

Primljen / Received: 29.5.2016.

Ispravljen / Corrected: 27.9.2016.

Prihvaćen / Accepted: 24.2.2017.

Dostupno online / Available online: 10.2.2018.

# Odgovor pijeska ojačanog polimernim vlaknima na dinamičko opterećenje

## Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Kenan Hazirbaba**, dipl.ing.građ.  
Američko sveučilište Ras Al Khaimah  
Odjel za građevinarstvo i infrastrukturu  
[kenan.hazirbaba@aurak.ac.ae](mailto:kenan.hazirbaba@aurak.ac.ae)



Mr.sc. **Maksat Omarow**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Aljasci, USA  
Odjel za građevinarstvo i okolišno inženjerstvo  
[maksatomar@gmail.com](mailto:maksatomar@gmail.com)

Prethodno priopćenje

**Kenan Hazirbaba, Maksat Omarow**

## Odgovor pijeska ojačanog polimernim vlaknima na dinamičko opterećenje

U radu je ispitan odgovor pijeska ojačanog polimernim vlaknima na dinamičko opterećenje s aspekta generiranja dodatnog pornog tlaka i ponovne konsolidacije uslijed cikličnog opterećenja. Provedena su nedrenirana troosna ispitivanja s kontroliranom deformacijom na saturiranim pješćanim uzorcima pripremljenima s različitim udjelom polimernih vlakana. Vrpčasta vlakna i fibrilirana polipropilenska vlakna korištena su s Ottawa pijeskom (C-109) s 0,2 %, 0,5 % i 1 % udjela vlakana u suhoj masi tla. Ustanovljeno je da su vrpčasta vlakna učinkovitija od fibriliranih vlakana u smanjenju dodatnog pornog tlaka.

### Ključne riječi:

pijesak ojačan polimernim vlaknima, dodatni porni tlak, ciklično opterećenje, likvefakcija, volumna deformacija

Scientific Research Paper

**Kenan Hazirbaba, Maksat Omarow**

## Excess pore pressure generation and post-cyclic loading settlement of geofiber-reinforced sand

The response of geofiber-reinforced sand to dynamic loading is investigated in this paper in terms of excess pore pressure generation and post-cyclic load reconsolidation. Strain-controlled, undrained triaxial tests were performed on saturated sand specimens prepared with varying geofibre content. Tape type and fibrillated type polypropylene geofibre were used with Ottawa (C-109) sand at 0.2%, 0.5%, and 1% dosages by dry weight of soil. The tape type geofibre was found to be more effective than the fibrillated type in reducing the excess pore pressure. Both the type and content of geofibre were found to influence the post-loading settlement.

### Key words:

geofiber-reinforced sand, excess pore pressure, cyclic loading, liquefaction, volumetric strain

Vorherige Mitteilung

**Kenan Hazirbaba, Maksat Omarow**

## Reaktion des sandes mit polymerverstärkten Fasern auf dynamische belastung

In der Abhandlung wurde die Reaktion des Sandes mit polymerverstärkten Fasern auf dynamische Belastung unter dem Gesichtspunkt der Erzeugung zusätzlichen Porenwasserdrucks und der erneuten Konsolidierung aufgrund einer zyklischen Belastung untersucht. Durchgeführt wurden nicht drainierte dreiachsige Untersuchungen mit kontrollierter Verformung auf saturierten Sandproben, die mit verschiedenen Anteilen an Polymerfasern vorbereitet wurden. Die Bandfasern und fibrillierten Polypropylenfasern wurden mit Ottawa-Sand (C-109) mit einem 0,2%, 0,5% und 1% Fasergehalt in trockener Bodenmasse verwendet. Es wurde festgestellt, dass die Bandfasern bei der Verringerung des zusätzlichen Porenwasserdrucks wirksamer sind, als die fibrillierten Fasern.

### Schlüsselwörter:

polymerfaserverstärkter Sand, zusätzlicher Porenwasserdruck, zyklische Belastung, Verflüssigung, Volumenverformung

## 1. Uvod

Ojačanje tla s nasumično raspodijeljenim polimernim vlaknima postalo je uobičajeno za različite geotehničke i geokološke projekte, kao što su potporne konstrukcije, nasipi i pokosi, uključujući strme pokose na odlagalištima otpada, stabilizacija podloge prometnica, uglavnom zbog svoje učinkovitosti i jednostavne izvedivosti. Mnoga su istraživanja pokazala povećanje ukupne čvrstoće tala pomiješanih s polimernim vlaknima pod statičkim uvjetima opterećenja [1-7]. Međutim, mali broj istraživanja se usredotočio na dinamički odgovor pijeska ojačanog polimernim vlaknima. Noorany i Uzdevines [8] provodili su ciklične troosne pokuse s kontroliranim naprezanjem na saturiranim uzorcima pijeska ojačanog polimernim vlaknima kao i na neojačanim uzorcima pijeska te se pokazalo da je ciklična otpornost ojačanih uzoraka veća od otpornosti neojačanih uzoraka. Maher i Woods [9] izvijestili su da se dinamički posmični modul i kapacitet prigušenja pijeska poboljšavaju s uključivanjem polimernih vlakana. Ovo istraživanje usredotočeno je na generiranje i disipaciju dodatnog pornog tlaka u pijesku ojačanom polimernim vlaknima. Naime, istražuju se dva aspekta:

- može li primjena vlakana ograničiti nastajanje dodatnog pornog tlaka
- utječe li ojačanje na slijeganje nakon nametanja cikličnog opterećenja, uslijed disipacije pornog tlaka.

Generiranje dodatnog pornog tlaka kontrolirano je uglavnom razinom induciranih posmičnih deformacija [10]. Stoga su se eksperimentalna ispitivanja sastojala od niza cikličnih nedreniranih troosnih ispitivanja s kontroliranom deformacijom, na čistim uzorcima pijeska i uzorcima pijeska ojačanim vlaknima.

## 2. Eksperimentalni program

### 2.1. Materijali

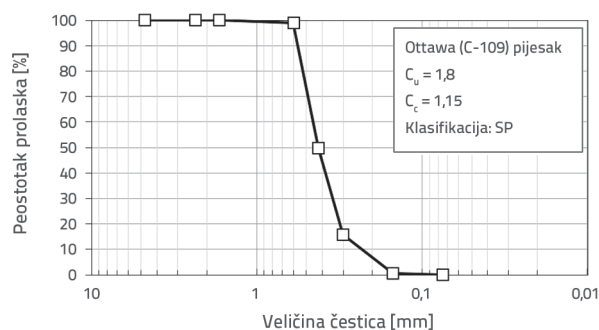
Tlo ispitano u ovom istraživanju je komercijalno proizveden čisti pijesak, poznat kao Ottawa pijesak (C-109). Osnovna svojstva tla prikazana su u tablici 1., a granulometrijski sastav prikazan na slici 1. Ispitivane su dvije vrste polipropilenskih vlakana duljine 51 mm:

- fibrilirani tip,
- vrpčasti tip (slika 2.).

Polipropilenska polimerna vlakna su izabrana zbog svoje dostupnosti, otpornosti na propadanje pod ultraljubičastim svjetlom, kemijske stabilnosti i visoke čvrstoće [7]. Osnovna svojstva korištenih vlakana su navedena u tablici 2. Udjeli vlakana korišteni u istraživanju su: 0,0 % (neojačani čisti pijesak), 0,2 %, 0,5 % i 1,0 % suhe mase uzorka tla. Udio je u ovom istraživanju bio ograničen na 1,0 % zbog većeg troška vlakana pri većim udjelima. Osnovna svojstva smjese pijeska i vlakana su prikazana u tablici 3.

Tablica 1. Svojstva čistog Ottawa pijeska

Ottawa pijesak (C-109)	
Specifična težina	2,66
Najveći koeficijent pora	0,78
Najmanji koeficijent pora	0,48
$D_{10}$ [mm]	0,25
$D_{30}$ [mm]	0,36
$D_{60}$ [mm]	0,45
$C_u$	1,8
$C_c$	1,15
USCS klasifikacija tla	SP



Slika 1. Granulometrijska krivulja pijeska korištenog u istraživanju



Slika 2. Fotografija polimernih vlakana korištenih u istraživanju

Tablica 2. Svojstva polimernih vlakana (isporučuje proizvođač)

Svojstvo	Vrijednost
Polipropilen	99,40 %
Apsorpcija vlage	0,0
Duljina vlakna	5,08 cm
Boja	Crna
Specifična težina	0,91 g/cm <sup>3</sup>
Udio ugljika	0,60 %
Vlačna čvrstoća	310 MPa
Vlačna elongacija	15 %
Youngov modul	4800 MPa

Tablica 3. Svojstva smjese pijesak – polimerna vlakna

Vrsta vlakna Udio vlakana, $f$ [%]	Vrpčasta			Fibrilirana		
	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
Specifična težina, $G_s$	2,65	2,64	2,61	2,65	2,64	2,61
Najmanji koeficijent pora, $e_{min}$	0,54	0,55	0,53	0,53	0,54	0,57
Najveći koeficijent pora, $e_{max}$	0,70	0,75	0,89	0,73	0,78	0,94

## 2.2 Oprema za ciklično troosno ispitivanje

Eksperimentalne postavke su iste kao kod Hazirbabaa i Omarowa [12]. U ovom je istraživanju korištena najsuvremenija oprema za ciklično troosno ispitivanje. Troosni uređaj izrađen po narudžbi ima nagibni okvir koji omogućuje pripremu uzorka na mjestu ispitivanja. Ova jedinstvena značajka olakšava dobivanje visokokvalitetnih uzoraka i time pouzdanije rezultate ispitivanja. Fotografija korištenog sustava prikazana je na slici 3. Sustav je opremljen jedinicom za kondicioniranje signala, servo-pojačalom, računalnim sučeljem i jedinicama za prikupljanje podataka. Normalno opterećenje, primjena čelijskog tlaka i zasićenost primjenom povratnog tlaka kontrolirani su servoregulatorima tlaka. U troosnom uređaju se mogu ispitati uzorci promjera 101,6 mm (ili manji).

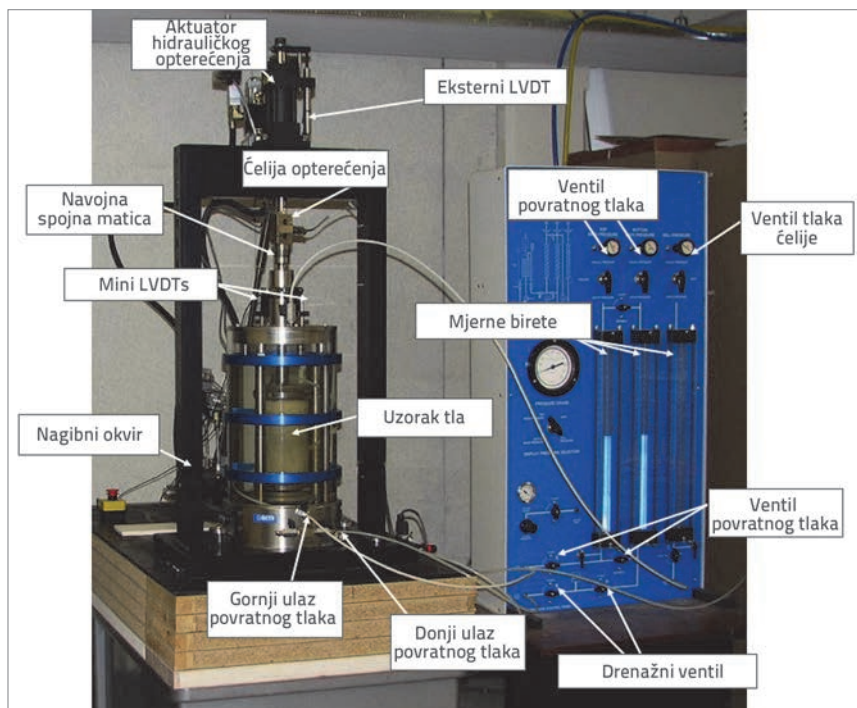
## 2.3. Priprema uzoraka tla

U ovom je istraživanju primijenjena metoda vlažnog zbijanja [11, 12] za pripremu kako uzoraka čistog pijeska tako i uzoraka pijeska ojačanog vlaknima. Za ojačane uzorke, najprije se važu

vlakna da bi se odredio pojedini udio te se zatim pomiješaju sa suhim pijeskom. Nakon temeljitog miješanja, smjesi je dodana destilirana i odzračena voda da se dobije oko 50 % zasićenosti prije zbijanja. Važno je dodati vodu u mješavinu nakon što su dodana vlakna jer se tako grupiranje vlakana na jednom mjestu svodi na najmanju moguću mjeru i postiže se jednolika raspodjela (slika 4.).



Slika 4. Fotografija smjese pijeska i vlakna tijekom pripreme uzoraka



Slika 3. Fotografija sustava ispitivanja i postavljanja

Nakon izrade uzorka, ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ) je filtriran kroz uzorak kako bi se ubrzalo zasićenje.  $\text{CO}_2$  zamjenjuje zrak u porama; a budući da je više topljiv u vodi nego u zraku, omogućava uspješno provođenje naknadnih koraka zasićenja. Zatim se odzračena voda ispušta kroz donji odvodni vod uzorka. Zasićenost je postignuta primjenom povratnog tlaka od 100 do 200 kPa uz održavanje konstantnog efektivnog naprezanja od 30 kPa na uzorku. Pretpostavlja se da je postignuta potpuna zasićenost za Skemptonov parametar B od 0,96 ili više. Uzorci ojačani vlaknima su zahtijevali dugo vrijeme primjene povratnog tlaka (u nekim slučajevima oko 48 sati) kako bi se postigle prihvatljive B-vrijednosti. Dulje vrijeme primjene povratnog tlaka u slučaju ojačanih uzoraka može se objasniti prisutnošću vlakana koja bi mogla povećati zarobljenost zraka unutar uzorka tla. Nakon što je

postignuta potpuna zasićenost, pokrenuta je faza konsolidacije. Efektivno čelijsko naprezanje povećano je na željenu razinu te je omogućeno da uzorak konsolidira.

#### 2.4. Ciklično opterećenje i mjerenje nakon nametanja opterećenja

Ventili za odvodne vodove su zatvoreni prije primjene cikličnog opterećenja kako bi se osigurali nedrenirani uvjeti. Uzdužna deformacija je nametana sinusoidno s frekvencijom od 0,2 Hz. Usporena brzina opterećivanja je odabrana kako bi se osigurala ravnoteža pornog tlaka vode i time omogućilo točnije mjerenje pornog tlaka [12]. Koristeći teoriju elastičnosti za potpuno saturirana tla, ciklična posmična deformacija ( $\gamma$ ) je

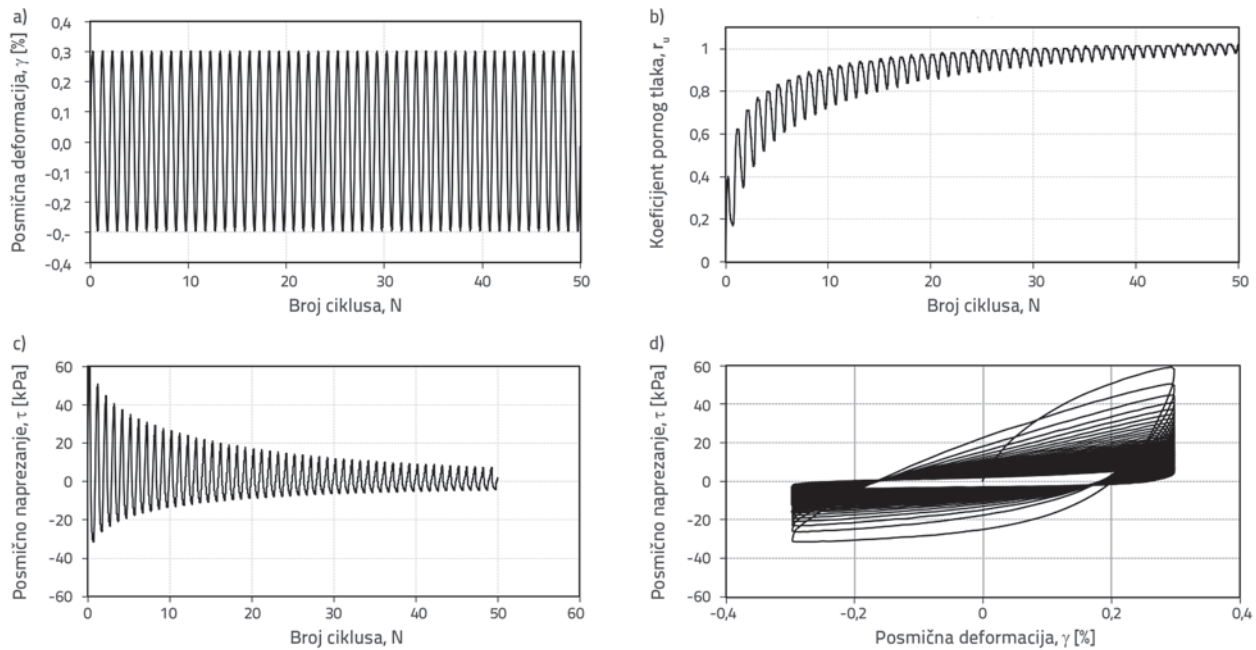
odabrana kao 1,5 puta ( $\epsilon$ ), pri čemu je  $\epsilon$  uzdužna deformacija u nedreniranom troosnom ispitivanju. Pokus je završen nakon što je postignut određeni broj ciklusa opterećivanja (tj.  $N = 50$ ). Da bi se uklonio učinak prethodnog deformiranja na stvaranje dodatnog pornog tlaka, svaki je uzorak ispitivan pri samo jednoj razini deformacije; izbjegnuto je postupno (fazno) ispitivanje. Generirani dodatni porni tlak je dispirao dopuštanjem drenaže u birete povratnog tlaka na kraju svakog ispitivanja. Na taj način je omogućena ponovna konsolidacija uzorka na kraju ispitivanja. Mjere se i bilježe promjena volumena i visina uzorka nastale kao rezultat ponovne konsolidacije poslije nakon nametanja opterećenja. U tablici 4. prikazana je ispitna matrica eksperimentalnog programa, uključujući različite parametre ispitivanja.

Tablica 4. Popis obavljenih ispitivanja

Broj ispitivanja	Relativna gustoća nakon konsolidacije [%]	B-vrijednost na kraju zasićenja	Ciklična posmična deformacija $\gamma$ [%]	Vrsta i udio polimernih vlakana*	Čelijsko naprezanje $\sigma'_c$ [kPa]	Koeficijent pora nakon konsolidacije, e
1	52,8	0,96	0,010	F 0,2 %	100	0,6244
2	55,2	0,96	0,100	F 0,2 %	100	0,6197
3	52,1	0,96	0,300	F 0,2 %	100	0,6258
4	54,9	0,96	0,010	F 0,5 %	100	0,6483
5	58,2	0,97	0,100	F 0,5 %	100	0,6404
6	52,6	0,96	0,300	F 0,5 %	100	0,6537
7	61,1	0,96	0,010	F 1,0 %	100	0,7138
8	62,4	0,96	0,100	F 1,0 %	100	0,7090
9	61,1	0,96	0,300	F 1,0 %	100	0,7138
10	50,6	0,96	0,010	T 0,2 %	100	0,6158
11	59,6	0,96	0,100	T 0,2 %	100	0,6047
12	44,1	0,97	0,300	T 0,2 %	100	0,6294
13	54,7	0,96	0,010	T 0,5 %	100	0,6406
14	56,3	0,96	0,100	T 0,5 %	100	0,6374
15	57,0	0,96	0,300	T 0,5 %	100	0,6361
16	58,8	0,96	0,010	T 1,0 %	100	0,6784
17	58,4	0,96	0,100	T 1,0 %	100	0,6798
18	57,7	0,96	0,300	T 1,0 %	100	0,6823
19	51,7	0,98	0,001	CS	100	0,6249
20	52,3	0,97	0,003	CS	100	0,6232
21	52,5	0,98	0,005	CS	100	0,6225
22	51,6	0,96	0,007	CS	100	0,6252
23	51,4	0,97	0,010	CS	100	0,6258
24	51,0	0,98	0,030	CS	100	0,6270
25	51,4	0,98	0,060	CS	100	0,6258
26	52,3	1,00	0,100	CS	100	0,6232
27	51,6	0,98	0,200	CS	100	0,6252
28	51,8	0,97	0,300	CS	100	0,6245

\* F - fibrilirani tip vlakana (eng. Fibrillated type, T - vrpčasta vlakna (eng. Tape type), CS - čisti pijesak (eng. Clean sand)





Slika 5. Tipični rezultati cikličnog troosnog ispitivanja s kontroliranom deformacijom i u nedreniranim uvjetima na uzorku zasićenog ojačanog pijeska ( $\gamma = 0,3\%$ ;  $f = 0,2\text{ Hz}$ ;  $\sigma'_c = 100\text{ kPa}$ ;  $0,5\%$  udjela vrpčastih vlakana)

Rezultati tipičnog cikličnog troosnog ispitivanja s kontroliranom deformacijom i u nedreniranim uvjetima prikazani su na slici 5. Uzorak ojačanog pijeska podvrgnut je veličini posmične deformacije od  $0,3\%$  tijekom 50 ciklusa opterećenja (slika 5.a). Dodatni porni tlak se povećava i doseže vrijednost  $r_u = 1,0$  nakon približno 25 ciklusa opterećivanja (slika 5.b). Posmično naprezanje kontinuirano opada s cikličnim opterećenjem kao odgovor na povećani dodatni porni tlak i smanjenu krutost (slika 5.c). Odnos posmičnog naprezanja i posmične deformacije uzorka prikazan je na slici 5.d gdje se smanjenje krutosti može jasno vidjeti.

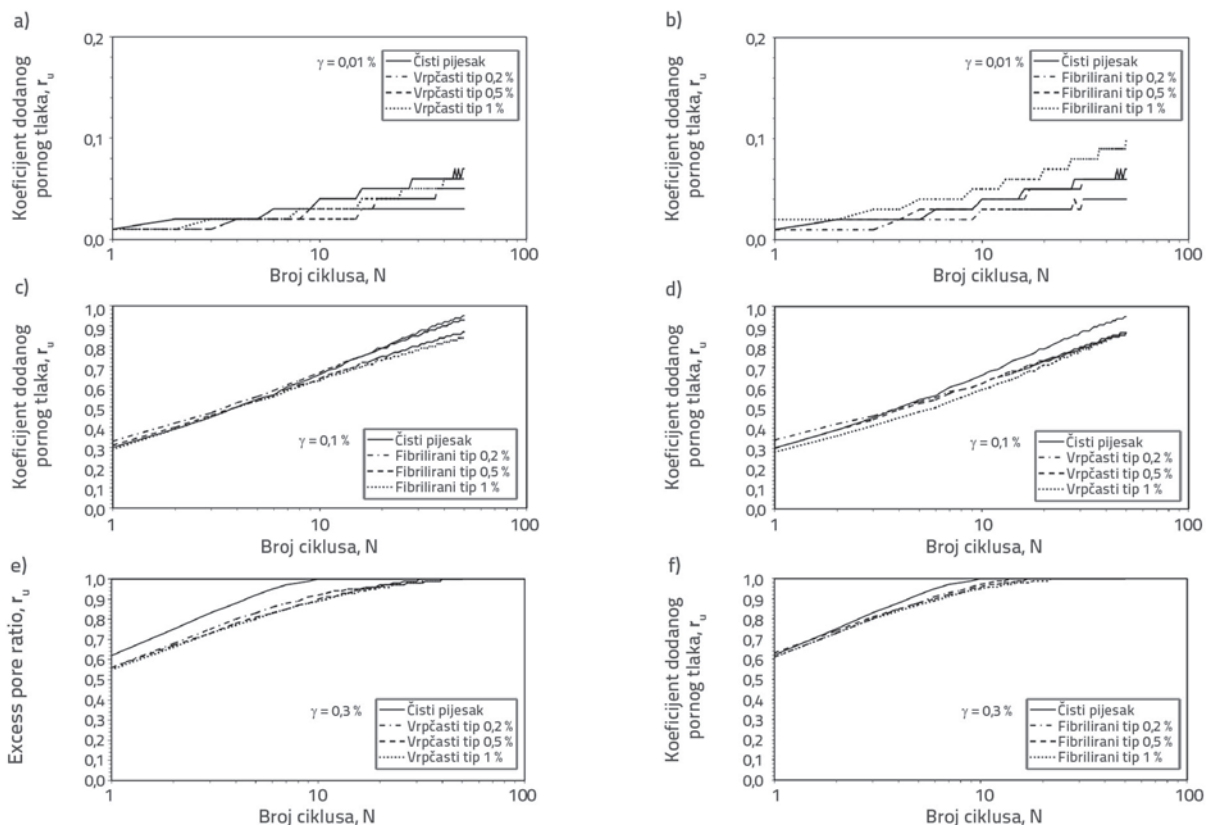
### 3. Rezultati i usporedbe

#### 3.1. Generiranje dodatnog pornog tlaka pijeska ojačanog vlaknima

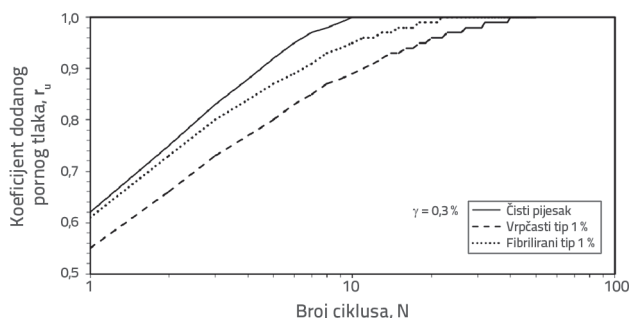
Slika 6. prikazuje razvoj dodatnog pornog tlaka kao funkciju ciklusa opterećivanja u uzorcima čistog pijeska i uzorcima ojačanim vlaknima. Varijabilni parametri za trendove prikazane na slici 6. su vrsta vlakana (vrpčasti ili fibrilirani), udio vlakana i razina posmične deformacije. Koefficient dodatnog pornog tlaka ( $r_u$ , gdje je  $r_u = \Delta u / \sigma'_c$ ;  $\Delta u$  = najveći dodatni porni tlak vode induciran tijekom ciklusa i  $\sigma'_c$  = početni efektivni čelijski tlak) ostao je ispod  $0,1$  na najmanjoj razini posmične deformacije,  $\gamma = 0,01\%$  bez obzira na tip i udio ojačanja (slike 6.a i 6.b). Gornja granica je definirana odgovorom čistog pijeska u slučaju ojačanja vrpčastim vlaknima i odgovorom uzorka s  $1\%$  udjela vlakana fibriliranog tipa. U oba slučaja ojačanja potrebno je primijetiti preklapanja

između odgovora uzoraka. Na razini posmične deformacije od  $\gamma = 0,1\%$  (slike 6.c i 6.d) zabilježen je značajan razvoj pornog tlaka. Međutim, učinci vrste i udjela ojačanja na ovoj razini deformacije nisu vrlo izraženi. Odgovori uzorka čistog pijeska i ojačanih uzoraka, čini se, stvaraju uski pojas koji upućuje na vrlo sličan porni tlak, posebno tijekom prvih deset ciklusa opterećenja. Koefficient pornog tlaka povećava se s povećanjem ciklusa opterećenja od približno  $0,3$  nakon prvog ciklusa na približno  $0,9$  na kraju 50. ciklusa. Uzorci koji su bili podvrgnuti posmičnoj deformaciji od  $\gamma = 0,3\%$  doživjeli su najveće porne tlakove i eventualnu likvefakciju (slike 6.e i 6.f). Na ovoj razini deformacije vidljivo je djelovanje ojačanja. Ojačani uzorci dosljedno su razvijali manje dodatnog pornog tlaka za obje vrste vlakana u usporedbi s uzorcima čistog pijeska. Međutim, zanimljivo je napomenuti da različiti udio vlakana generira vrlo sličan dodatni porni tlak. Podaci pokazuju da je smanjenje dodatnog pornog tlaka zbog ojačanja malo veće kod vlakana vrpčastog tipa.

Slika 7. prikazuje usporedbu krivulja generiranja pornog tlaka triju uzoraka podvrgnutih istim uvjetima ispitivanja. Uzorak ojačan vrpčastim vlaknima pokazao je najmanji dodatni porni tlak; koefficient pornog tlaka povećan je s  $0,55$  u prvom ciklusu na  $0,95$  kod 27. ciklusa i uzorak je dosegao početnu likvefakciju ( $r_u = 1,0$ ) u 40. ciklusu. Porni tlakovi kod fibriliranog tipa vlakana bili su također niži od onih kod čistog pijeska, počevši s početnim koefficientom pornog tlaka od  $0,61$  i dostizanjem početne likvefakcije u 29. ciklusu. Za čisti uzorak pijeska trebalo je sedam ciklusa da koefficient pornog tlaka pređe  $0,95$  i 14 ciklusa za početnu likvefakciju.



Slika 6. Povijesti dodatnog pornog tlaka (EP) čistog pijeska i pijeska ojačanog polimernim vlaknima pri cikličnoj posmičnoj deformaciji od: a) 0,01 %; b) 0,01 %; c) 0,1 %; d) 0,1 %; e) 0,3 %; f) 0,3 %



Slika 7. Usporedba povijesti dodatnog pornog tlaka pri cikličnoj posmičnoj deformaciji od 0,3 %

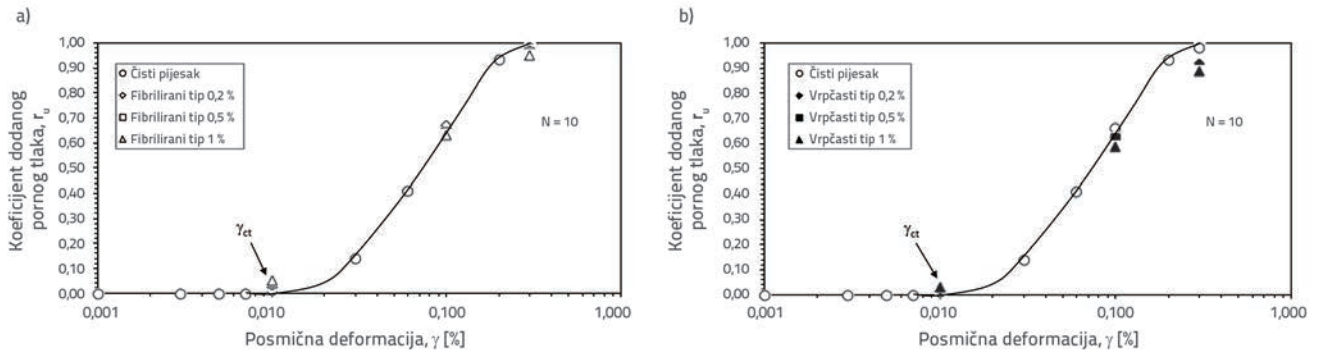
U pristupu temeljenom na deformacijama u analizama likvefakcije [10], generiranje dodatnog pornog tlaka obično se definira kao funkcija posmične deformacije pri  $N = 10$ .  $N$  vrijednost potrebna za likvefakciju je funkcija magnitude,  $M_w$ , potresa. Ako je  $M_w = 7,0$ , tla koja likvifiraju u prvih 10 ciklusa se smatraju sklonim likvefakciji [10, 13]. Takve krivulje generiranja pornog tlaka prikazane su na slici 8. Čini se da je odgovor uzoraka ojačanih fibriliranim tipom vlakana vrlo sličan odgovoru čistog pijeska (slika 8.a). Međutim, uzorci s vrpčastim tipom vlakana pokazuju trend dodatnog pornog tlaka koji je znatno niži od onog čistog pijeska (slika 8.b). Ciklusna granična vrijednost posmične deformacije ( $\gamma_{ct}$ ) definirana je kao razina deformacije ispod koje

se razvija mali ili nikakav dodatni porni tlak [14]. Zanimljivo je napomenuti da je granična vrijednost posmične deformacije ( $\gamma_{ct}$ ) otprilike 0,01 %, a ta razina očito nije pod utjecajem uključivanja bilo koje vrste vlakana.

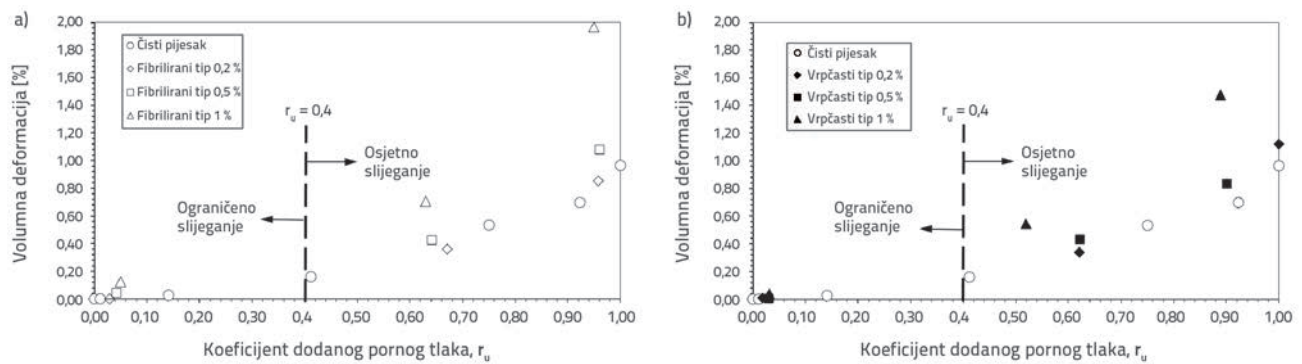
Prilikom određivanja potencijala likvefakcije tla primjenom pristupa temeljenog na deformaciji, važno je napomenuti da je ciklična deformacija funkcija cikličnog naprezanja izračunana iz vršnog ubrzanja tla i posmičnog modula. Stoga prilikom tumačenja rezultata prikazanih na slici 8., treba biti oprezan jer se krutost i posmični modul ojačanog tla mogu razlikovati od vrijednosti kod čistog pijeska.

### 3.2. Disipacija pornog tlaka i slijeganje nakon nametanja opterećenja

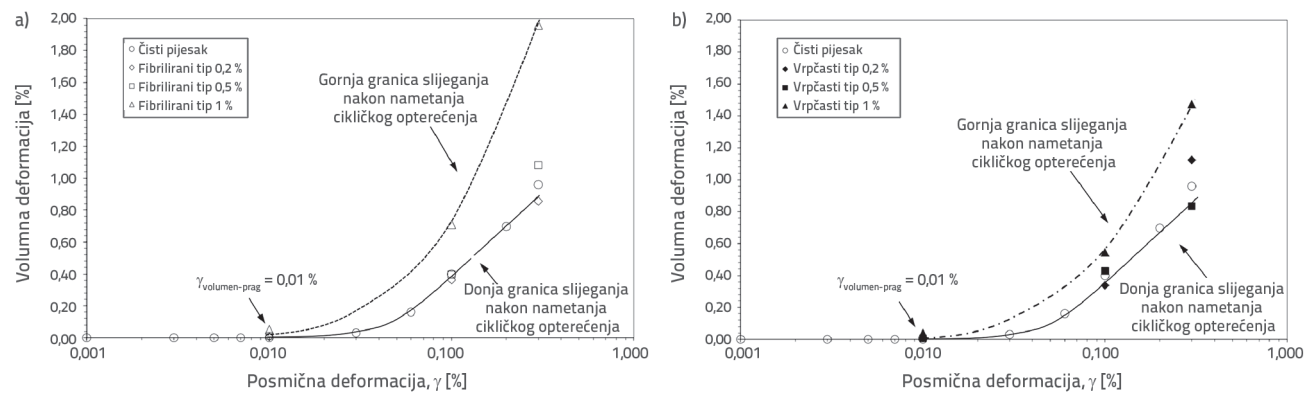
Slijeganje nakon nametanja cikličnog opterećenja obično se mjeri volumnom deformacijom i također se naziva slijeganjem ponovne konsolidacije. Volumna deformacija ( $\epsilon_v$ ) se određuje kao omjer između promjena volumena nakon opterećenja i volumena poslije konsolidacije (prije opterećenja) uzorka ( $\epsilon_v = \Delta V_{pt}/V_p$ ). Volumna deformacija se prikazuje kroz dodatni porni tlak i induciranu posmičnu deformaciju, kao što je prikazano na slici 9. odnosno 10. Volumna deformacija kao funkcija koeficijenta dodatnog pornog tlaka (slika 9.) pokazuje da su uzorci s većim udjelom vlakana imali veću volumnu deformaciju



Slika 8. Krivulje generiranja pornog tlaka kod pijeska ojačanog vlaknima: a) krivulja generiranja pornog tlaka kod pijeska ojačanog fibriliranim tipom vlakana; b) krivulja generiranja pornog tlaka kod pijeska ojačanog vrpčastim tipom vlakana



Slika 9. Volumna deformacija poslije opterećenja u odnosu na koeficijent dodatnog pornog tlaka: a) odgovor pijeska ojačanog fibriliranim tipom vlakana; b) odgovor pijeska ojačanog vrpčasti tipom vlakana



Slika 10. Volumna deformacija poslije opterećenja u odnosu na cikličnu posmičnu deformaciju: a) odgovor pijeska ojačanog fibriliranim tipom vlakana; b) odgovor pijeska ojačanog vrpčastim tipom vlakana

ponovne konsolidacije kod istog koeficijenta pornog tlaka. Općenito, veći dodatni porni tlakovi ( $r_u > 0$ ), doveli su do znatno većih volumnih deformacija, a ojačanja vlaknima oba tipa dovode do većeg slijeganja nakon nametanja cikličnog opterećenja u usporedbi s onim čistog pijeska. Što je veći udio vlakana, to je veće slijeganje nakon nametanja cikličnog opterećenja. Ograničeno slijeganje ispod  $r_u = 0,4$  može se pripisati cikličnim degradacijskim karakteristikama potpuno zasićenog pijeska u nedreniranim uvjetima, kao što su zaključili Vučetić i Mortezaie [15], gdje je ustanovljeno da pijesak prolazi cikličnu degradaciju tek nakon postizanja  $r_u = 0,35$

Volumna deformacija kao funkcija ciklične posmične deformacije prikazana je na slici 10. Najveća volumna deformacija je promatrana u uzorcima s 1 % udjela vlakana. Na primjer, kod posmične deformacije od  $\gamma = 0,1$  %, volumna deformacija uzoraka ojačanih s 1 % udjela vlakana je 0,52 % i 0,64 % kod vrpčastog i fibriliranog tipa vlakana; dok je uzorak čistog pijeska imao volumnu deformaciju od 0,34 % na istoj razini posmične deformacije. Veće volumne deformacije izmjerene su s povećanjem inducirane posmične deformacije. Kod posmične deformacije od 0,3 %, odgovarajuće volumne deformacije uzoraka ojačanih vrpčastim i fibriliranim vlaknima su otprilike 1,5

do 2 puta veće od onih čistog pijeska. Slijeganja uzoraka s nižim udjelom vlakana (od 0,5 % i 0,2 %) nisu bila značajno različita od slijeganja uočenog kod čistog pijeska. Kod posmične deformacije od  $\gamma = 0,01$  %, volumne deformacije su bile zanemarivo male. Stoga se ova razina posmične deformacije može smatrati pragom volumne deformacije ( $\gamma_{\text{volumen-prag}}$ ) koji je gotovo jednak kao i kod uzoraka čistog pijeska.

#### 4. Zaključak

Iz niza cikličnih troosnih ispitivanja s kontroliranom deformacijom u nedreniranim uvjetima, provedenim na zasićenom čistom pijesku i pijesku ojačanom polimernim vlaknima, zabilježeno je da na povećanje dodatnog pornog tlaka utječe broj ciklusa opterećivanja, razina inducirane posmične deformacije i udio vlakana (ojačanje). Općenito, opažen je donekle pozitivan učinak ojačanja s aspekta sporijeg generiranja dodatnog pornog tlaka i odgađanja početne likvefakcije u usporedbi sa čistim pijeskom. Utvrđeno je da je učinak vlakana na razvoj dodatnog pornog tlaka postao izraženiji s povećanjem razine inducirane ciklične posmične deformacije. Vrpčasta polipropilenska vlakna su učinkovitija od

fibriliranog tipa u ograničavanju generiranja dodatnog pornog tlaka i odgađanju likvefakcije. Utvrđeno je da obje vrste vlakana imaju mali ili nikakav utjecaj na graničnu vrijednost posmične deformacije; široko prihvaćena razina granične vrijednosti posmične deformacije od 0,01 % potvrđena je kod neojačanog i ojačanog pijeska. Zabilježen je učinak pornog tlaka na slijeganje nakon nametanja opterećenja. Ustanovljeno je da se pojavljuje znatno slijeganje neojačanog i ojačanog pijeska kada je koeficijent pornog tlaka bio veći od 0,4. Za isti porni tlak i induciranu posmičnu deformaciju utvrđeno je da pijesak ojačan vlaknima pokazuje veće slijeganje nakon nametanja opterećenja, posebno s povećanjem udjela vlakana. Slijeganje pijeska ojačanog fibriliranim vlaknima, nakon nametanja opterećenja, bilo je znatno veće.

#### Zahvale

Autori zahvaljuju na potpori koju je pružio američki Zavod za promet (eng. *U.S. Department of Transportation*) Uprava za tehnologiju istraživanja i inovativnu tehnologiju preko Centra za promet Sveučilišta Aljaske i Državnog zavoda za promet i javne objekte Aljaske, Odobrenje potpore br.: G3238-33650.

#### LITERATURA

- [1] Gray, D.H., Ohashi, H.: Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 109 (1983) 3, pp. 335–353.
- [2] Gray, D.H., Al-Refeai, T.: Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 112 (1986) 8, pp. 804–820.
- [3] Maher, M.H., Gray, D.H.: Static response of sand reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 116 (1990) 11, pp. 1661–1677.
- [4] Consoli, N.C., Montardo, J.P., Prietto, P.D.M., Pasa, G.S.: Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, 128 (2002) 6, pp. 462–472.
- [5] Santoni, R.L., Tingle, J.S., Webster, S.L.: Stabilization of silty sand with non-traditional additives. *Transportation Research Record*, Paper No. 02-3756, 1787, pp. 61–70, 2002.
- [6] Zornberg, J.G.: Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. *Geotechnique*, 52 (2002) 8, pp. 593–604.
- [7] Hazirbaba, K., Connor, B.: The use of geofiber and synthetic fluid for stabilizing marginal soils. Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Champaign, IL. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields 1-2, pp. 89–96., 2009.
- [8] Noorany, I., Uzdavines, M.: Dynamic behavior of saturated sand reinforced with geosynthetic fabrics. Proc., *Geosynthetics '89 Conf.*, 2 (1989), pp. 385–396.
- [9] Maher, M.H., Woods, R.D.: Dynamic response of sands reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 116 (1990) 7, pp. 1116–1131.
- [10] Dobry, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R.M., Powell, D.: Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method. National Bureau of Standards Building Science Series, 138 (1982), 150 pp.
- [11] Ladd, R.S.: Preparing test specimens using undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1 (1978) 1, pp. 16–23.
- [12] Hazirbaba, K., Omarow, M.: Post-cyclic loading settlement of saturated clean sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 77 (2015), pp. 337–347, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.06.007>
- [13] Seed, H.B., Idriss, I.M., Makdisi, F., Banerjee, N.: Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses. EERC 75-29, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975.
- [14] Dobry, R., Swiger, W.F.: Threshold strain and cyclic behavior of cohesionless soils. Proceedings *Third ASCE/EMDE Specialty Conference*, Austin, TX, 9 (1979) 17–19, pp. 521–525.
- [15] Vucetic, M., Mortezaie, A.: Cyclic secant shear modulus versus pore water pressure in sands at small cyclic strains. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 70 (2015), pp. 60–72, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.12.001>