f(\lambda) = \frac{m}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{m-1} \exp\left(-\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^m \quad (\lambda \geq 0) \quad (8)$$

Funkcija kumulativne razdiobe

$$F(\lambda) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^m\right] \quad (\lambda \geq 0) \quad (9)$$

gdje λ predstavlja varijablu razdiobe slučajne razdiobe multiplikatora radijusa, a m predstavlja faktor homogenizacije razdiobe materijala u modelu koji se mijenja u skladu s faktorom homogenizacije. Slika 6. prikazuje dijagram vjerojatnosti distribucije gustoće.

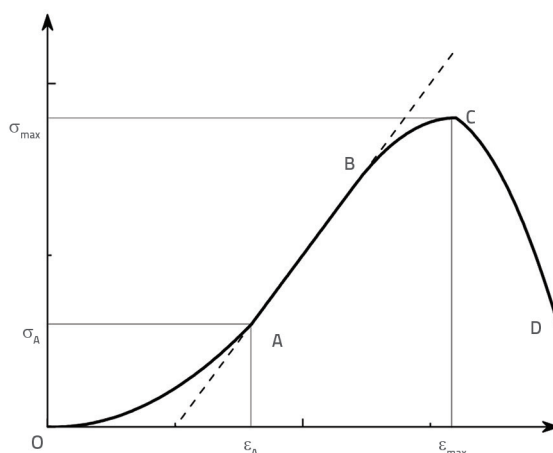


Slika 6. Grafikon Weibullove razdiobe

3.4. Nelinearna kontrola opterećenja modela

U slučaju kad se koristi tradicionalni model diskretnog elementa kako bi simulirao jednoosno tlačno naprezanje, krivulja naprezanje-deformacija tipično je linearna u naknadnoj fazi, a naprezanje je proporcionalno deformaciji u slučaju kad ne dođe do vršnog naprezanja. Slika 7. prikazuje tipične krivulje naprezanje-deformacija u stvarnim jednoosnim tlačnim ispitivanjima provedenim na CSM materijalima. Opažanja upućuju na to da se deformacija povećava povećanjem

naprezanja u periodu koje prethodi opterećenju i pokazuje nelinearnu fazu postupnog smanjenja deformacije u slučaju kad se naprezanje povećava ravnomjerno, odnosno, područje OA na slici. Konstrukcija je zbijena porama, agregati su postupno zatvoreni i u stanju naprezanja, konstrukcija je stalno zbijena, a model krutosti postupno se povećava povećanjem naprezanja. Kad dosegne nagib koji je jednak elastičnom modulu materijala, nelinearna faza ranije završava. U tom trenutku naprezanje se nastavlja povećavati pri ravnomjernom opterećenju, a deformacija se počinje nepromjenjivo povećavati u linearnoj fazi opterećenja (područje AB na slici 7.). Kako bi se simulirao proces nelinearnog opterećenja primjenom modela numeričke analize, funkcije kontrole dodane su modelu. Prema tome, unutarnji mezoskopski parametri modela promijenili su se pri povećanju naprezanja tijekom procesa prije opterećenja sve dok model nije ušao u fazu linearnog opterećenja.



Slika 7. Tipična krivulja naprezanje - deformacija koja nastaje tijekom jednoosnog tlaka

3.5. Kalibracija modela mezoparametra

Zasada, izravna mjerenja mezoparametara unutar materijala pomoću laboratorijske opreme predstavljaju izazov jer rezultati ispitivanja dobiveni makroispitivanjima daju velike pogreške izračuna, a učinak spajanja između svakog mezoparametra

Tablica 2. Mezoparametri kontaktnog modela

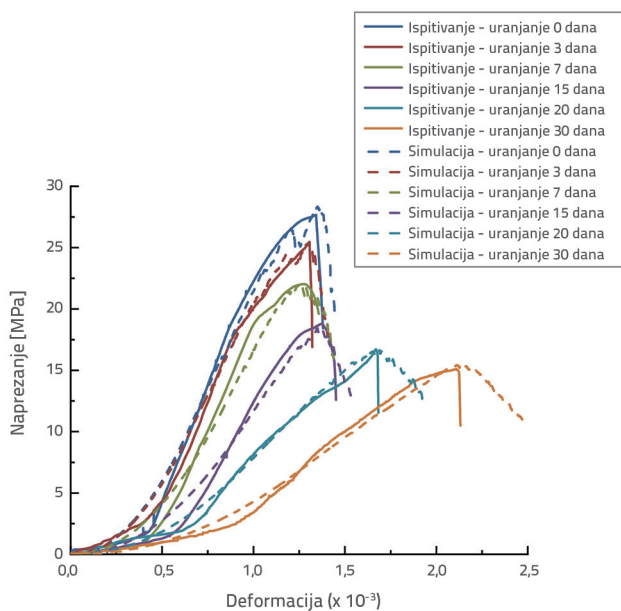
Naziv parametra	Simboli parametra	Iznos vrijednosti
Referentni otvor [m]	G, gap	$0,5 \cdot 10^{-4}$
Efektivni modul [Pa]	E^* , pbm_emod	$1,0 \cdot 10^6$
Modul efektivnog spoja [Pa]	\bar{E}^* , pbm_bemod	$1,0 \cdot 10^8$
Vlačna čvrstoća [N]	$(\bar{\sigma}_c)_{\text{mad}}$	$19,8 \cdot 10^6$
Kohezija [N]	\bar{c} , pb_coh	$50,0 \cdot 10^8$
Kut trenja [°]	$\bar{\Phi}_{\text{msd}}$, pbm_f	0,0
Normalni kritični koeficijent prigušenja [-]	$\beta_{n'}$, dp_mratio	0,5
Koeficijent trenja [-]	$\mu_{n'}$, lnm_feic	0,577

ne može se odrediti. Zato se, umjesto postavljanja nekoliko parametara modela, jedan parametar prilagodio, a odredio se zakon promjene. Iz toga proizlazi da su se drugi parametri kontrolirali neovisno kako bi se odredile njihove približne vrijednosti. Ovo istraživanje kontroliralo je varijable jednog elementa kako bi odredio zakon promjene i to na temelju rezultata dobivenih izračunom u makroispitivanjima i na temelju empirijske vrijednosti modeliranja diskretnog elementa. Nakon toga odredio se izračun spoja za varijablu svakog parametra. Slijedom toga uspoređeni su rezultati numeričkih izračuna i rezultati dobiveni laboratorijskim ispitivanjima, a parametri su određeni na temelju neprekidnih izračuna pokušaja i pogreške, kao što je prikazano u tablici 2.

4. Analiza rezultata dobivenih numeričkim simulacijama modela koji su izloženi oštećenju izazvanom uranjanjem u vodu

4.1. Ekstrahiranje podataka o makromehaničkom ponašanju

Podaci o naprezanju - deformaciji koji su se dobili na temelju jednoosnih tlačnih ispitivanja na potopljenom uzorku u laboratoriju i podaci dobiveni na temelju ispitivanja numeričkih simulacija na modelu diskretnog elementa prikazani su na slici 8. Pune linije predstavljaju podatke o ispitivanju, a isprekidane predstavljaju podatke o simulaciji modela. Krivulje u tablici pokazuju da su povećanja naprezanja s deformacijama u krivuljama modela i laboratorijskih ispitivanja bila ista.



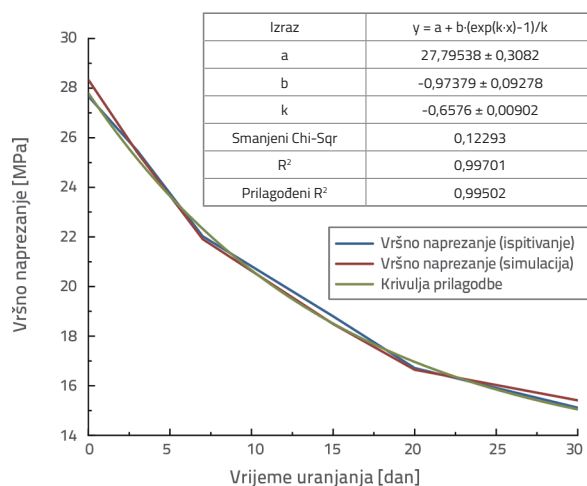
Slika 8. Usporedba krivulja koje prikazuju naprezanje - deformaciju

Plava krivulja na slici 9. predstavlja vršno naprezanje tijekom jednoosnog tlačnog ispitivanja za različito vrijeme uranjanja u laboratoriju, a crvena krivulja predstavlja vršno naprezanje

dobiveno na temelju simulacija modela. Odgovarajuće usporedbe pokazale su da je najveća razlika između ispitivanja i simulacije koji su se pojavili u nepotopljenom uzorku ona s pogreškom 2,414 %. Nakon podešavanja, koeficijent korelacije bio je $R^2 = 0,997$, učinak podešavanja bio je dobar, a funkcija podešavanja je,

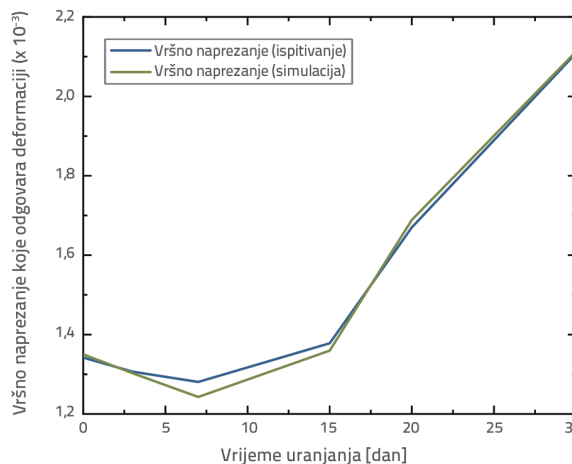
$$y = 27,79538 - 0,97379 \cdot \frac{[\exp(-0,06576 \cdot x) - 1]}{-0,06576} \tag{10}$$

$$= 27,79538 + 14,80824[\exp(-0,06576 \cdot x) - 1]$$



Slika 9. Deformacija pri vršnom naprezanju

Odgovarajuće deformacije između ispitivanja i numeričkih simulacija u slučaju kad naprezanje dosegne vršnu fazu prikazuje slika 10. Crne krivulje upućuju na eksperimentalne rezultate (ispitivanje), a crvene na rezultate numeričkih simulacija. Maksimalna pogreška između tih dvaju rezultata pojavila se u slučaju uranjanja u vodu u trajanju od 7 dana i iznosila je 3,05 %. Ispitivanje vršnog naprezanja doseglo je vrijednost $2,109 \times 10^{-3}$ nakon što je uzorak bio uronjen 30 dana, a pogreška simulacije modela iznosila je samo 0,20 %. Vršna deformacija imala je tendenciju smanjenja nakon što je uzorak uronjen 0 do 7 dana, a postupno se povećala s vremenom uranjanja.



Slika 10. Deformacija koja odgovara vršnom naprezanju

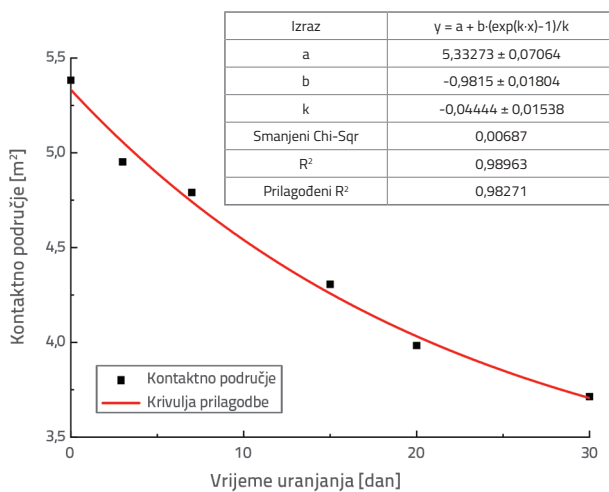
4.2. Ekstrakcija podataka vezanih uz mikromehaničko ponašanje

Tijekom slabljenja materijala CSM-a uslijed uranjanja u vodu otkriveno je da se kontaktna površina smanjuje kao funkcija vremena uranjanja detekcijom kontaktne površine poprečnog presjeka između čestica u modelu. Dobiven je sljedeći funkcionalni odnos podešavanjem kontaktne površine vremenu uranjanja, kao što prikazuje slika 11.:

$$y = 5,33273 - 0,9815 \cdot \frac{[\exp(-0,04444 \cdot x) - 1]}{-0,04444} \quad (11)$$

$$= 5,40428 + 2,20860[\exp(-0,04444 \cdot x) - 1]$$

Koeficijent korelacije podešene funkcije bio je $R^2 = 0,98963$; stoga, podešavanje je bilo dobro.

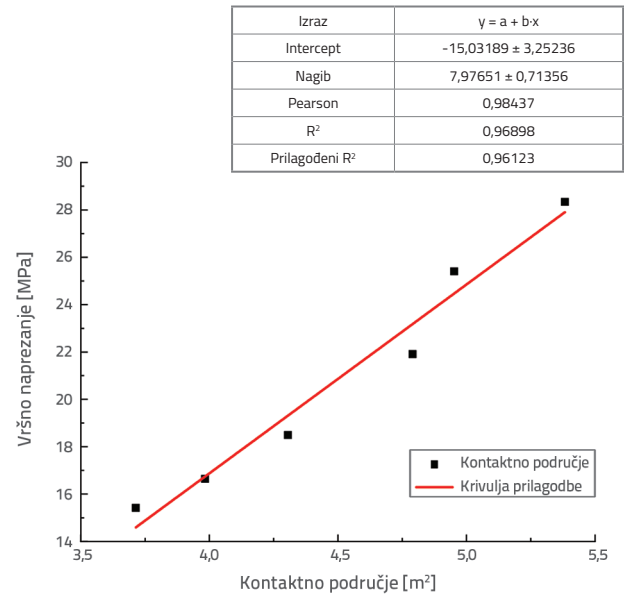


Slika 11. Kontaktna površina - vrijeme uranjanja

4.3. Usporedba makromehaničkih i mezomehaničkih ponašanja

Na temelju usporedbe analiziranih podataka vezanih uz makromehanička i mezomehanička ponašanja dobivena je formula konstrukcije $y = a + \frac{b \cdot [\exp(kx) - 1]}{k}$ koja se koristila u podešavanju mezokontaktne površine i slabljenja učinka uranjanja. Formula je identična krivulji podešavanja koja prikazuje vršno naprezanje i vrijeme potapanja, kao što je prikazano u makromehaniči.

Slika 12. prikazuje odnos između vršnog naprezanja i kontaktne površine. Podešavanje funkcije pokazalo je pozitivnu linearnu korelaciju između magnitude vršnog naprezanja i kontaktne površine. Kad se kontaktna površina povećala, vršno se naprezanje povećalo. Funkcionalni odnos dan je izrazom $y = 7,97651x - 15,03189$.

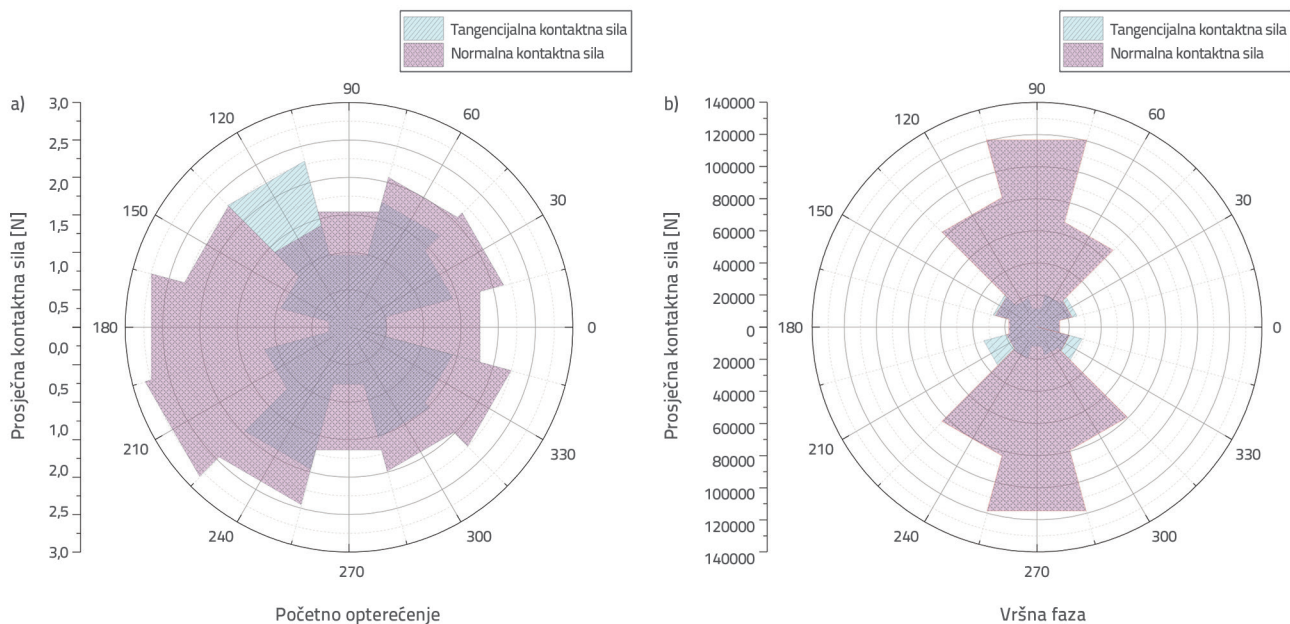


Slika 12. Odnos između vršnog naprezanja i kontaktna površina

5. Analiza rezultata vezanih uz mikromehaničko ponašanje

5.1. Zakon razdiobe tangentialnih i normalnih kontaktnih površina

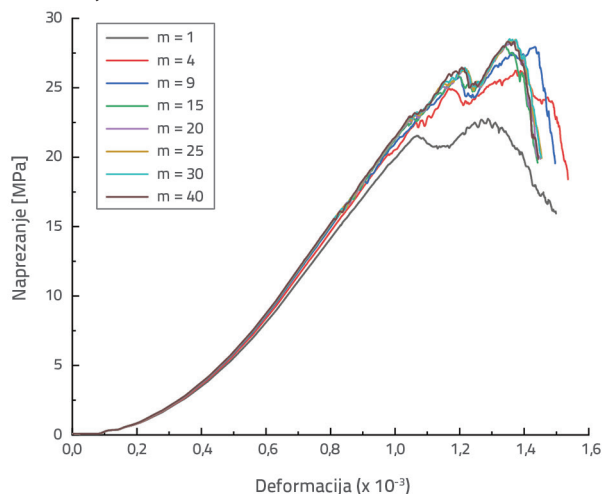
Kako bi se istražila razdioba tangentialne kontaktne sile u unutarnjem mikromehaničkom ponašanju CSM materijala pri različitim fazama opterećenja, ekstrahirani su podaci vezani uz razdiobu tangentialnih i normalnih kontaktnih površina u modelu diskretnih elemenata u inicijalnoj fazi opterećenja te u fazi kad je naprezanje došlo do vrhunca, kao što prikazuje slika 13. Zelena površina predstavlja normalnu raspodjelu kontaktne sile, a ružičasta tangentialnu raspodjelu kontaktne površine. Prema dijagramu koji pokazuje raspodjelu kontaktne sile u inicijalnoj fazi opterećenja, normalna raspodjela kontaktne sile u svakom smjeru bila je relativno ravnomjerna, a relativne vrijednosti bile su male (sve ispod 3 N). U tangentialnoj raspodjeli kontaktne sile, rasponi kutova bili su $-15(345)-15^\circ$, $75-105^\circ$, $165-195^\circ$ i $225-285^\circ$, a vrijednost raspona bila je $0,275-0,98647$ N, što je značajno manje nego u slučaju kad su drugi kutovi u pitanju poput $1,17-2,29201$ N; drugim riječima, horizontalni i vertikalni smjerovi bili su značajno manji nego drugi smjerovi. U trenutku kad je opterećenje doseglo vrhunac, zakon razdiobe tangentialne kontaktne sile bio je isti, a raspon horizontalnih i vertikalnih smjerova ($11583,24579-17018,27479$ N) bio je značajno manji nego što je to slučaj s drugim kutovima ($18489,45798-34101,61295$ N); normalni raspon kontaktne površine u slučaju kutnih raspona $45-135^\circ$ i $225-285^\circ$ bio je $67470,7416-120686,0179$ N, što je značajno više nego ono kutnih raspona $-45(315)-45^\circ$ i $135-225^\circ$ koje je bilo $14973,26942-26597,49541$ N. Kontaktna sila u fazi vrhunca bila je značajno veća nego ona u inicijalnoj fazi opterećenja.



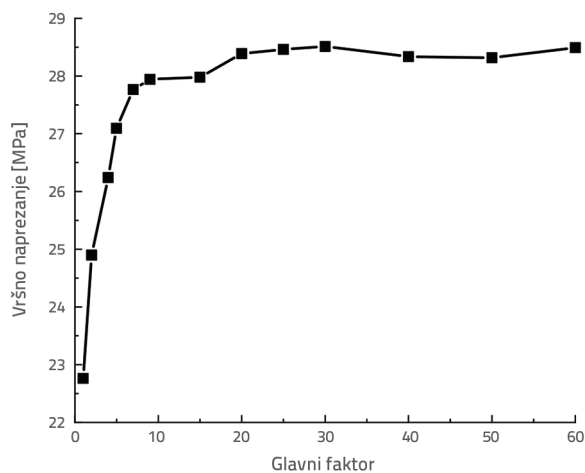
Slika 13. Vršno naprezanje koje odgovara smjeru kontaktnog naprezanja: a) Inicijalno opterećenje; b) Faza vrhunca

5.2. Utjecaj faktora homogenizacije

Varijacija u intenzitetu naprezanja u modelu diskretnih elemenata s faktorom homogenizacije u suhom stanju prikazana je na slici 14. Usporedba krivulja pokazuje da se faktor homogenizacije mijenja; međutim, trend promjene krivulje opterećenja naprezanje - deformacija ostaje isti. Faktor homogenizacije imao je minimalni učinak na čvrstoću modela tijekom faze ranog opterećenja. U kasnijim fazama opterećenja čvrstoća se postupno povećala s povećanjem faktora homogenizacije. Promjena vrhunca naprezanja koja je u skladu s promjenom faktora homogenizacije prikazana je na slici 15. Kada je m doseglo 20, vršno naprezanje imalo je tendenciju stabiliziranja.



Slika 14. Krivulje naprezanje - deformacija pri različitim faktorima homogenizacije



Slika 15. Grafikon koji prikazuje vršno naprezanje kao funkciju srednjeg faktora

6. Zaključak

Kako bi se odredio mehanizam oštećenja CSM materijala uslijed uranjanja u vodu, odnosno utjecaj oštećenja uslijed potapanja, na mehaničko ponašanje materijala izloženog opterećenju, izrađen je model diskretnih elemenata CSM materijala pri različitom vremenu uranjanja na temelju laboratorijskog granulometrijskog sastava materijala. Nelinearna promjena u makronaprezanju tijekom izloženosti opterećenju kontroliran je dodavanjem parametra kontrolne funkcije, a Weibullova razdioba funkcije mezoparametra (multiplikator radijusa) dodana je kako bi se ostvarila heterogenost modela. Na temelju eksperimentalne verifikacije laboratorijskih rezultata i rezultata analize dobivene numeričkom simulacijom može se zaključiti sljedeće:

- Usporedbom laboratorijskih podataka vezanih uz ispitivanje jednoosnog naprezanja i analiziranih rezultata ispitivanja dobivenih numeričkom simulacijom dobila se najveća pogreška koja iznosi 2.414 %. Štoviše, najveća pogreška u deformaciji koja odgovara vršnom naprezanju iznosila je 3.05 %, a to zadovoljava zahtjeve pogreške. Dokazano je da je model diskretnih elemenata izvediv u smislu simuliranja jednoosnog ispitivanja naprezanja CSM materijala.
- Odnosi između vršnog naprezanja i vremena uranjanja te između kontaktne površine i vremena uranjanja bili su ekstrahirani i podešeni. Dvije funkcije podešavanja imale su istu strukturnu formulu. Prema tome, dvije su funkcije podešavanja bile namještene za vršno naprezanje i kontaktnu površinu što je dokazalo da se proporcionalni linearni odnos među njima povećao kao funkcija kontaktne površine. Istovremeno, dokazalo se da je smanjenje kontaktne površine glavni faktor kad je u pitanju oštećenje CSM materijala uslijed uranjanja te smanjenje kapaciteta naprezanja koje može podnijeti CSM materijal.
- Na temelju ekstrahiranih raspodjela normalnih i tangenčnih kontaktnih sila u inicijalnoj fazi opterećenja i fazi vršnog naprezanja u procesu numeričkih simulacija, otkrilo se da su transverzalna i vertikalna ($-15-15^\circ$, $75-105^\circ$, $165-195^\circ$, $225-285^\circ$) posmična naprezanja u svakoj fazi tangentne kontaktne sile bili niži nego oni u slučaju drugih kutova. Normalna kontaktna sila između $45-135^\circ$ i $225-285^\circ$ na vrhuncu bila je značajno veća nego u slučaju drugih kutova. Kontaktna sila na vrhuncu bila je značajno veća nego ona u inicijalnoj fazi opterećenja.
- Intenzitet vršnog naprezanja u modelu numeričke analize povećao se uz pomoć faktora homogenizacije kad je taj faktor bio manji od 20. Međutim, kad je faktor homogenizacije bio veći od 20 i nastavio je rasti, povećalo se vršno naprezanje, iako je učinak bio minimalan.

LITERATURA

- [1] Kulkarni, S., Ranadive, M.: Effect of soil stabilization on design of conventional and perpetual pavement in India, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 9, pp. 779–787, <https://doi.org/10.14256/JCE.3337.2021>
- [2] Stijanović, M., Radonjanin, V., Malešev, M., Milović, T., Furgan, S.: Compressive strength of cement stabilizations containing recycled and waste materials, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 8, pp. 791–804, <https://doi.org/10.14256/JCE.3161.2021>
- [3] Geçkil, T., Tanyıldızı, M., Ince, C.: Benefit–cost relationship of using concrete with blast furnace slag as road pavement, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 1, pp. 23–37, <https://doi.org/10.14256/JCE.3570.2022>
- [4] Xu, H., Lin, H., Wang, P., Yan, H.: The influence of water immersion on the mechanical property of cement asphalt mortar and its implications on the slab track, *Journal of Vibroengineering*, 19 (2017) 1, pp. 477–486, <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17051>
- [5] Namikawa, T., Mihira, S.: Elasto-plastic model for cement-treated sand, *International Journal for Numerical and Analytical Methods Ingeomechanics*, 31 (2007) 1, pp. 71–107, <https://doi.org/10.1002/nag.550>
- [6] Namikawa, T., Hiayama, S., Ando, Y., Shibata, T.: Failure behavior of cement-treated soil under triaxial tension conditions, *Soils and Foundations*, 57 (2017) 5, pp. 815–827, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.08.011>
- [7] Zhang, P., Li, Q., Zhang, Y.: Investigation of fracture properties of cement-treated crushed rock, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 226 (2012) 4, pp. 342–349, <https://doi.org/10.1177/1464420712448170>
- [8] Namikawa, T., Koseki, J.: Evaluation of tensile strength of cement-treated sand based on several types of laboratory tests, *Soils and Foundations*, 47 (2007) 4, pp. 657–674, <https://doi.org/10.3208/sandf.47.657>
- [9] Karadag, H., Fırat, S., Işık, N., Yılmaz, G.: Determination of permanent deformation of flexible pavements using finite element model, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 6, pp. 471–480, <https://doi.org/10.14256/JCE.2708.2019>
- [10] Asdemir, C., Tasdemir, M., Lydon, F., Barr, B.: Effects of silica fume and aggregate size on the brittleness of concrete, *Cement and Concrete Research*, 26 (1996) 1, pp. 63–68, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00180-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00180-8)
- [11] Mihashi, H., Nomura, N., Izumi, M.: Influence of Matrix Strength and Gravel Grain Size on Fracture Properties of Concrete. *Fracture of Concrete and Rock: Recent Developments, Papers Presented at the International Conference, University of Wales, College of Cardiff, School of Engineering, Sep, Publication of: Society of Automotive Engineers*, 1989, pp. 503–512, <http://worldcat.org/isbn/1851664149>
- [12] Chen, B., Liu, J.: Effect of aggregate on the fracture behavior of high strength concrete, *Construction and Building Materials*, 18 (2004) 8, pp. 585–590, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.013>
- [13] Roelfstra, P., Sadouki, H., Wittmann, F.: *Le béton numérique, Materials and Structures*, 18 (1985), pp. 327–335, <https://doi.org/10.1007/BF02472402>
- [14] Mengue, E., Mroueh, H., Lancelot, L., Eko, R.: Design and parametric study of a pavement foundation layer made of cement-treated fine-grained lateritic soil, *Soils and Foundations*, 58 (2018) 3, pp. 666–677, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.025>
- [15] Meza-Lopez, J., Noreña, N., Meza, C., Romanel, C.: Modeling of asphalt concrete fracture tests with the discrete–element method, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32 (2020) 8, 04020228, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003305](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003305)
- [16] Chen, J., Huang, B., Shu, X.: Air-void distribution analysis of asphalt mixture using discrete element method, *Journal of materials in civil engineering*, 25 (2013) 10, pp. 1375–1385, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000661](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000661)
- [17] Tarokh, A., Fakhimi, A.: Discrete element simulation of the effect of particle size on the size of fracture process zone in quasi-brittle materials, *Computers and Geotechnics*, 62 (2014), pp. 51–60, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.07.002>

[18] Peng, Y., Wan, L., Sun, L.: Three-dimensional discrete element modelling of influence factors of indirect tensile strength of asphalt mixtures, *International Journal of Pavement Engineering*, 20 (2019) 6, pp. 724–733, <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1334459>

[19] Dan, H., Zhang, Z., Chen, J., Wang, H.: Numerical simulation of an indirect tensile test for asphalt mixtures using discrete element method software, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30 (2018) 5, 04018067, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002252](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002252)

[20] Gáspár, L., Bencze, Z.: Increasing the life expectancy of road pavements, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 6, pp. 515–522, <https://doi.org/10.14256/JCE.2644.2019>

[21] Itasca Consulting Group Inc. PFC, Version 5.0, Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2014 (1–2).



- PROJEKTIRANJE, STRUČNI NADZOR, KONTROLA PROJEKATA, UPRAVLJANJE PROJEKTIMA
- 30 GODINA ISKUSTVA
- 8 OVLAŠTENIH INŽENJERA
- 2 OVLAŠTENA VODITELJA PROJEKATA
- OVLAŠTENI REVIDENT ZA BETONSKE I ZIDANE KONSTRUKCIJE
- LICENCIJERANA SOFTVERSKA PODRŠKA



KOMPLETNI PROJEKTI GRAĐEVINA SVIH NAMJENA

- STAMBENI OBJEKTI
- POSLOVNE GRAĐEVINE
- ŠKOLE I VRTIĆI
- SPORTSKE DVORANE
- BOLNICE
- PROIZVODNE I GOSPODARSKE ZGRADE