Primljen / Received: 25.4.2018.
Ispravljen / Corrected: 3.10.2018.
Prihvaćen / Accepted: 15.3.2019.
Dostupno online / Available online: 10.9.2020.

Simulacija ponašanja procjednog betona pomoću metode diskretnih elemenata

Autori:

Ashfaque Ansari, dipl.ing.građ.
Državni institut za tehnologiju Visvesvaraya
Odjel za teoriju konstrukcija
Nagpur, Indija
a_ashfaq@rediffmail.com
Autor za korespodenciju

Prof.dr.sc. **Mukund M. Mahajan**, dipl.ing.građ.
Državni institut za tehnologiju Visvesvaraya
Odjel za teoriju konstrukcija
Nagpur, Indija
mmmahajan@apm.vnit.ac.in

Prethodno priopćenje

Ashfaque Ansari, Mukund M. Mahajan

Simulacija ponašanja procjednog betona pomoću metode diskretnih elemenata

Procjedni beton je posebna vrsta betona koji se od običnog betona razlikuje izrazitom poroznošću, zbog čega se ta vrsta diskretnog materijala ne može modelirati pomoću metode konačnih elemenata (FEM). U radu se simulira ponašanje uzoraka procjednog betona s različitim frakcijama agregata i koeficijentima pora, a za te se potrebe koristi računalni program Particle Flow Code (PFC) koji se temelji na metodi diskretnih elemenata (DEM). Pomoću programa PFC simuliraju se različiti eksperimentalni rezultati dobiveni na uzorcima procjednog betona s visokim udjelom cementne paste.

Ključne riječi:
procjedni beton, naprezanje-deformacija, metoda diskretnih elemenata, mehanizam protoka čestica

Research paper

Ashfaque Ansari, Mukund M. Mahajan

Performance based simulation of pervious concrete using discrete element method

Pervious concrete is a special type of concrete that differs from ordinary concrete by its highly porous nature, which is why this type of discrete material can not be modelled using the Finite Element Method (FEM). Behaviour of pervious concrete samples with different aggregate sizes and void ratios is simulated in the paper, using the Particle Flow Code (PFC) software, which is based on the discrete element method (DEM). The PFC software is used to simulate various experimental results obtained on high paste content pervious concrete samples.

Key words:
pervious concrete, stress-strain, discrete element method, particle flow code

Vorherige Mitteilung

Ashfaque Ansari, Mukund M. Mahajan

Simulation des Verhaltens von durchlässigem Beton mit der Diskrete Elemente Methode

Durchlässiger Beton ist eine spezielle Betonart, die sich von gewöhnlichem Beton durch ihre ausgeprägte Porosität unterscheidet, weshalb diese Art von diskretem Material nicht mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) modelliert werden kann. Die Arbeit simuliert das Verhalten von durchlässigen Betonproben mit unterschiedlichen Aggregatanteilen und Porenkoeffizienten und verwendet das Computerprogramm Particle Flow Code (PFC), das auf der Diskrete Elemente Methode (DEM) basiert. Mit dem PFC-Programm werden verschiedene experimentelle Ergebnisse simuliert, die an durchlässigen Betonproben mit einem hohen Gehalt an Zementpaste erhalten wurden.

Schlüsselwörter:
durchlässiger Beton, Spannungs-Dehnungs-Methode, Diskrete Elemente Methode, Partikeldurchflussmechanismus

1. Uvod

Procjedni beton je ekološki prihvatljiv materijal koji se odlikuje ne samo visokom čvrstoćom već i velikom poroznošću (15-25 %). Zbog tog posebnog svojstva sve češće se koristi u različitim područjima građevinarstva, a naročito u izradi kolnika i ekološki prihvatljivih građevina [1-3] U području cestogradnje, procjedni se beton smatra vrlo korisnim jer pospješuje ekološki povoljne procese kao što su smanjenje otjecanja oborinskih voda, prihranjivanje podzemnih voda, smanjenje temperature zraka, smanjenje površinskog otjecanja itd. [1-4]. Zbog tako povoljnih svojstava procjedni je beton sve popularniji u sektoru cestogradnje. Prisutnost spojnih pora u betonu omogućuje procjeđivanje vode pa se tako prihranjuju podzemne vode, a to je jedna od osnovnih odlika procjednog betona [4]. Utvrđeno je da je procjedni beton značajno sredstvo za ublažavanje utjecaja na okoliš do kojih dolazi zbog sve veće urbanizacije, te ga je stoga Američka agencija za zaštitu okoliša (eng. *Environmental Protection Agency* - EPA) odabrala kao jednog od najprikladnijih postupaka u domeni upravljanja okolišem [1].

Zbog izrazite poroznosti i ekoloških odlika, procjedni beton često nazivamo poroznim betonom ili betonom diskontinuiranog sastava [4]. Procjedni je beton na neki način suprotnost običnom betonu kod kojeg se poroznost treba svesti na najmanju moguću mjeru radi postizanja odgovarajućih karakteristika, iako se za ostvarivanje dobrih rezultata ipak treba zadržati određena minimalna razina poroznosti. U prethodnim je studijama utvrđeno da su poroznost i čvrstoća međusobno obrnuto proporcionalni te da se stoga treba odabrati savršena kombinacija čvrstoće i poroznosti kako bi se proizveo adekvatan procjedni beton. Na učinkovitost procjednog betona u velikoj mjeri utječu različiti faktori kao što su vodocementni omjer (w/c), veličina agregata, omjer agregata i cementa (A/C), način i stupanj nabijanja te primjena odgovarajućih dodataka [4-13].

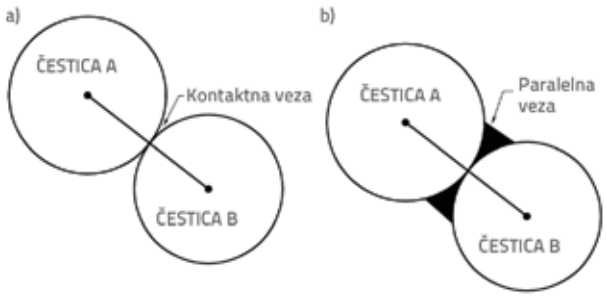
Procjedni se beton po ponašanju razlikuje od običnog beton upravo zbog prisutnosti brojnih malih vodopropusnih pora. Učinkovitost procjednog betona do sada je istražena u velikom broju studija u kojima su se koristile različite kombinacije vodocementnog faktora, omjera agregata i cementa, dodataka itd. [8-12]. Mnogi su istraživači analizirali varijacije naprezanja-deformacije primjenjujući različite veličine agregata te omjere agregata i cementa kako bi što prikladnije definirali ponašanje procjednog betona [13-16].

U ovom se radu simulira ponašanje procjednog betona određivanjem odnosa naprezanje-deformacija za različite vrste agregata i za različite udjele cementa. Ovaj rad nastavlja se na eksperimentalno istraživanje uzoraka procjednog betona koje su proveli Deo i Narayanan [14] i u njemu se koristi računalni program Particle Flow Code (PFC) utemeljen na metodi diskretnih elemenata (DEM). U ovom se radu pomoću programa PFC simuliraju dijagrami naprezanja-deformacije za različite vrste uzoraka procjednog betona. Postignuti rezultati pokazuju učinkovitost programa PFC u različitim analizama uzoraka, te se stoga PFC može koristiti kao djelotvorno sredstvo u budućim analizama ponašanja.

2. Metoda diskretnih elemenata

Metoda diskretnih elemenata bazira se na analizi čestica, a razvijena je u svrhu simuliranja mikromehaničkog ponašanja nekoherentnih medija kao što su pijesak i tlo. Čestice se statički modeliraju pomoću krutih kugli (trodimenzionalno) ili diskova (dvodimenzionalno) različitih promjera. Krute kugle ili diskovi spajaju se jedni s drugima u kontaktnim točkama, a tim se kontaktima dodjeljuju vrijednosti krutosti (normalne i posmične) i koeficijenta trenja. Komercijalno dostupan program PFC temelji se na metodi DEM, a predstavlja proširenje programa na bazi čestica BALL i TRUBAL koje predlažu Cundall i Strack [17]. Tim se programima može simulirati ponašanje čvrste stijene pomoću kohezijske veze u kontaktnim točkama. Korišteni model zove se model povezanih čestica (BPM) za čvrstu stijenu. BPM-om se može simulirati prekid veza te tako procijeniti prostiranje i lomovi pukotina.

U modelu PFC koriste se dvije vrste veza: kontaktne veze i paralelne veze (slika 1.) [18]. U kontaktnoj se vezi koristi elastična opruga konstantne normalne (Kn) i posmične krutosti (Ks) koja može prenositi sile samo na kontaktnim točkama, dok s druge strane model paralelne veze pruža otpor rotaciji čestica pomoću niza elastičnih opruga u kontaktnoj ravnini. Paralelna veza pruža otpor momentu koji se javlja tijekom rotacije čestica; taj se otpor ostvaruje kroz seriju elastičnih opruga ravnomjerno raspoređenih po malom presjeku u ravnini kontakta [19]. Tim modelima veza može se oponašati mehaničko djelovanje vezanih materijala poput cementa u zoni između susjednih čestica.



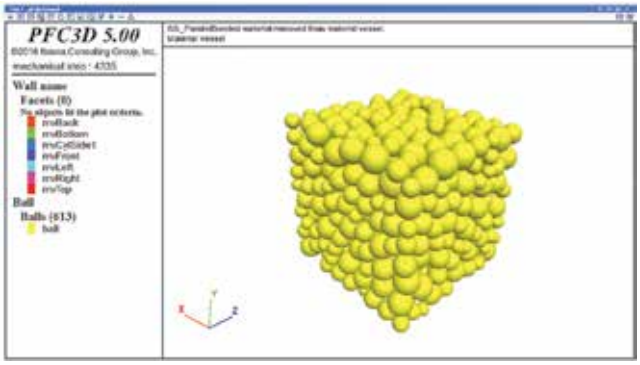
Slika 1. Kontaktna veza / paralelna veza

Procjedni se beton sastoji od zrnatog materijala tako strukturiranog da različite komponente nisu međusobno povezane na razini materijala [6]. Smatra se da je metoda DEM jedna od najprikladnijih za modeliranje te vrste materijala [20, 21]. Program PFC baziran na metodi DEM koristi se za simuliranje naponsko-deformacijskog ponašanja procjednog betona s različitim veličinama agregata i s različitim udjelima cement pod djelovanjem jednoosnog tlačnog opterećenja. Svojstvo naprezanja-deformacije različitih uzorka iskazano je pomoću dijagrama te je provedena usporedba s eksperimentalnim podacima naprezanje-deformacija dobivenim eksperimentalnim putem na uzorcima procjednog betona.

3. Model PFC

Kako je osnovni cilj ovog rada simulacija stanja naprezanja-deformacije procjednog betona pomoću programa PFC, potrebno je generirati istu veličinu agregata i svojstvo veze između čestica. Stanje naprezanja-deformacije betona najviše ovisi o klasi betona, a ona opet ovisi o veličini agregata, obliku agregata, granulometriji agregata, vodocementnom faktoru i omjeru agregata i cementa. Dakle, za modeliranje uzoraka procjednog betona usvojen je postupak u dva koraka:
- fizikalno modeliranje, i
- modeliranje učinkovitosti.

Fizikalno modeliranje odnosi se na modeliranje fizikalnih komponenata mješavine procjednog betona, a modeliranje učinkovitosti odnosi se na modeliranje svojstava koja utječu na učinkovitost mješavine procjednog betona.
Različite vrste mješavina i njihovih svojstava modelirane su u programu PFC pomoću skupine *Fish Tank* koja služi za modeliranje i testiranje različitih vrsta materijala. *Fish Tank* je skupina programa sadržanih u računalnom programu PFC a svrha im je pojednostavljivanje postupka modeliranja [18]. Skupina *Fish Tank* sadrži i različite vrste postupaka za ispitivanja materijala.



Slika 2. PFC-ov model kocke procjednog betona

Kocke izvađene iz različitih mješavina procjednog betona (slika 2.) u ovom se istraživanju modeliraju pomoću sustava *Fish Tank*; agregati se modeliraju prema stvarnoj veličini i granulometriji te se ispituje njihova jednoosna tlačna čvrstoća. Zatim se generiraju dijagrami naprezanja-deformacije.

4. Generiranje materijala

Uzorci procjednog betona generiraju se u programu PFC prema svojstvu materijala i koeficijentu pora. Svim se materijalima pripisuju različiti parametri ovisno o granulometriji agregata i svojstvima cementne paste. Deo i Narayanan [14] proveli su skupinu eksperimenata u kojima su koristili različite vrste agregata, udjele cementa i koeficijente pora. Na temelju njihovih eksperimentalnih istraživanja, pripremljeni su odgovarajući modeli PFC pomoću paralelnih veza, te su uspoređeni dobiveni rezultati. Kao što je navedeno, modeliranje je provedeno u dva koraka pomoću programa PFC.

4.1. Fizikalno modeliranje

U poglavlju koje slijedi opisuju se osnovne značajke fizikalnog modeliranja.

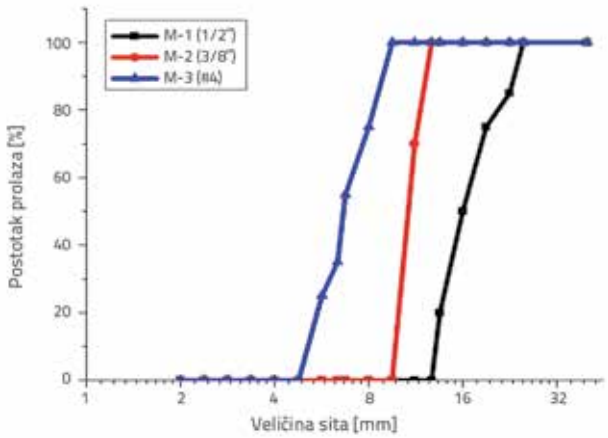
4.1.1. Veličina i granulometrijski sastav agregata

Beton je modeliran pomoću velikog broja sfernih diskretnih elemenata. Promjeri tih elemenata baziraju se na stvarnim veličinama agregata i njihovim granulometrijama prema stvarno zabilježenim vrijednostima. Promjer i granulometrija agregata modelirani su u odnosu na podatke o veličini i granulometriji stvarnog materijala. U modelima PFC korištene su tri različite veličine agregata:
a) M-1: 12,5 mm (1/2"),
b) M-2: 9,5 mm (3/8"),
c) M-3: 4,75 mm (#4).

Tablica 1. Veličina agregata i koeficijent pora

Oznaka uzorka	Mješavina	Veličina agregata		Sitnozrnati agregat	Koeficijent pora (Ø)
		Prolazi [mm]	Zadržano na situ [mm]		
M-1-1	M-1 12,5 mm (1/2")	25	12,5	0	0,19
M-1-2					0,22
M-1-3					0,27
M-2-1	M-2 9,5 mm (3,8")	12,5	9,5	0	0,19
M-2-2					0,22
M-2-3					0,27
M-3-1	M-3 4,75 mm (#4)	9,5	4,75	0	0,19
M-3-2					0,22
M-3-3					0,27

Granulometrijska krivulja agregata prikazana je na slici 3. U ovom se radu ne analiziraju sitnozrnati agregati.



Slika 3. Granulometrijska krivulja agregata

Frakcije agregata i koeficijenti pora za tri vrste mješavina prikazani su na slici 1. Svih devet modela generirano je na temelju stvarnih podataka o granulometriji i koeficijentu pora. Ukupno devet modela je generirano i modelirano u PFC-u. Rezultati su uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima.

4.1.2. Koeficijent pora

Koeficijent pora može se uključiti u model PFC. Korišten je modificirani koeficijent pora kako bi se u obzir uzeo utjecaj cementne paste. U PFC-u se utjecaj virtualnog modela cementne paste izravno pridružuje svojstvima paralelne veze; drugim riječima, cementna se pasta ne modelira zasebno. S obzirom na činjenicu da cementna pasta nije modelirana zasebno, u model PFC uključen je utjecaj koeficijenta pora. Program PFC izračunava koeficijent pora na temelju granulometrije (vidi izraz (7)). Ovdje se predlaže vrijednost modificiranog koeficijenta pora kako bi se uzeo u obzir utjecaj cementne paste u matrici procjednog betona. Modificirana vrijednost koeficijenta pora zadaje se u modelu PFC na temelju stvarnog koeficijenta pora. Modificirana vrijednost koeficijenta pora prikazana je u izrazu (9). Osnovni izraz za koeficijent pora glasi:

$$Ø = Vv/V \quad (1)$$

$$Vv = V - (Va + Vp) \quad (2)$$

Obujam cementne paste je:

$$Vp = Vc + Vw \quad (3)$$

gdje je Vw obujam vode koji se može zanemariti jer se radi o izuzetno niskoj vrijednosti.

Stoga se izraz (3) može ponovo iskazati kako slijedi:

$$Vp = Vc \quad (4)$$

Omjer agregata i cementa iskazuje se kao:

$$A/C = Va / Vc$$

$$Vv = V - (Va + Vc) \quad (5)$$

Iz izraza (1) i (2) slijedi:

$$Ø = (V - (Va + Vc)) / V$$

Preraspodjelom članova dobivamo:

$$Ø = 1 - (Va (1 + C/A)) / V \quad (6)$$

U PFC-u se samo agregat nalazi u mješavini, pa stoga imamo:

$$Vv (PFC) = V - Va \quad (7)$$

Prema izrazu (6), obujam cementne paste nije uključen u proračun koeficijenta pora u PFC-u, iz čega proizlazi:

$$Ø (PFC) = (V - Va)/V = 1 - Va/V \quad (8)$$

Iz toga dobivamo:

$$Va/V = Ø (PFC) + 1$$

Na temelju izraza (6) izvodi se sljedeće:

$$Ø (PFC) = 1 - [(Ø (PFC) + 1) \cdot (1 + C/A)]$$

Stoga imamo:

$$Ø (PFC) = 1 - [(1 - Ø) / (1 + C/A)] \quad (9)$$

gdje je:
Ø - koeficijent pora,
Vv - obujam pora,
Va - obujam agregata,
Vc - obujam cementa,
A/C - omjer agregata i cementa,
C/A - omjer cementa i agregata i
V - ukupni obujam uzorka / posude.

U izrazu (9) prikazan je odnos između stvarnog koeficijenta pora i vrijednosti dobivene programom PFC. Prema odnosu iz izraza (9) izračunan je koeficijent pora (tablica 2.) te je ta vrijednost unesena u odgovarajuće modele PFC.

Tablica 2. Omjer cementa i agregata (C/A) i korigirani koeficijent pora

Oznaka uzorka	Mješavina	Omjer C/A	Koeficijent pora (Ø)	Korigirani koeficijent pora Ø prema PFC-u
M-1-1	M-1 12,5 mm (1/2")	0,40	0,19	0,42
M-1-2		0,36	0,22	0,43
M-1-3		0,31	0,27	0,44
M-2-1	M-2 9,5 mm (3,8")	0,42	0,19	0,43
M-2-2		0,37	0,22	0,43
M-2-3		0,30	0,27	0,44
M-3-1	M-3 4,75 mm (#4)	0,45	0,19	0,44
M-3-2		0,38	0,22	0,44
M-3-3		0,32	0,27	0,45

4.2. Modeliranje učinkovitosti

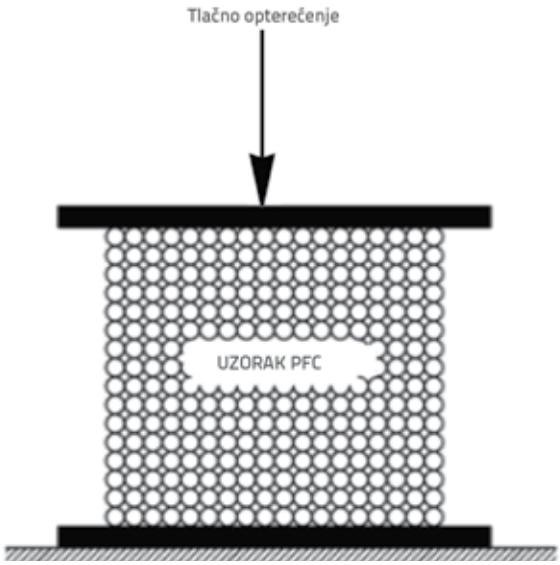
U programu PFC učinkovitost se može modelirati odgovarajućim odabirom kontrolnih parametara koji su odgovorni za ponašanje procjednog betona, a u konačnici se temelje na unutarnjim svojstvima cementne paste i njenom ponašanju [18]. Učinkovitost procjednog betona najviše ovisi o svojstvima cementne paste, koja opet utječe na njegovo ponašanje. Dakle, prikladno zadavanje parametara značajno je za modeliranje djelovanja cementne paste. Parametri paralelne veze odabrani su na temelju stvarnih svojstava materijala. Modelima su zadani sljedeći parametri:
- modul kompresije,
- koeficijent trenja.

Svojstva veze između cementa i agregata modelirana su u PFC-u pomoću paralelne veze, a za to su korišteni sljedeći parametri:
- srednja vrijednost normalne čvrstoće,
- standardno odstupanje normalne čvrstoće,
- srednja vrijednost posmične čvrstoće,
- standardno odstupanje posmične čvrstoće i
- koeficijent krutosti paralelnih veza.

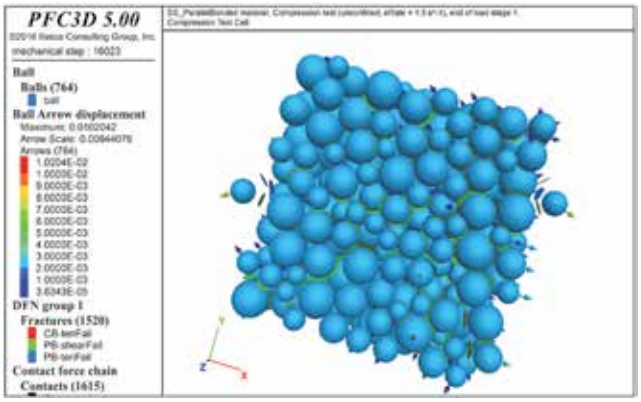
Programi *Fish - Tank* modificirani su prema svojstvima materijala, vodocementnom faktoru, omjeru agregata i cementa, te prema drugim svojstvima materijala.

5. Ispitivanje materijala

Materijali se mogu ispitati u PFC-u pomoću unaprijed definiranog programa *Fish - Tank* koji omogućuje vlačno i tlačno ispitivanje materijala (sa spriječenim i slobodnim bočnim širenjem). Moguće je i generiranje različitih dijagrama ovisno o zahtjevima korisnika (naprezanje-deformacija, opterećenje-progib itd.). Brzina deformacije kontrolirana je posebnom funkcijom programa PFC koja se zove servouređaj. Taj servouređaj kontrolira brzinu pomaka stijene kako bi se održalo naprezanje zadano u PFC-u [18].
Svi modeli generirani u PFC-u (slika 4.) ispitani su na opterećenje sa slobodnim bočnim širenjem pri konstantnoj deformaciji od 0,15, a zatim su generirani dijagrami naprezanja-deformacije. Modelima su zadane kontrolirane brzine deformacije pomoću spomenutog servomehanizma. Na slici 4. daje se prikaz modela generiranog u PFC-u i ispitanog na tlačno opterećenje pri uvjetima slobodnog bočnog širenja. Kako opterećenje u modelu raste, tako i popušta veza između čestica (slika 5.) što dovodi do pojave pukotina u uzorku te u konačnici i do popuštanja uzorka.



Slika 4. Ispitivanje uzorka



Slika 5. Popuštanje veza

6. Rezultati i rasprava

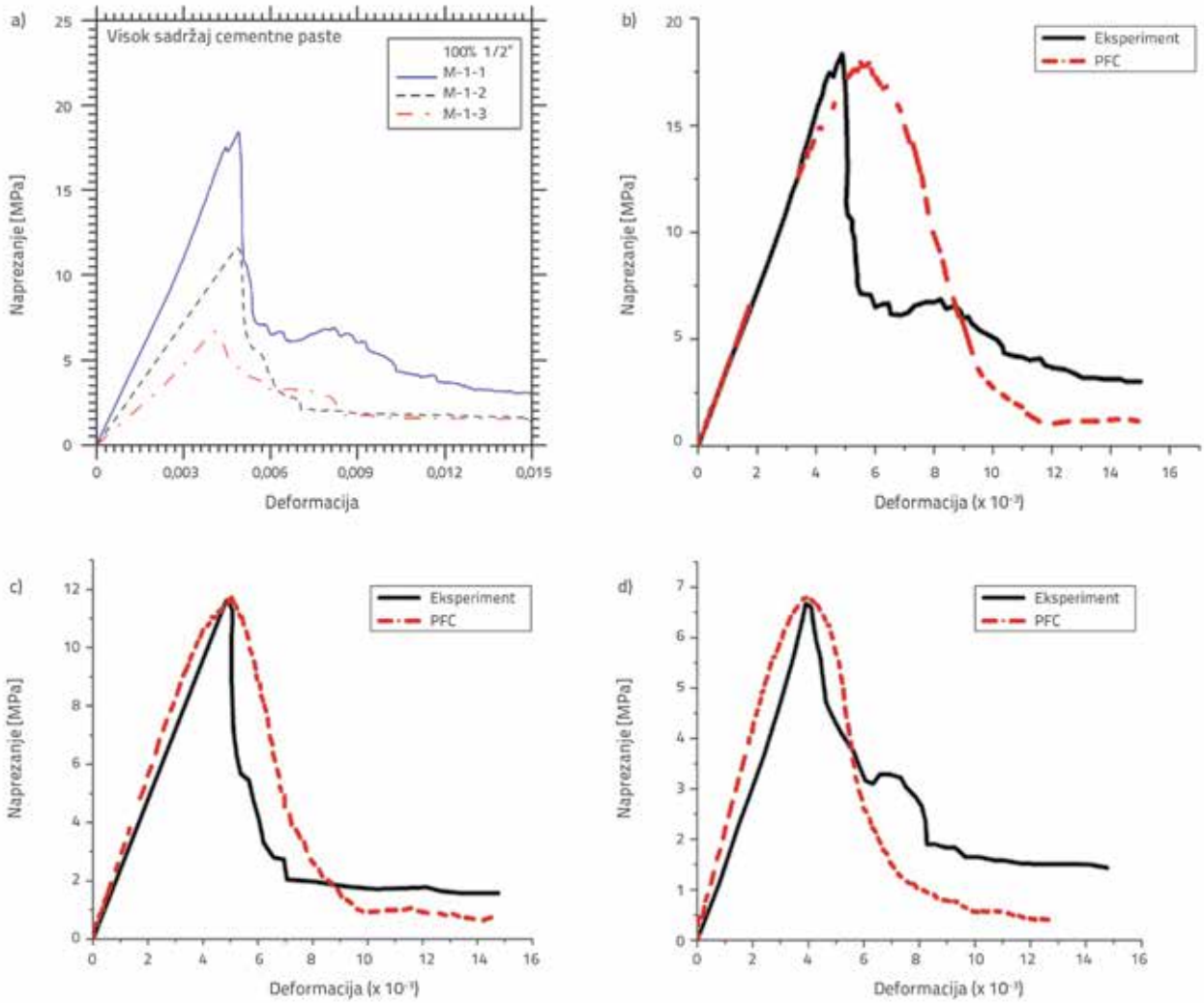
Provedena je simulacija stanja naprezanja-deformacije kako bi se usporedilo mehaničko ponašanje virtualnih modela PFC s eksperimentalnim rezultatima. Generirane su tri različite vrste mješavina procjednog betona s frakcijama agregata. Svaka je mješavina modelirana s tri koeficijenta pora, a generirano je ukupno devet modela. Parametri modela korigirani su na temelju granulometrije agregata i koeficijenta pora. Rezultati virtualnog modela PFC i odgovarajući eksperimentalni rezultati provjereni su kako su to opisali Deo i Narayanan [14].

6.1. Simulacija vršnog naprezanja pri jednoosnom tlačenju

Iz tablice 3. može se vidjeti da svih devet modela vjerno odražava vrijednosti vršnog naprezanja i deformacije pri vršnom naprezanju. Maksimalni postotak pogreške pri vršnom naprezanju iznosio je 13,85 % u uzorku M-2-1, dok je u usporedbi s eksperimentalnim rezultatima prosječni postotak pogreške kod modela PFC iznosio 0,79 %, 9,5 % i 3,78 % u uzorcima M-1 do M-3. Isto tako su i vrijednosti deformacije pri vršnim naprezanjima bile kod svih uzoraka bliske eksperimentalnim vrijednostima. Maksimalni postotak greške iznosio je 15,8 % kod uzorka M-3-2, a u mješavinama M-1, M-2 i M-3 zabilježen prosječni je postotak greške od 3,33 %, 5 % i 10,34 %.

6.2. Stanje naprezanja-deformacije pri jednoosnom tlačenju

Modeli PFC podvrgnuti su jednoosnom tlačnom opterećenju sa slobodnim bočnim širenjem, nakon čega su generirani dijagrami naprezanje-deformacija. Može se vidjeti da odziv uzorka M-1-1 (slika 6.a) u početnom stadiju prije nanošenja vršnog naprezanja odgovara odzivu postignutom eksperimentalnim putem ali, nakon vršnog naprezanja, stanje naprezanje-deformacija razlikuje se od eksperimentalno definiranog stanja. Tome je možda razlog popuštanje veza u modelu PFC i parametara pripisanih modelu. Slični se trendovi bilježe i u uzorcima M-1-2 i M-1-3 (slike 6.b, 6.c).

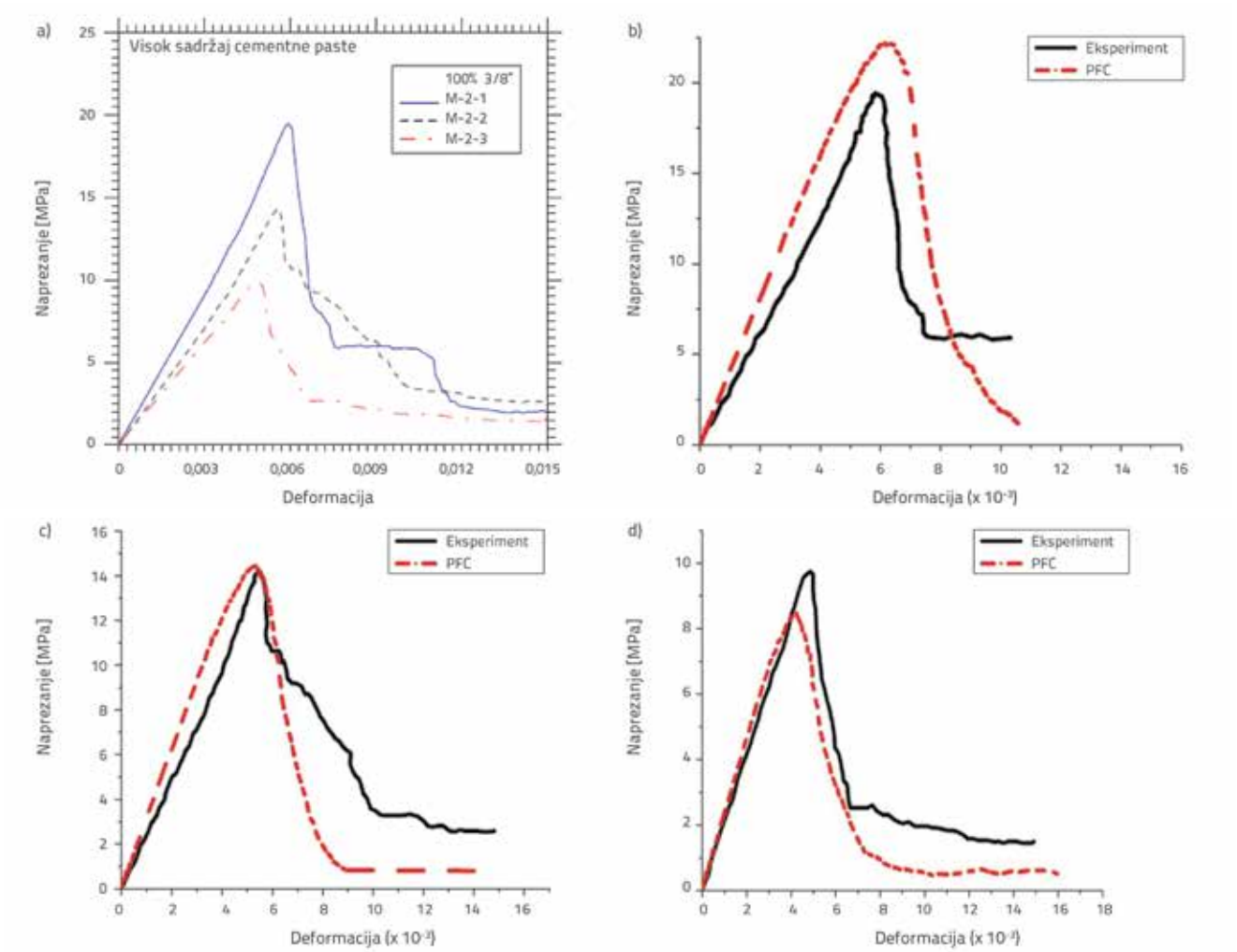


Slika 6. Eksperimentalni i PFC dijagrami za mješavinu M-1: a) Eksperimentalni dijagram za mješavinu M-1, prema [14]; b) Eksperimentalna i PFC krivulja naprezanja-deformacije za M-1-1; c) Eksperimentalna i PFC krivulja naprezanja-deformacije za M-1-2; d) Eksperimentalna i PFC krivulja naprezanja-deformacije za M-1-3

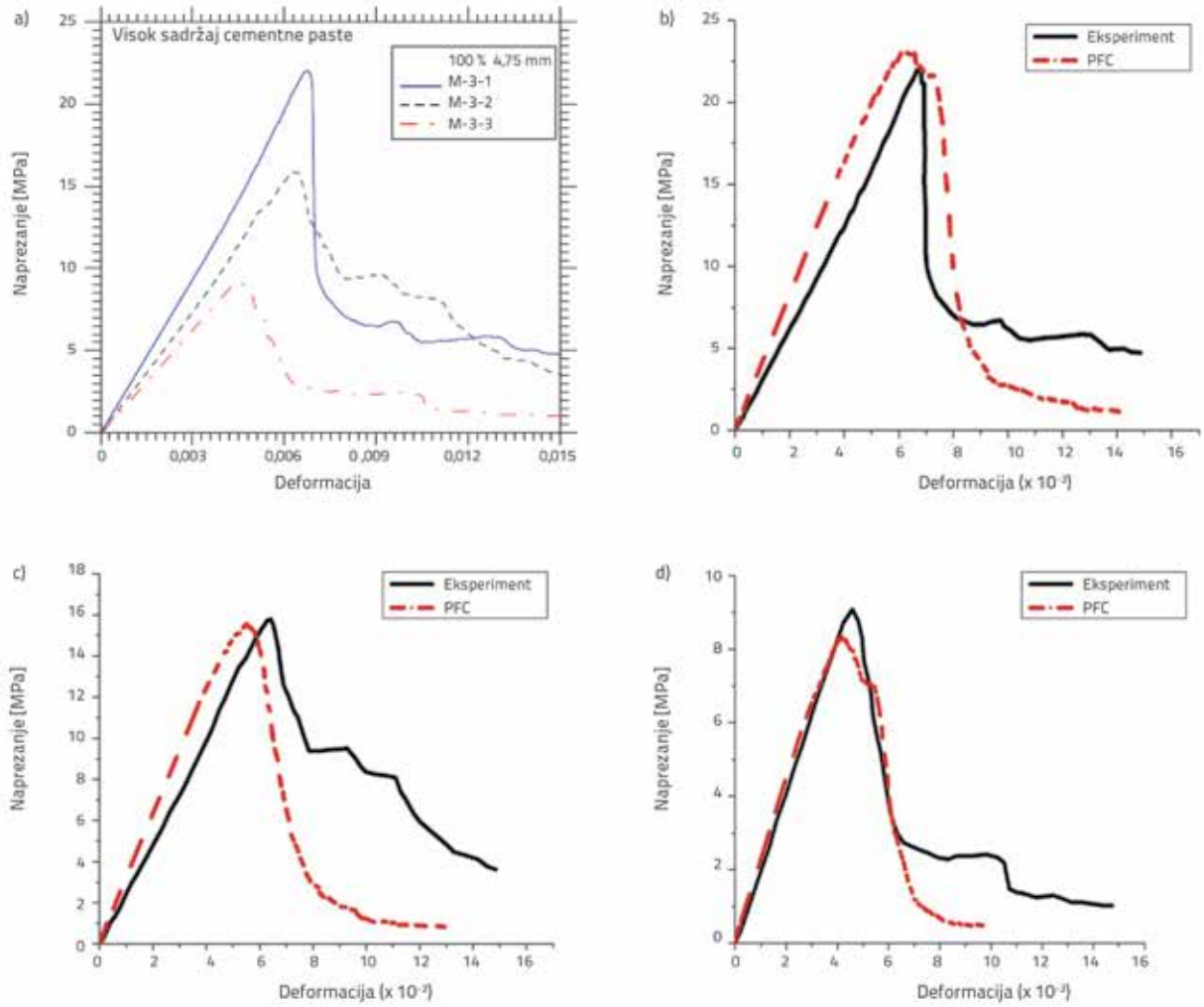
Tablica 3. Eksperimentalne i PFC vrijednosti deformacije pri vršnom naprezanju

Oznaka uzorka	Mješavina	Postignuto vršno naprezanje [MPa]		Greška [%]	Prosječna greška [%]	Deformacija pri vršnom naprezanju (x 10^{-4})		Greška [%]	Prosječna greška [%]
		Eksperiment	PFC			Eksperiment	PFC		
M-1-1	M-1	18	18	0	0,79	50	55	10	3,33
M-1-2		11,6	11,7	0,86		50	50	0	
M-1-3		6,7	6,8	1,5		40	40	0	
M-2-1	M-2	19,5	22,2	13,85	9,5	60	63	5	5
M-2-2		14,3	14,5	1,4		55	55	0	
M-2-3		9,8	8,5	13,27		50	45	10	
M-3-1	M-3	22	23	4,54	3,78	66	63	4,54	10,34
M-3-2		15,8	15,6	1,26		65	55	15,38	
M-3-3		9	8,5	5,55		45	40	11,11	

Iz dijagrama naprezanja-deformacije za mješavinu M-2 (slika 7.) može se zaključiti da je ponašanje PFC-a slično ponašanju zabilježenom eksperimentalnim putem. Međutim, mala se varijacija ipak bilježi u uzorku M-2-1, čemu je vjerojatno razlog pripisano svojstvo paralelne veze i veličina agregata.



Slika 7. Eksperimentalni i PFC dijagrami za mješavinu M-2: a) Eksperimentalni dijagram za mješavinu M-2, prema [14]; b) Eksperimentalna i PFC krivulja naprezanja-deformacije za M-2-1; c) Eksperimentalna i PFC krivulja naprezanja-deformacije za M-2-2; d) Eksperimentalna i PFC krivulja naprezanja-deformacije za M-2-3



Slika 8. Eksperimentalni i PFC dijagrami za mješavinu M-3: a) Eksperimentalni dijagram za mješavinu M-3, prema [14]; b) Eksperimentalna i PFC krivulja naprezanja-deformacije za M-3-1; c) Eksperimentalna i PFC krivulja naprezanja-deformacije za M-3-2; d) Eksperimentalna i PFC krivulja naprezanja-deformacije za M-3-3

Uočeno je da se nakon vršnog naprezanja učinak naprezanja-deformacija kod mješavine M-3 (slika 8.) razlikuje od učinka dobivenog eksperimentalnim putem. Dijagram za uzorak M-3-1 pokazuje nešto više vrijednosti od dijagrama za eksperimentalno stanje (slika 8.a). Odzivi uzoraka M-3-2 i M-3-3 gotovo se u potpunosti podudaraju s onima iz eksperimentalnog dijagrama. Detaljnija analiza pokazuje da se nakon vršnog naprezanja vrijednosti deformacije ne podudaraju s eksperimentalnim odzivom. Tome bi mogao biti razlog pucanje paralelnih veza u modelu PFC.

7. Zaključak

Na temelju gore izloženih rezultata može se zaključiti da je metoda diskretnih elemenata djelotvorno sredstvo za određivanje učinkovitosti diskretnih vrsta materijala kao što je primjerice procjedni beton. Nakon prikladnog postavljanja parametara, opisani model omogućuje postizanje rezultata koji su vrlo bliski rezultatima ostvarenima eksperimentalnim putem u laboratoriju.

Također se može zaključiti da se vrijednosti maksimalne tlačne čvrstoće te odziv naprezanja-deformacije procjednog betona mogu prilično točno reproducirati pomoću programa PFC koji se bazira na metodi diskretnih elemenata. Statistički relevantni rezultati mogu se postići i bez laboratorijskih ispitivanja, što može pridonijeti boljemu razumijevanju ponašanja materijala. Rezultati postignuti u ovom radu pokazuju da se virtualnim modelom programa PFC mogu ostvariti dobri rezultati, usporedivi s rezultatima stvarnih ispitivanja. Stoga se može zaključiti da ti rezultati omogućuju bolje razumijevanje materijala.

LITERATURA

[1] ACI, Report on Pervious Concrete, MI: American Concrete Institute, 2010.

[2] NMRCA-Concrete in Practice-38 (CIP-38): National Ready Mix Concrete Association (NMRCA).

[3] Haselbach, L.M., Valavala, S., Montes, F.: Permeability predictions for sandclogged Portland cement pervious concrete pavement systems, J. Environ. Manage. (Elsevier), 81 (2005), pp. 42-49.

[4] Tennis, P.D., Leming, M.L., Akers, D.J.: Pervious concrete pavements, Skokie, Illinois & Silver Spring, Maryland, Portland Cement Association & National Readymixed Concrete Association, 2004.

[5] Gafoori, N., Shivaji D.: Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials, Journal of Materials in Civil Engineering, 7 (1995) 3, pp.183-191.

[6] McCain, G.N., Dewoolkar, M.M.: Strength and permeability characteristics of porous concrete pavements, Transp. Res. Board, pp. 1-13, 2009.

[7] Kevern, J.T., Wang, K., Schaefer, V.R. : Effect of coarse aggregate on the freeze- thaw durability of pervious concrete, J. Mater. Civ. Eng., 22 (2010) 5, pp. 469-475.

[8] Jain, A.K., Chouhan, J.S.: Effect of shape of aggregate on compressive strength and permeability properties of pervious concrete, Int. J. Adv. Eng. Res. Stud., 1 (2011), pp. 120-126.

[9] Chindaprasrit, P., Hatanaka, S., Chareerat, T., Mishima, N., Yuasa, Y.: Cement paste characteristics and porous concrete properties, Construction and Building Materials, 22 (2008), pp. 894-901.

[10] Huang, B., Xiang, S., Hao, W., Burdette, E.G.: Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete, Construction and Building Materials, 24 (2010), pp. 818-823.

[11] Ibrahim, A., Enad M., Mohammed, Y., Chowdary, V.: Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties, Construction and Building Materials, 50 (2014), pp. 524-529.

[12] Yahia, A., Daddy, K.K.: New approach to proportion pervious concrete, Construction and Building Materials, pp. 38-46, 2014.

[13] Yang, J., Jiang, G.: Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials, Cement and Concrete Research, 33 (2003), pp. 381-386.

[14] Deo, O., Narayanan, N.: Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. Construction and Building Materials, 25 (2011), pp. 4181-4189.

[15] Yu, C., Wang, K., Liang, D.: Mechanical properties of pervious cement concrete, Cent. South Univ. (Springer), 19 (2013), pp. 3329–3334.

[16] Neithalath, N., Sumanasooriya, M.S., Deo, O.: Characterizing pore volume, sizes, and connectivity inpervious concretes for permeability prediction, Materials Characterization, 61 (2010), pp. 802-813.

[17] Cundall, P.A., Strack, O.D.L.: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, 29 (1979), pp. 47-65.

[18] Itasca, Consulting, Group, Inc., PFC manual, 2008.

[19] Potyondya, D.O., Cundall P.A.: Abonded-particle model for rock, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41 (2004), pp. 1329-1364.

[20] Lian, C., Zhuge, Y., Beechan. S.: Numerical simulation of the mechanical behaviour of porous concrete, International journal for computer aided engineering and software, 28 (2011) 8, pp. 984-1002.

[21] Lian, C., Zhuge, Y., Beechan, S.: Modelling pervious concrete under compression loading - A discrete element approach, Advanced materials research, 168-170 (2011), pp. 1590-1600.