

Primljen / Received: 15.8.2020.

Ispravljen / Corrected: 13.11.2020.

Prihvaćen / Accepted: 4.12.2020.

Dostupno online / Available online: 10.2.2021.

Ispitivanje nekoherentnog tla armiranog geomrežom u uređaju za troosni posmik pri cikličkom opterećenju

Autori:



Jelena Kaluđer, mag.ing.aedif.

Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
jkaluđer@gfos.hr

Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Mensur Mulabdić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
mulabdic@gfos.hr



Izv.prof.dr.sc. **Krunoslav Minažek**, dipl.ing.građ.

Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
krumin@gfos.hr

Pregledni rad

Jelena Kaluđer, Mensur Mulabdić, Krunoslav Minažek

Ispitivanje nekoherentnog tla armiranog geomrežom u uređaju za troosni posmik pri cikličkom opterećenju

U nosivim slojevima kolničke konstrukcije geomreže imaju funkcije ojačanja ili stabilizacije, pri čemu je važna dobra interakcija geomreže i nekoherentnog materijala nosivog sloja. Za ispitivanje interakcije geomreže i materijala nosivih slojeva kolničkih konstrukcija može se primijeniti pokus cikličkim troosnim posmikom. Rad obuhvaća pregled istraživanja primjene cikličkog troosnog posmika posebice tijekom ocjenjivanja utjecaja parametara kao što su krutost, geometrija i veličina otvora, položaj i broj slojeva geomreže na interakciju s materijalom nosivog sloja. Ocjenjuje se da se cikličkim troosnim posmikom može utvrditi doprinos primjene geomreža u nekoherentnim materijalima u vidu smanjenja trajnih deformacija.

Ključne riječi:

geomreža, ciklički troosni posmik, krutost, oblik otvora, veličina otvora

Subject review

Jelena Kaluđer, Mensur Mulabdić, Krunoslav Minažek

Testing noncohesive geogrid-reinforced soil in triaxial shear apparatus under cyclic loading

In road base layers, geogrids assume the reinforcement or stabilization function where good interaction between geogrid and unbound base material is important. The cyclic triaxial test can be used for analysing interaction between geogrid and unbound base material. The paper includes an overview of research where cyclic triaxial test is primarily used for assessing the influence of parameters such as geogrid stiffness, geometry and aperture size, position and number of geogrid layers, on the interaction with the base layer material. The cyclic triaxial test can be used to determine contribution the geogrid application in non-cohesive materials has on the reduction of permanent deformations.

Key words:

geogrid, cyclic triaxial test, stiffness, aperture geometry, aperture size

Übersichtsarbeit

Jelena Kaluđer, Mensur Mulabdić, Krunoslav Minažek

Prüfung von inkohärentem geogitterverstärktem Boden in einer Vorrichtung zur dreiaxigen Scherung unter zyklischer Belastung

In den tragenden Schichten haben die Fahrbahnstrukturen des Geogitters die Funktion der Bewehrung oder Stabilisierung, wobei ein gutes Zusammenspiel des Geogitters und des inkohärenten Materials der tragenden Schicht wichtig ist. Um die Wechselwirkung des Geogitters und des Materials der tragenden Schichten von Fahrbahnstrukturen zu testen, kann ein zyklisches Dreiaxsen-Scherexperiment angewendet werden. Diese Arbeit enthält einen Überblick über die Forschung zur Anwendung der zyklischen dreiaxigen Scherung, insbesondere während der Bewertung des Einflusses von Parametern wie Steifheit, Geometrie und Größe der Öffnungen, Position und Anzahl der Geogitterschichten auf die Wechselwirkung mit dem Lagerschichtmaterial. Es wird geschätzt, dass der Beitrag der Anwendung von Geogittern in inkohärenten Materialien in Form einer Verringerung dauerhafter Verformungen durch zyklische dreiaxige Scherung bestimmt werden kann.

Schlüsselwörter:

Geogitter, zyklische dreiaxige Scherung, Steifheit, Lochform, Lochgröße

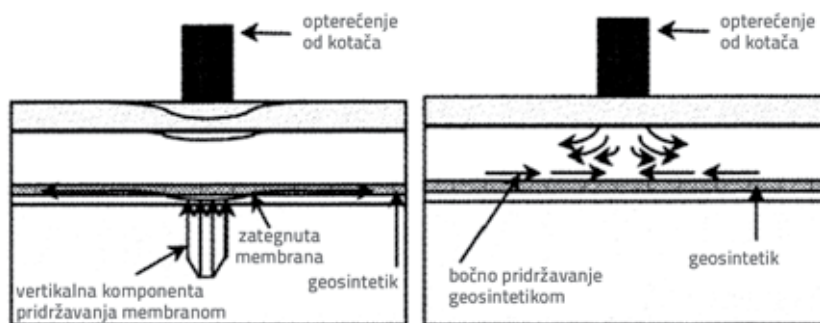
1. Uvod

Armirano tlo kao kompozit geosintetika (najčešće geomreža) i tla nailazi na veliku primjenu u različitim zahvatima - od poboljšanja temeljnog tla, konstrukcija nasipa i potpornih zidova, nosivih platformi, pa sve do primjene u nosivim slojevima kolničkih konstrukcija. Primjerice, dok geosintetici u potpornim konstrukcijama imaju funkciju ojačanja, u nosivim slojevima kolničkih konstrukcija mogu imati funkciju ojačanja ili stabilizacije. Za funkciju ojačanja gdje je dominantan mehanizam zategnute membrane (slika 1. lijevo), potrebne su velike deformacije, što ujedno znači i velike deformacije prometne površine, dok je pri manjim deformacijama dominantan mehanizam bočnog pridržanja (slika 1. desno), odnosno stabilizacija [1]. HRN EN ISO 10318-1:2015 [3] definira ojačanje kao "iskorištavanje svojstava naprezanja i deformacije geosintetika za poboljšanje mehaničkih svojstava tla ili drugih građevinskih materijala", a HRN EN ISO 10318-1:2015/A1 [4] definira stabilizaciju kao "poboljšanje mehaničkog ponašanja nevezanog zrnatog materijala primjenom jednog ili više slojeva geosintetika, pri čemu su spriječeni pomaci nevezanog zrnatog materijala uslijed djelovanja opterećenja što rezultira smanjenim deformacijama". Za stabilizaciju tla se najčešće koriste geomreže koje su obično dvoosne (izražene nosivosti u dva smjera), kvadratnog ili pravokutnog oblika otvora, i troosne (izražene radialne nosivosti - više smjerova nosivosti) i trokutnog oblika otvora. Geomreže interakciju s tlom ostvaruju prije svega uklještenjem čestica u otvore geomreže, a manje trenjem po površini rebra ili trenjem zrnima uglavljenim u otvore geomreže [5]. Uklještenjem čestica u otvore geomreže nastaje zona poboljšanih svojstava tla gdje su najbolja svojstva zabilježena neposredno uz geomrežu, dok se s povećanjem udaljenosti od geomreže smanjuje utjecaj uklještenja. Visina zone poboljšanih svojstava prema [6] iznosi 150 mm (ispod i iznad geomreže), a utvrđena je pokusom cikličkog troosnog posmika na uzorku armiranog nekoherentnog materijala visine 600 mm i promjera 300 mm. Prema McDowell i ostali [7], navedena zona iznosi 100 mm ispod i iznad geomreže, temeljeno na rezultatima simulacija troosnog posmika koje su provedene numeričkim modeliranjem metodom diskretnih elemenata (DEM). Minažek [8] utvrđuje visinu zone utjecaja od

približno $30 \times D_{50}$ za uzorke riječnog šljunka ($D_{50} = 6$ i 12 mm). Cook i Horvat [9] navode da je zona uklještenja armiranog balasta (ispitano pokusom izravnog posmika) do 200 mm iznad geomreže te pretpostavljaju položaj zone bez utjecaja uklještenja na udaljenosti 400 mm od geomreže.

Primjena geomreža u prometnicama pojavila se nešto kasnije u odnosu na primjenu geotekstila. Tako je prva primjena tkanih geomreža u cestama sa završnim slojem od asfaltnih mješavina bila 1985. godine u Maleziji [10], a prva laboratorijska istraživanja primjene geomreža u nosivom sloju kolničkih konstrukcija započela su krajem 80-ih godina prošlog stoljeća [11, 12]. Provedena istraživanja [11-15] pokazala su dobre učinke primjene geomreža u stabilizaciji nosivih slojeva te su zabilježene prednosti poput smanjenja trajnih deformacija površine kolnika, smanjenja troškova održavanja i produljenja uporabivosti ceste, i/ili povećanjem nosivosti, i/ili smanjenja potrebne debljine nosivog sloja (ušteta materijala). Pri ispitivanju interakcije geomreže i tla potrebno je voditi računa o uvjetima opterećenja kojima će ti materijali u određenom tipu konstrukcije biti izloženi. Za ispitivanje pogodnosti primjene geomreža u cestama i zbog naravi prometnog opterećenja koje se može okarakterizirati kao cikličko, potrebno je provoditi ispitivanja pod djelovanjem cikličkog opterećenja. Prva ispitivanja s ponavljanjem opterećenjem bila su ispitivanja statičkom kružnom pločom s približno 10 ciklusa ponavljanja opterećenja, no vrlo brzo nakon toga, sredinom 1950-ih su započela ispitivanja s ponavljanim opterećenjem u uređaju za troosni posmik [16]. Uz ciklički troosni posmik do danas su razvijena i druga laboratorijska ispitivanja s cikličkim opterećenjem, kao što je primjerice ciklički izravni posmik, a pregled pojedinih ispitivanja može se pronaći u [17]. Christopher i ostali [18] navode prednosti primjene ispitivanja troosnim posmikom kao što je mogućnost nanošenja različitih kombinacija naprezanja na uzorak (simulacija prometnog opterećenja), jednostavnost mjerenja deformacija (lokalno i van ćelije), dostupnost uređaja te postojanje propisa i norma. Brecciaroli i Kolisoja [19] navode još i ekonomske i vremenske uštede u usporedbi s terenskim ispitivanjima, ali i nedostatke ispitivanja poput nemogućnosti simulacija kretanja kotača (u pokusu se promatra samo stanje naprezanja ispod osi kotača) te zadavanje vrijednosti glavnih naprezanja, pri čemu su dva manja glavna naprezanja uvijek jednaka. Danas su ispitivanja

troosnim posmikom s cikličkim opterećenjem pronašla široku primjenu u ispitivanju ponašanja materijala nosivih slojeva kolničkih konstrukcija jer se iz rezultata ispitivanja može utvrditi prirast trajnih deformacija s povećanjem broja ciklusa opterećenja prema kojima se promatrani materijal može rangirati (shakedown teorija, prihvatljivost primjene materijala za nevezani nosivi sloj) i moduli koji se mogu primijeniti pri projektiranju kolničke konstrukcije.

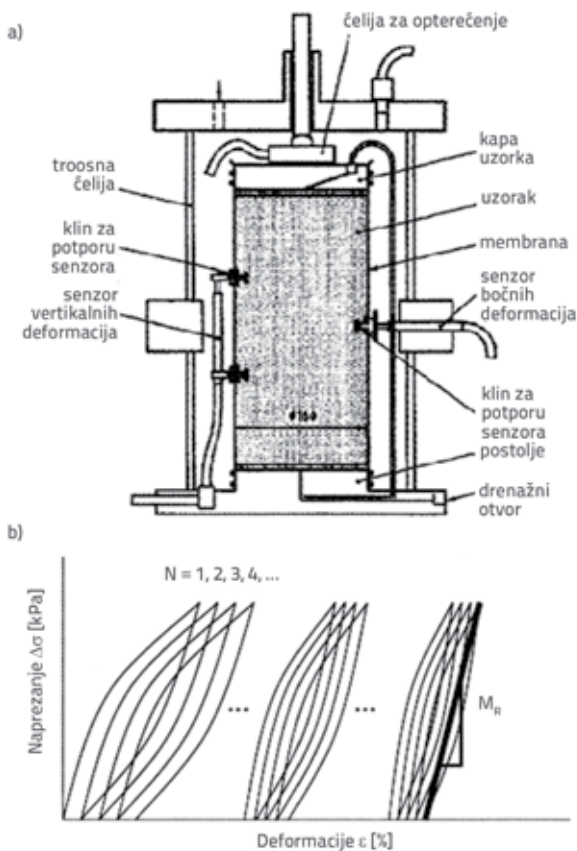


Slika 1. Mehaniizam zategnute membrane (lijevo); Bočno pridržanje (desno), prema [2]

2. Ispitivanje cikličkim troosnim posmikom

2.1. Opis postupka ispitivanja

Cikličkim troosnim posmikom može se simulirati prometno opterećenje i odrediti elastične i plastične (trajne) deformacije promatranog uzorka. Najčešće se ispitivanja provode na nearmiranim uzorcima, ali postoji mogućnost provedbe ispitivanja na uzorcima koji su armirani geosinteticima. Ispitivanje se provodi u ćeliji (slika 2.a) u koju je ugrađen uzorak, izložen predviđenom troosnom stanju naprezanja, a provodi se u fazama, od kojih je prva faza kondicioniranje uzorka, a u drugoj se fazi utvrđuje vrijednost rezilijentnih modula (omjer cikličkog devijatorskog naprezanja i vertikalne elastične deformacije). Uz navedeno cikličkim troosnim posmikom se može pratiti i razvoj trajnih deformacija nakon većeg broja ciklusa opterećenja. Prikaz razvoja elastičnih i trajnih deformacija dan je na slici 2.b gdje se može vidjeti akumulacija trajnih deformacija, ali i smanjenje njihovog prirasta s porastom broja ciklusa opterećenja.



Slika 2. a) Shematski prikaz ćelije za provedbu ispitivanja cikličkim troosnim posmikom, prema [20]; b) Prirast deformacija pri cikličkom opterećenju uzorka, prema [18]

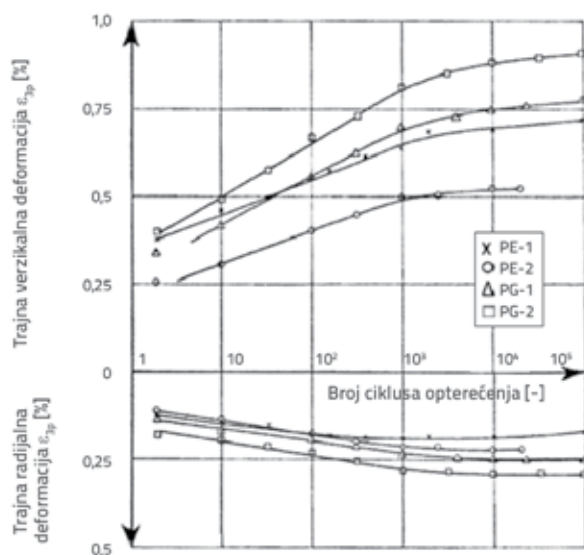
Prva ispitivanja s ponavljanim troosnim opterećenjem započela su sredinom prošloga stoljeća [21-24], a prvi postupak za

provedbu ispitivanja rezilijentnih modula AASHTO T274 objavljen je 1982. godine, prema [18]. Danas postoji više norma i postupaka kao što su AASHTO T307-99 [25], NCHRP 1-28A [26], EN 13286-7 [20], AG:PT-T053-07 [27], a međusobno se razlikuju po definiranju dimenzija uzorka i veličine najvećega zrna materijala u uzorku, postupku ugradnje uzorka te provedbi ispitivanja i mjerenja deformacija.

Prva faza ispitivanja je kondicioniranje kojim se stabilizira prirast trajnih deformacija koje se javljaju pri prvim ciklusima opterećenja te se postiže stabilno rezilijentno ponašanje uzorka [20]. Prema istraživanjima koja su proveli Hicks i Moonismith [28] i Allen [29], za trajanje faze kondicioniranja dostatno je 1000 ciklusa opterećenja. AASTHO T307 [25] navodi da je za provedbu faze kondicioniranja potrebno 500 do 1000 ciklusa opterećenja, a NCHRP 1-28A [26] i AG:PT/T053 [27] propisuju 1000 ciklusa opterećenja. Europska norma [20] nudi mogućnost prilagodbe broja ciklusa prema ponašanju uzorka, odnosno ranijem prekidanju faze kondicioniranja (normom je standardno definirana provedba 20.000 ciklusa opterećenja), ako uzorak postigne rezilijentno ponašanje. U drugoj fazi ispitivanja se promatraju različite kombinacije ćelijskih i devijatorskih naprezanja (različitih u iznosima i međusobnim omjerima u odnosu na naprezanja iz faze kondicioniranja) pri manjem broju ciklusa opterećenja, obično 100 ciklusa [20, 25, 26] do 200 [27] u svrhu određivanja vrijednosti rezilijentnih modula. Na slici 2.b, može se vidjeti promjena vrijednosti rezilijentnog modula s povećanjem broja ciklusa opterećenja za istu vrijednost devijatorskog naprezanja (na slici naznačeno kao nagib pravca M_r), pa se stoga obično u proračunu modula promatra samo zadnjih nekoliko ciklusa opterećenja (zadnjih 10 ciklusa prema [20], odnosno zadnjih 5 ciklusa prema [25, 26]). Za promatranje prirasta trajnih deformacija potrebno je provesti ispitivanje pri većem broju ciklusa tako da prirast trajnih deformacija postane zanemariv. U istraživanju koje je proveo Morgan [24] zabilježen je prirast trajnih deformacija i nakon dva milijuna ciklusa opterećenja, ali je taj prirast bio zanemariv. Boyce [30] bilježi stabilizaciju prirasta trajnih deformacija na uzorku dobro graduiranog drobljenca do 100.000 ciklusa opterećenja (slika 3.). Europska norma [20] za jednoetapno ispitivanje (jedna kombinacija naprezanja) traži 80.000 ciklusa opterećenja, a za višestapno ispitivanje (više različitih kombinacija naprezanja) potrebno je za svaku kombinaciju naprezanja 10.000 ciklusa opterećenja. U normama i propisima različito su definirani zahtjevi za duljinu trajanja jednog ciklusa opterećenja. Tako AASTHO T307 [25] zadaje trajanje jednog ciklusa od 1 do 3,1 sekunde, NCHRP 1-28A [26] 1 sekundu, AG:PT/T053 [27] 3 sekunde, a EN 13286-7 [20] propisuje širi raspon frekvencije opterećenja od 0,2 do 10 Hz. Prema [24, 28, 29, 31], trajanje i frekvencija opterećenja imaju mali do nikakav utjecaj na rezilijentno ponašanje nekoherentnih materijala.

Mjerenje deformacija uzorka može se provoditi vanjskim i/ili lokalnim sensorima deformacija. Primjenom lokalnih senzora omogućuje se preciznije mjerenje pri manjim deformacijama koja se ne bi mogla uspješno zabilježiti pri ukupnom (vanjskom)

mjerenu deformacija te se na taj način izbjegava i utjecaj rubova uzorka. Europska norma [20] propisuje samo primjenu lokalnih senzora za mjerenje horizontalnih i vertikalnih deformacija, [26] primjenu dva lokalna senzora za mjerenje vertikalnih deformacija, dok [25] propisuje primjenu dva vanjska senzora za mjerenje vertikalnih deformacija. Obično se lokalni senzori deformacija ugrađuju u srednjoj trećini visine uzorka (slika 2.a), što u slučaju uzoraka armiranih geosinteticima, odnosno geomrežama (uz polaganje geomreže u sredini visine uzorka) daje mogućnost mjerenja pomaka unutar zone poboljšanih svojstava.



Slika 3. Prirast trajnih deformacija s brojem ciklusa opterećenja (preuzeto i prevedeno iz [30])

2.2. Pregled primjene cikličkog troosnog ispitivanja u istraživanjima armiranog tla

Ispitivanja troosnim posmikom s cikličkim opterećenjem primjenjuju se već više od 60 godina te su do danas provedena ispitivanja na različitim prirodnim tlima (koherentnim i nekoherentnim). Posljednjih godina zabilježen je porast broja ispitivanja cikličkim troosnim posmikom na uzorcima industrijskih i recikliranih materijala. Tako su, između ostalog, zabilježena ispitivanja na uzorcima drobljenog/recikliranog betonskog agregata [32-34], reciklirane glinene opeke i mješavina reciklirane glinene opeke s recikliranim betonskim agregatom [35], željezne i čelične zgre [36], mješavina drobljenog kamena s otpadnim staklom i/ili gumom [37, 38]. Ispitivanja cikličkim troosnim posmikom na uzorcima armiranim geosinteticima provode se posljednjih dvadesetak godina. Najčešće su se provodila ispitivanja s geomrežama [6, 34, 39-50], ali su zabilježene primjene geotekstila i geokompozita [6]. Među prvima su istraživanja na uzorcima armiranim geomrežama s cikličkim troosnim posmikom proveli Moghaddas-Nejad i Small [39], Kamel i ostali [40] te

Perkins i ostali [6]. Nazzal [41] istražuje utjecaj položaja geomreže u uzorku, utjecaj broja slojeva geomreža u uzorku te utjecaj krutosti geomreže na rezultate ispitivanja, pri čemu promatra pet različitih dvoosnih geomreža. U istraživanju koje su proveli Wayne i ostali [42] promatrana je različita gustoća, odnosno stupanj zbijenosti armiranog uzorka, tako da je donja polovica uzorka imala niži stupanj zbijenosti od gornje polovice uzorka. Abu-Farsakh i ostali [43] provode opširno istraživanje gdje promatraju utjecaj oblika otvora geomreže, broja slojeva geomreže u uzorku, položaja geomreže u uzorku te krutosti geomreže na rezultate ispitivanja. U svrhu utvrđivanja uklještenja čestica promatranog jednoliko građuiranog balastnog materijala u otvore dvoosne i troosne geomreže, Qian i ostali [44] provode ispitivanja cikličkim troosnim posmikom i dodatno numeričko modeliranje koristeći se metodom diskretnih elemenata. Nair i Latha [45] u svom istraživanju promatraju utjecaj broja slojeva geomreža na rezultate ispitivanja. Rahman i ostali [34] provode ispitivanja cikličkim troosnim posmikom s drobljenom opekam i recikliranim betonskim agregatom koji je armiran dvoosnom odnosno troosnom geomrežom. Gu [46] u istraživanju promatra utjecaj položaja geomreže (dvoosne ili troosne) koju polaže na dno uzorka, odnosno na 1/4 visine uzorka ili u sredinu visine uzorka. Guthrie i Knighton [47] također promatraju različite oblike otvora geomreže i utjecaj položaja geomreže u uzorku. Byun i ostali [48] te Kim i ostali [49] provode istraživanja cikličkim troosnim posmikom uz koja mjere i brzinu prolaska posmičnih valova pomoću tri seta bender elemenata. Kim i ostali [49], uz navedeno, promatraju pogodnost granulometrijskog sastava za promatrane troosne geomreže različitih veličina otvora. U tablici 1. dan je pregled navedenih istraživanja troosnim posmikom s cikličkim opterećenjem na uzorcima koji su armirani geomrežama.

3. Interakcija nekoherentnog materijala i geomreža

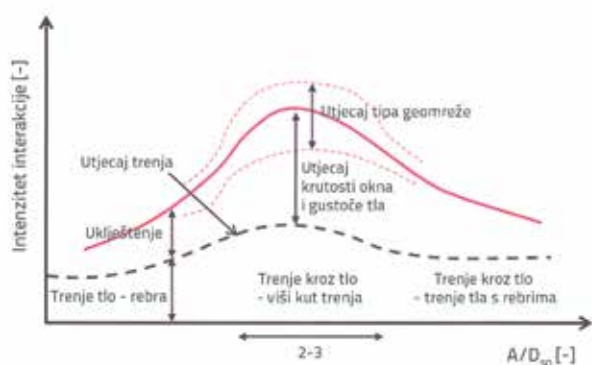
Rezultati ispitivanja cikličkim troosnim posmikom na uzorcima nekoherentnih tala/materijala armiranih geomrežama ovise o svojstvima tla/materijala, načinu provedbe ispitivanja, položaju i broju geomreža u uzorku te svojstvima geomreže. Prema [51], na dobru interakciju geomreže i nekoherentnog materijala koja se ostvaruje uklještenjem zrna u otvore geomreže, utječu veličina otvora geomreže u odnosu na granulometrijski sastav materijala, geometrija otvora, oblik i krutost rebara te krutost čvorova geomreže. Mulabdić i ostali [5] daju ilustraciju (slika 4.) utjecaja intenziteta interakcije geomreže i tla ovisno o veličini otvora, krutosti i tipu geomreže. Na navedenom prikazu može se primijetiti kako se najveći intenzitet interakcije postiže za određeni raspon veličine otvora geomreže (A) i karakteristične veličine zrna (D_{50}), pri čemu je dominantno uklještenje čestica u otvore, a manje trenje na kontaktu.

Tablica 1. Pregled istraživanja na uzorcima armiranim geomrežama ispitanim cikličkim troosnim posmikom

Istraživanje	Dimenzije uzorka	Materijal / tlo*	Geosintetik	Položaj i broj geosintetika
Moghaddas-Nejad i Small, 2003., [39]	D = 200 mm H = 400 mm	GU SW	1 BX GGR	1 GGR ($\frac{1}{2}$ H)
Kamel i ostali, 2004., [40]	D = 100 mm H = 200 mm	SP CL ML	2 BX GGR	1 GGR (24-28% H)
Perkins i ostali, 2004., [6]	D = 300 mm H = 600 mm	GW-GM SM	2 BX GGR 1 GTX-W 1 GCO	1 GGR ($\frac{1}{2}$ H)
Nazzal, 2007., [41]	D = 150 mm H = 300 mm	GW-GM	5 BX GG	1 GGR ($\frac{1}{2}$ H, $\frac{2}{3}$ H) 2 GGR ($\frac{1}{3}$ H i $\frac{2}{3}$ H)
Wayne i ostali, 2011., [42]	D = 150 mm H = 300 mm	G	1 TX GG	1 GGR ($\frac{1}{2}$ H)
Abu-Farsakh i ostali, 2012., [43]	D = 150 mm H = 300 mm	GW	3 BX GGR 2 TX GGR	1 GGR ($\frac{1}{2}$ H, $\frac{2}{3}$ H) 2 GGR ($\frac{1}{3}$ H i $\frac{2}{3}$ H)
Kwon i ostali, 2012., [50]	D = 150 mm H = 300 mm	GP-GM	1 TX GGR	1 GGR ($\frac{1}{2}$ H)
Qian i ostali, 2013., [44]	D = 305 mm H = 610 mm	GU	1 BX GGR 1 TX GGR	1 GGR ($\frac{1}{2}$ H)
Nair i Latha, 2014., [45]	D = 300 mm H = 600 mm	GW	1 BX GGR 1 GCE	2 GGR ($\frac{1}{3}$ H i $\frac{2}{3}$ H) 3 GGR ($\frac{1}{4}$ H, $\frac{1}{2}$ H i $\frac{3}{4}$ H) 4 GGR ($\frac{1}{5}$ H, $\frac{2}{5}$ H, $\frac{3}{5}$ H i $\frac{4}{5}$ H) 5 GGR ($\frac{1}{6}$ H, $\frac{2}{6}$ H, $\frac{3}{6}$ H, $\frac{4}{6}$ H i $\frac{5}{6}$ H)
Rahman i ostali, 2014., [34]	D = 100 mm H = 200 mm	RCA (W) CB (W)	1 BX GGR 1 TX GGR	1 GGR na $\frac{1}{2}$ H
Gu, 2015., [46]	D = 150 mm H = 150 mm	GW	1 BX GGR 2 TX GGR	1 GGR ($\frac{1}{2}$ H, $\frac{1}{4}$ H, 0 H)
Guthrie i Knighton, 2015., [47]	D = 150 mm H = 300 mm	SW-SM GW	1 BX GGR 1 TX GGR	1 GGR ($\frac{1}{2}$ H, $\frac{3}{4}$ H)
Byun i ostali, 2019., [48]	D = 150 mm H = 300 mm	GW	1 BX GGR 1 TX GGR	1 GGR ($\frac{1}{2}$ H)
Kim i ostali, 2020., [49]	D = 150 mm H = 300 mm	2 GW GP	2 TX GGR	1 GGR na $\frac{1}{2}$ H

Legenda:

* USCS klasifikacija provedena prema objavljenim granulometrijskim krivuljama i/ili opisu tla/materijala, H – visina uzorka, D – promjer uzorka, GGR – geomreža, GTX – geotekstil, GTX-W – tkani geotekstil, GTX-NW – netkani geotekstil, BX – dvosne (geomreža), TX – troosna (geomreža), GCO – geokompozit (u tablici GGR+GTX-NW), GCE – geočelija (u tablici izrađena šivanjem GTX, promjera 298 mm), $\frac{1}{2}$ H (1/3H, 2/3H, 1/4H, 3/4H, 5/6H) – položaj geomreže promatran od dna uzorka, na $\frac{1}{2}$ (1/3, 2/3, 1/4, 3/4, 5/6) visine uzorka, OH – geomreža položena na dno uzorka, RCA – reciklirani betonski agregat, CB – drobljena opeka



Slika 4. Okvirni prikaz ovisnosti interakcije geomreže i tla (preuzeto i prerađeno iz [5])

3.1. Parametri koji utječu na interakciju nekoherentnog materijala i geomreže

3.1.1. Svojstva materijala i način ispitivanja

Utjecaj mineralošskog sastava, veličine zrna i granulometrijskog sastava materijala, oblika i teksture zrna, gustoće materijala i vrijednosti čelijskog tlaka na posmičnu čvrstoću nekoherentnih materijala proučavali su brojni istraživači od samog početka primjene uređaja za troosni posmik (vidi primjerice [52]). Lekarp i ostali [53] navode još i utjecaj broja ciklusa opterećenja, frekvenciju odnosno trajanje opterećenja u cikličkim ispitivanjima. Pregled utjecaja pojedinih svojstava tla na rezilijentni odziv nekoherentnog tla i trajne deformacije detaljno je prikazan u Lekarp i ostali [53, 54].

3.1.2. Položaj i broj slojeva geomreže

Položaj i broj geomreža u uzorku utječu na veličinu deformacije uzorka, što je i utvrđeno uz pomoć ispitivanja cikličkim troosnim posmikom. Nazzal [41] usporedbom rezultata ispitivanja s geomrežom ugrađenom u sredini visine uzorka i s geomrežom u gornjoj trećini visine uzorka utvrđuje da su obje geomreže utjecale na smanjenje trajnih deformacija, pri čemu su bolji rezultati ostvareni za geomreže koje su se nalazile u gornjoj trećini visine uzorka (slika 5.). Usporedbom rezultata različitih ispitivanja u kojima je varirana krutost i položaj (raspored) geomreža te broj ciklusa opterećenja, Nazzal [41] navodi da na smanjenje trajnih deformacija dominantno utječe položaj (raspored) geomreža. Abu-Farsakh i ostali [43] dolaze do istih zaključaka i što se tiče najpovoljnijeg položaja ugradnje geomreže, a isto tako i utvrđuju dominantan utjecaj položaja geomreže u odnosu na druge promatrane parametre (raspored/položaj geomreže, krutost i geometrija otvora geomreže). Gu [46] pak provjerava utjecaj položaja geomreže na dnu uzorka, donjoj četvrtini visine i sredini visine uzorka. Navodi da polaganje geomreže na dnu uzorka nema nikakav utjecaj na smanjenje trajnih deformacija te utvrđuje da je od promatrana tri položaja polaganja geomreže, geomreža ugrađena u sredinu visine uzorka pokazala najbolje rezultate. Guthrie i Knighton [47] promatraju geomreže na sredini visine uzorka i gornjoj četvrtini visine uzorka, pri čemu se boljim pokazao potonji položaj. Ispitivanja statičkim troosnim posmikom dala su pak prednost polaganju geomreže u sredini visine uzorka [55] zbog prolaska plohe sloma sredinom uzorka. Budući da se na terenu geomreže ugrađuju na dnu i/ili u sredini nosivog sloja ovisno o debljini

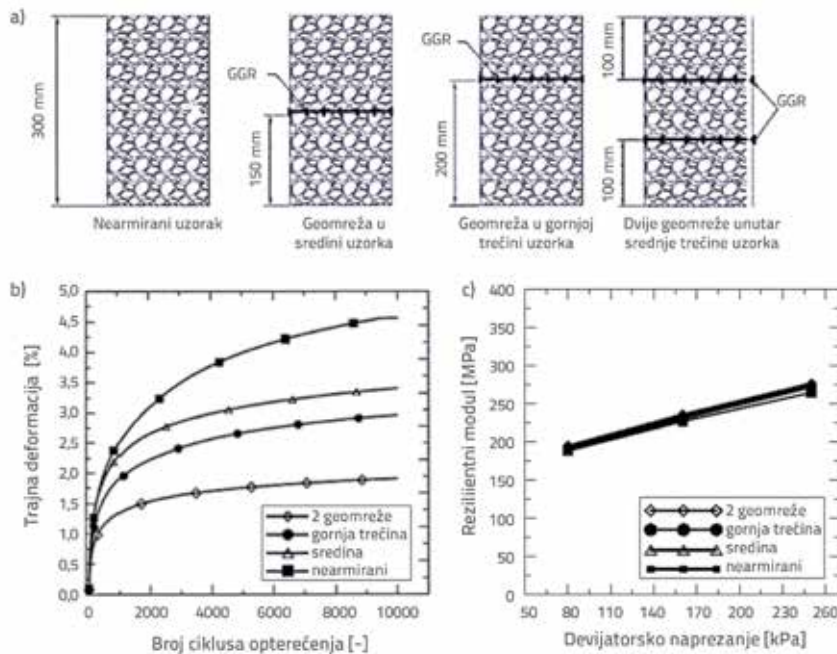
nosivog sloja i razinama očekivanog prometnog opterećenja [2] te čvrstoći podloge [11], može se zaključiti da je za ispitivanje učinkovitosti djelovanja geomreže dobra pozicija sredina visine uzorka.

Usporedbama rezultata ispitivanja s jednom geomrežom ili s više njih, pokazalo se da uvijek dva sloja ili više slojeva bolje utječu na smanjenje trajnih deformacija. Tako Nazzal [41] te Abu-Farsakh i ostali [43] utvrđuju prednost primjene dviju geomreža (u odnosu na samo jednu, slika 5.). Nair i Latha [45] provode ispitivanja na uzorcima armiranim s pomoću dvije, tri, četiri i pet geomreža. Iz dobivenih rezultata utvrđuju prednosti primjene do tri geomreže, dok s daljnjim povećanjem slojeva geomreže nije postignuta znatna dodatna učinkovitost, stoga navode da optimalan broj slojeva geomreže treba odabrati vodeći računa o postignutim učincima poboljšanja, ali i o ekonomičnosti. Iako je u radu [45] prikazana prednost primjene tri sloja geomreže, potrebno je voditi računa o uvjetima i mogućnostima ugradnje tog broja geomreža u nosivim slojevima kolničkih konstrukcija na terenu, gdje se ipak ugrađuje do dva sloja armature, a najčešće jedan. Također je potrebno imati na umu da su geomreže u uzorcima ispitanim cikličkim troosnim posmikom ugrađene na međusobno vrlo malo udaljenosti (zbog manje dimenzije uzoraka), u odnosu na uvjete na terenu, gdje se geomreže polažu na udaljenosti 25-50 cm ovisno o debljini slojeva i tipu konstrukcije.

3.1.3. Veličina otvora geomreže

Ostvarenje mehanizma ukleštenja u velikoj mjeri ovisi o omjeru veličine otvora geomreže u odnosu na granulometrijski sastav tla u koje se ugrađuje. Često se promatra duljina rebra u odnosu na

karakterističnu veličinu zrna (D_{50} , od kojeg 50 % zrna u uzorku ima manji promjer), čime se želi ustanoviti optimalan odnos veličine otvora geomreže u odnosu na granulometrijski sastav tla. Ako su promatrani omjeri preveliki ili premali u odnosu na optimalan odnos, postoji mogućnost da se neće ostvariti najbolje ukleštenje i posljedično tomu znatno ojačanje ili stabilizacija tla (slika 4.). U istraživanjima [7, 8, 56-60] zabilježeni optimalni omjeri veličine otvora geomreže i karakterističnog zrna su različiti i u rasponu su od približno $1,2 \times D_{50}$ [58] pa do više od $3,5 \times D_{50}$ [61, 62]. Međutim, navedeni omjeri rezultat su istraživanja provedenih drugim pokusima i/ili numeričkim analizama u statičkim ili cikličkim uvjetima opterećenja. U istraživanju cikličkim troosnim posmikom, koje su proveli Kim i ostali [49], na uzorcima drobljenca (drobljeni kamen tri različita granulometrijska sastava s $D_{50} = 2,82$ mm, 5,88 mm i 9,27 mm)

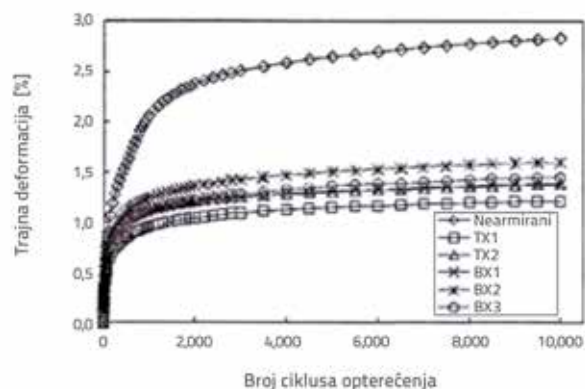


Slika 5. Rezultati ispitivanja cikličkim troosnim posmikom za različiti položaj i broj geomreža u uzorku; a) Položaj ugradnje geomreža u uzorak; b) akumulirane trajne deformacije; c) vrijednosti rezilijentnih modula, prema [41]

stabiliziranog geomrežom u sredini visine uzorka (dvije različite troosne geomreže, duljine rebara 33 i 40 mm) ostvarena je najmanja akumulacija trajnih deformacija nakon 2500 ciklusa opterećenja za uzorak s $D_{50} = 5,88$ mm i geomrežu duljine rebra 33 mm. Za navedeni rezultat omjer A/D_{50} iznosi približno 3,2 (A je definiran kao ekvivalentna veličina otvora jednaka promjeru upisane kružnice, prema kriteriju iz [58]). Za isti je uzorak zabilježena i najveća brzina prolaska posmičnih valova, što Kim i ostali [49] pripisuju mogućem optimalnom omjeru udjela šljunka i pijeska (G/S) u uzorku, čime je omogućeno bolje uklještenje čestica u otvore geomreže ($G/S = 1,63$). U preostalim istraživanjima cikličkim troosnim posmikom navedenim u tablici 1. nisu dane korelacije granulometrijskog sastava i veličine otvora geomreže. Manjak istraživanja odnosa granulometrijskog sastava uzorka i veličine otvora geomreže pokusom cikličkog troosnog posmika može se opravdati činjenicom i da postoje određena ograničenja u vidu najvećih dimenzija uzoraka koji se ispituju (standardne dimenzije uzoraka su promjera 150 mm i visine 300 mm) i ograničenja maksimalne veličine zrna, odnosno granulometrijskog sastava materijala (prema [20, 25] najveće zrno treba biti manje od 1/5 promjera uzorka). Zbog tog ograničenja, komercijalno dostupne geomreže ugrađene u takvim uzorcima mogu imati veće veličine otvora od optimalnih u odnosu na karakterističnu veličinu zrna (D_{50}). Kako bi se svladala nametnuta ograničenja za ispitivanje interakcije geomreže i nekoherentnog tla ili drugih materijala, potrebne su određene prilagodbe u smislu izmjena dimenzija geomreže (veličine otvora), što se postiže posebnom proizvodnjom geomreža koje se koriste u ispitivanjima. Zabilježena je izrada prilagođenih geomreža pletenjem [63] i zavarivanjem [64], iako u navedenim istraživanjima [63, 64] nije provedeno ispitivanje cikličkim troosnim posmikom.

3.1.4. Oblik otvora geomreže

Budući da se u nosive slojeve kolničke konstrukcije ugrađuju i dvoosne i troosne geomreže, postoji nekoliko istraživanja pokusom cikličkog troosnog posmika koja su provedena s ciljem utvrđivanja najpogodnijega geometrijskog oblika otvora geomreže. Abu-Farsakh i ostali [43] su proveli ispitivanja na pet različitih geomreža (tri dvoosne i dvije troosne geomreže) i utvrdili manje vrijednosti trajnih deformacija na uzorcima armiranim troosnim geomrežama (slika 6.). U istraživanjima [34, 44, 46] također se bilježe manje trajne deformacije na uzorcima armiranim troosnim geomrežama u odnosu na uzorke armirane dvoosnim geomrežama (u tablici 1. prikazan je položaj i broj promatranih geomreža te klasifikacijski simbol materijala u koji su geomreže ugrađene). Byun i ostali [48] bilježe veće module posmika u uzorku s troosnom geomrežom u odnosu na uzorak s ugrađenom dvoosnom geomrežom. No, potrebno je imati na umu da je pri usporedbama komercijalno dostupnih geomreža teško izdvojiti i promatrati samo utjecaj jednog parametra na interakciju s tlom, kao što je primjerice geometrija otvora, budući da i krutost geomreže te oblik i dimenzije rebara utječu na pogodnost interakcije.



Slika 6. Razvoj trajnih deformacija s brojem ciklusa opterećenja za nearmirani uzorak i uzorke armirane s dvoosnim (BX) i troosnim (TX) geomrežama (preuzeto i prevedeno iz [43])

3.1.5. Krutost geomreže

Iz rezultata ispitivanja cikličkim troosnim posmikom pokazalo se da su uzorci armirani s geomrežama veće vlačne krutosti pokazali bolje rezultate [40, 41, 43, 46]. Kamel i ostali [40], usporedbom rezultata s dvije različite geomreže i tri različite vrste tla bilježe smanjenje trajnih deformacija od 18 do 44 % kod uzoraka armiranih geomrežama veće vlačne krutosti. Nazzal [41] provodi opširno istraživanje na pet geomreža različitih krutosti na vlak s različitim položajima geomreža u uzorku i s jednim ili dva sloja geomreža, pri čemu navodi prednosti krućih geomreža na određenim položajima u uzorku. Abu-Farsakh i ostali [43] promatraju dvije troosne geomreže jednake veličine otvora, ali različite krutosti, te tri dvoosne geomreže različite krutosti. Iz prikazanih rezultata toga istraživanja na slici 6. vidi se da je najmanja akumulacija trajnih deformacija bila za troosnu geomrežu (na slici 6. označeno s TX1), koja je ujedno imala veću vlačnu krutost, a najveća akumulacija trajnih deformacija u armiranim uzorcima zabilježena je za uzorak armiran s dvoosnom geomrežom manje vlačne krutosti (na slici 6. označeno s BX2, geomreže BX1 i BX2 imaju jednaku dimenziju otvora, a različite krutosti). Rezultati istraživanja cikličkim troosnim posmikom u skladu su s rezultatima istraživanja provedenim na modelima u laboratoriju [13, 65, 66] gdje su zabilježene prednosti geomreža većih krutosti.

3.2. Značajne spoznaje iz objavljenih rezultata istraživanja cikličkim troosnim posmikom

Rezultati provedenih istraživanja [6, 41, 43] pokazali su da ugradnja geomreža u uzorke utječe na smanjenje trajnih vertikalnih deformacija uzoraka, što se nije moglo reći za porast rezilijentnih modula, koji ili nije bio zabilježen ili je bio neznan. Na slici 5.c može se vidjeti neznan povećanje vrijednosti rezilijentnih modula s primjenom geomreža, a u slučaju akumuliranih trajnih deformacija (slika 5.b) doprinos je geomreže izraženiji. Kamel i ostali [40] i Rahman i ostali [34]

bilježe smanjenje vertikalnih trajnih i elastičnih deformacija na uzorcima armiranim geomrežama u odnosu na nearmirane uzorke. Gu [46] navodi da je utjecaj geomreže na rezilijentni modul veći pri relativno niskim razinama naprežanja. Byun i ostali [48] bilježe niže vrijednosti rezilijentnih modula ispitanih pokusom cikličkog troosnog posmika za armirane uzorke u odnosu na nearmirani uzorak i zaključuju, kao i [67], da se tako utvrđeni rezilijentni moduli ne mogu koristiti za određivanje učinka geomreže u stabilizaciji nekoherentnog materijala. Iako su se ispitivanja cikličkim troosnim posmikom prema aktualnim normama pokazala pogodnima za utvrđivanje rezilijentnih modula i trajnih deformacija (nearmiranih) materijala koji se ugrađuju u nosive slojeve kolničke konstrukcije, u slučaju uzoraka armiranih geomrežama, ispitivanja su zasad pogodna samo za utvrđivanje trajnih deformacija. Stoga se za utvrđivanje krutosti kompozita možda mogu primijeniti druga ispitivanja, kao što je, primjerice, ciklički (izravni) posmik za koji su Han i ostali [67] pokazali mogućnost primjene za armirano tlo.

Većina istraživanja navedena u ovom radu provedena je na uzorcima visine 300 mm i 150 mm promjera, pri čemu možda nije ostvarena interakcija geomreže i nekoherentnog materijala kakva bi se ostvarila na terenu. Perkins i ostali [6] iz usporedbe rezultata ispitivanja cikličkim troosnim posmikom na nearmiranom uzorku manjih dimenzija (visina 204 mm i promjer 102 mm) s rezultatima ispitivanja na nearmiranom uzorku većih dimenzija (visina 600 mm i promjer 300 mm), utvrđuju ujednačenost u vrijednostima rezilijentnih modula te navode mogućnost da veličina uzorka nema utjecaj na vrijednosti rezilijentnih modula. Međutim, navedeni zaključak se odnosi na nearmirane uzorke. Također, konvencionalne veličine uzoraka diktiraju i veličine najvećeg zrna u uzorku, koje su manje od veličine zrna koje će se ugraditi u konstrukciju, što također utječe na pogodnost interakcije nekoherentnog tla s geomrežama.

4. Komentar na istraživanja nekoherentnog tla armiranog geomrežama u troosnom posmiku s cikličkim opterećenjem

Prikazani pregled dosadašnjih istraživanja ponašanja nekoherentnog tla armiranog geomrežama u cikličkom troosnom posmiku obuhvatio je istraživanja koja su uglavnom vezana za nosive slojeve kolničkih konstrukcija. Po karakteru opterećenja koje se preko kotača vozila prenosi u nosive slojeve kolničke konstrukcije, troosni posmik je za laboratorijsko ispitivanje nekoherentnog tla armiranog geomrežama pogodniji od izravnog posmika ili pokusa izvlačenja. Za trajnost i dobru funkcionalnost prometnice važan je rezilijentni modul i deformacija nosivih slojeva. Zbog toga je cikličko opterećenje nužno primijeniti u troosnom posmiku kojemu nije cilj dovesti uzorak do sloma nego ustanoviti deformacije i module nakon dovoljnog broja ciklusa opterećenja. Dio dosadašnjih istraživanja pokazao je da se rezilijentni modul ne povećava

s primjenom geomreža, ali da se smanjuju trajne deformacije uzorka. Kao što je napomenuto, laboratorijska ispitivanja ne mogu na pravi način oponašati stvarnu konstrukciju pogotovo kada se povećava broj ravnina s geomrežom u uzorku jer takva situacija ne postoji u izvedbi tih konstrukcija kada su razmaci geomreža mnogo veći od onih u uzorku u uređaju za troosni posmik. Modelska ispitivanja i ispitivanja na prometnicama pokazuju veliku učinkovitost armiranja nosivih slojeva na bolje ponašanje kolničke konstrukcije i u smislu manjih kolotruga i u smislu manjih troškova održavanja. To znači da se poboljšavaju mehanička svojstva nosivih slojeva armiranjem, a to se u laboratorijskim ispitivanjima na najčešćim dimenzijama uzoraka u troosnom cikličkom posmiku (visina 150 mm i promjer 300 mm) ne može jasno utvrditi. Pretpostavlja se da će se pojavom uređaja većih dimenzija (danas su komercijalno dostupni za veličinu uzoraka 300 x 600 mm, pa čak i većih dimenzija za istraživačke svrhe) moći bolje oponašati stvarni uvjeti koji odgovaraju izvedbi i uporabi konstrukcije od armiranog tla. Očekuje se da će se pojavom uređaja za ciklički troosni posmik na uzorcima većih dimenzija i primjenom novih metoda mjerenja (primjerice mjerenje brzine prolaska valova u uzorku) moći bolje nego danas ostvariti potrebna saznanja o ponašanju armiranog nekoherentnog tla za nosive slojeve kolničkih konstrukcija.

5. Zaključak

Pokus cikličkim troosnim posmikom standardno se primjenjuje za utvrđivanje rezilijentnih modula i trajnih deformacija materijala nosivih slojeva koji služe za utvrđivanje prihvatljivosti promatranog materijala i projektiranje kolničke konstrukcije. Zbog sve učestalije primjene geomreža u nosivim slojevima kolničkih konstrukcija, pokusom cikličkog troosnog posmika se posljednjih dvadesetak godina nastoji ispitati doprinos geomreže povećanju nosivosti nosivih slojeva varirajući građu, broj i položaj geomreže u ispitnom uzorku. Provedena istraživanja su pokazala neznatan ili nikakav utjecaj geomreže na poboljšanje rezilijentnog modula, ali je zato zabilježen doprinos u smanjenju akumuliranih trajnih deformacija. Pokazuje se da položaj geomreže značajno utječe na njezinu učinkovitost. Uzorci s većim brojem geomreža bilježe veću redukciju trajnih deformacija, pri čemu se više od tri geomreže u uzorku pokazalo suvišnim. Sva analizirana istraživanja su zabilježila veću učinkovitost geomreža veće vlačne krutosti i trokutne geometrije otvora. Međutim, geomreže na kojima su provedena promatrana ispitivanja imale su različitu građu (dimenzije i zaobljenosti rebara, krutosti, oblici otvora), a u istraživanjima nije promatran utjecaj pojedinog elementa. Buduća istraživanja trebalo bi provesti na većim uzorcima, primjenjujući suvremenije metode mjerenja (brzine valova) i pokušati razlučiti utjecaje elemenata građe i krutosti na učinkovitost geomreže.

LITERATURA

- [1] Han, J.: Recent advances in geosynthetic stabilization of roads: Terminologies, products, and mechanisms, The 6th Regional Conference on Geosynthetics, New Delhi, India, pp. 13, 2016.
- [2] Perkins, S.W., Ismeik, M.: A Synthesis and Evaluation of Geosynthetic-Reinforced Base Layers in Flexible Pavements: Part I, *Geosynthetics International*, 4 (1997) 6, pp. 549-604.
- [3] HRN EN ISO 10318-1:2015 Geosintetici – 1.dio: Nazivi i definicije (ISO 10318-1:2015; EN ISO 10318-1:2015)
- [4] HRN EN ISO 10318-1:2015/A1 Geosintetici – 1.dio: Nazivi i definicije (ISO 10318-1:2015/Amd 1:2018; EN ISO 10318-1:2015/A1:2018)
- [5] Mulabdić, M., Minažek, K., Kaluđer, J.: Geogrids - what is important, Road and Rail Infrastructure V, (Ed. Lakusic. S.), Proceedings of the Fifth International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2018, Zadar, Croatia, pp. 215-221, 2018.
- [6] Perkins, S.W., Christopher, B.R., Cuelho, E.L., Eiksund, G.R., Hoff, I., Schwartz, C.W., Svano, G., Want, A.: Development of Design Methods for Geosynthetic Reinforced Flexible Pavements, FHWA Report DTFH61-01-X-00068, pp. 263, 2004.
- [7] McDowell, G.R., Harireche, O., Konietzky, H., Brown, S.F., Thom, N.H.: Discrete element modelling of geogrid reinforced aggregates, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering 159, pp. 35-48, 2006.
- [8] Minažek, K.: Modelsko ispitivanje interakcije geomreže i tla, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, pp. 278, 2010.
- [9] Cook, J., Horvat, F.: Assesment of particle confinement within mehnacially stabilised layer. Proceedings of the 10th International Conference on Geosynthetics, Berlin, Germany, pp. 4, 2014.
- [10] HRS ISO/TS 13434:2014 Geosintetici – Smjernice za procjenu trajnosti (ISO/TS 13434:2008)
- [11] Haas, R., Walls, J., Carroll, R.G.: Geogrid reinforcement of granular bases in flexible pavements, *Transportation Research Record* 1188 (1988), pp. 19-27.
- [12] Barksdale, R.D., Brown, S.F., Chan, F.: Potential benefits of geosynthetics in flexible pavement systems, National Cooperative Highway Research Program Report No. 315, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, USA, pp. 56., 1989.
- [13] Miura, N., Sakai, A., Taesiri, Y., Yamanouchi, T., Yasuhara, K.: Polymer Grid Reinforced Pavement on Soft Clay Grounds, *Geotextiles and Geomembranes*, 9 (1990) 1, pp. 99-123.
- [14] Webster, S.L.: Geogrid Reinforced Base Courses For Flexible Pavements For Light Aircraft, Test Section Construction, Behavior Under Traffic, Laboratory Tests, and Design Criteria, Technical Report GL-93-6, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, USA, pp. 86, 1993.
- [15] Moghaddas-Nejad, F., Small, J.C.: Effect of Geogrid Reinforcement in Model Track Tests on Pavements, *Journal of Transportation Engineering*, 122 (1996) 6, pp. 468-474.
- [16] Vinson, T.S., Rooney, J.W.: Mechanistic design of Asphalt Concrete Pavements in Cold Regions (Section 6), *Roads and Airfields in Cold Regions - A State of the Practice Report* prepared by the Technical Council on Cold Regions Engineering, eds. T.S. Vinson, J.W. Rooney & W.H. Haas, ASCE press, pp. 151-202, 1996.
- [17] Zornberg, J., Gupta, R.: Geosynthetics in pavements: North American contributions, 9th International Conference on Geosynthetics - Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World, ICG 2010, Brazil, pp. 379-398, 2010.
- [18] Christopher, B.R., Schwartz, C., Boudreau, R.: *Geotechnical Aspects of Pavements*, FHWA Publication No. FHWA-NHI-05-037, U.S. Department of Transportation, National Highway Institute, Federal Highway Administration, Washington, DC, 2006, updated 2017.
- [19] Brecciaroli F., Kolisoja P.P.: Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading literature review, Finnish Rail Administration, A5/2006, pp. 201, 2006.
- [20] EN 13286-7: 2004 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures Comité Européen de Normalisation
- [21] Seed, H.B., Chan, C.K., Monismith, C.L.: Effects of Repeated Loading on the Strength and Deformation of Compacted Clay, Proceedings of the Thirty-Fourth Annual Meeting of the Highway Research Board, No. 34, pp. 541-558, 1955.
- [22] Seed, H.B., McNeill, R.L.: Soil Deformation in Normal Compression and Repeated Loading Tests, *Highway Research Board Bulletin* 141 (1956), pp. 44-53.
- [23] Dunlap, W.A.: A Mathematical Model Describing the Deformation Characteristics of Granular Materials, Technical Report 1, Project 2-8-62-27 (HPS-1-27), Texas Transportation Institute Texas A & M University, Texas, pp. 44, 1963.
- [24] Morgan, J.R.: The response of granular materials to repeated loading, Proceedings, Third Conference of the Australian Road Research Board, Sydney, Australia, pp. 1178-1192, 1966.
- [25] AASHTO T 307-99 2012 Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials
- [26] NCHRP 1-28A 2004 Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design Issue 285 Transportation Research Board
- [27] AG/PT/T053 2007 Determination of permanent deformation and resilient modulus characteristics of unbound granular materials under drained conditions
- [28] Hicks, R.G., Monismith, C.L.: Factors influencing the resilient properties of granular materials, *Highway Research Record* 345 (1971), pp. 15-31.
- [29] Allen, J.J.: The Effects of Stress History on the Resilient Response of Soils, Technical Report CERLTR-M-49, U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, Illinois, USA, pp. 218. 1973.
- [30] Boyce, J.R.: The behaviour of a granular material under repeated loading, PhD thesis, University of Nottingham, pp. 186, 1976.
- [31] Boyce, J.R., Brown, S.F., Pell, P.S.: The resilient behaviour of a granular material under repeated loading, Proceedings of the 8th Conference of the Australian Road Research Board Vol 8, Perth, Australia, pp. 12, 1976.
- [32] Grégoire, C., Dethy, B., Theys, F., Gomes Correia, A.: Performance assessment and ranking of natural and recycled granular materials for road subbase layers by precision cyclic triaxial testing (EN 13286-7), Proceedings Ninth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields Vol 2, Trondheim, Norway, pp. 10, 2013.
- [33] Gabr, A.R., Mills, K.G., Cameron, D.A.: Repeated Load Triaxial Testing of Recycled Concrete Aggregate for Pavement Base Construction, *Geotechnical and Geological Engineering*, 31 (2013) 1, pp. 119-132.
- [34] Rahman, M., Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M., Imteaz, M.: Resilient modulus and permanent deformation responses of geogrid-reinforced construction and demolition materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26 (2014) 3, pp. 512-519.

- [35] Arisha, A.M., Gabr, A.R., El-Badawy, S.M., Shwally, S.A.: Performance Evaluation of Construction and Demolition Waste Materials for Pavement Construction in Egypt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30 (2018) 2: 04017270.
- [36] Yoshida, N.: Resilient Poisson's ratio of hydraulic, graded iron and steel slag base-course material for pavement response analysis, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 67 (2011) 1, pp. 38-46.
- [37] Ali, M.M.Y., Arulrajah, A., Disfani, M.M., Piratheepan, J.: Suitability of Using Recycled Glass - Crushed Rock Blends for Pavement Subbase Applications, *Geo-Frontiers Congress 2011, ASCE 2011, Dallas, Texas, United States*, pp. 1325-1334, 2011.
- [38] Al-saedi, M., Chegenizadeh, A., Nikraz, H.: Dynamic properties of crushed glass and tyre rubber in unbound pavement applications, *Australian Geomechanics Journal*, 53 (2018) 4, pp. 119-133.
- [39] Moghaddas-Nejad, F., Small, J.: Resilient and Permanent Characteristics of Reinforced Granular Materials by Repeated Load Triaxial Tests, *Geotechnical Testing Journal*, 26 (2003), pp. 152-166.
- [40] Kamel, M.A., Chandra, S., Kumar, P.P.: Behaviour of Subgrade Soil Reinforced with Geogrid, *The International Journal of Pavement Engineering*, 5 (2004) 4, pp. 201-209.
- [41] Nazzal, M.: Laboratory characterization and numerical modeling of geogrid reinforced bases in flexible pavements, doktorska disertacija, Louisiana State University, pp. 325, 2007.
- [42] Wayne, M., Boudreau, R.L., Kwon, J.: Characterization of Mechanically Stabilized Layer by Resilient Modulus and Permanent Deformation Testing, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2204 (2011), pp. 76-82.
- [43] Abu-Farsakh, M., Souci, G., Voyiadjis, G., Chen, Q.: Evaluation of Factors Affecting the Performance of Geogrid-Reinforced Granular Base Material Using Repeated Load Triaxial Tests, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24 (2012) 1, pp. 72-83.
- [44] Qian, Y., Mishra, D., Tutumluer, E., Kwon, J.: Comparative evaluation of different aperture geogrids for ballast reinforcement through triaxial testing and discrete element modeling, *Proceedings of geosynthetics 2013, Long Beach, California*, pp. 10, 2013.
- [45] Nair, M.A., Latha, G.M.: Large Diameter Triaxial Tests on Geosynthetic-Reinforced Granular Subbases, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (2014) 4, pp. 8.
- [46] Gu, F.: Characterization and Performance Prediction of Unbound Granular Bases with and Without Geogrids in Flexible Pavements, doktorska disertacija, Texas A & M University, pp. 174, 2015.
- [47] Guthrie, W.S., Knighton, J.T.: Investigation of laboratory test procedures for assessing the structural capacity of geogrid-reinforced aggregate base materials, Report No. UT-16.11, Utah Department of Transportation, pp. 54, 2015.
- [48] Byun, H.Y., Tutumluer, E., Feng, B., Kim, J.H., Wayne, M.H.: Horizontal stiffness evaluation of geogrid-stabilized aggregate using shear wave transducers, *Geotextiles and Geomembranes*, 47 (2019) 2, pp. 177-186
- [49] Kim, J.H., Kang, M., Byun, Y.H., Qamhia, I., Tutumluer, E., Wayne, M.: Bender Element Shear Wave Measurement Based Local Stiffness Characteristics Related to Permanent Deformation Behavior of Geogrid-Stabilized Aggregate Specimens, *Geo-Congress 2020: Geotechnical Earthquake Engineering and Special Topics*, Minneapolis, USA, pp. 517-526, 2020.
- [50] Kwon, J., Wayne, M., Norwood, G.J., Tingle, J.S.: The implementation of findings from accelerated pavement testing in pavement design and construction practice, *Advances in pavement design through full-scale accelerated pavement testing: Proceedings of the 4th international conference on accelerated pavement testing*, Davis, USA, pp. 425-431, 2012.
- [51] Giroud, J.P.: An assessment of the use of geogrids in unpaved roads and unpaved areas, *Proceedings of the Jubilee Symposium on Polymer Geogrid Reinforcement*, Institutions of Civil Engineers, London, pp. 23-36, 2009.
- [52] Langfelder, L.J., Nivargikar, V.R.: Some factors influencing shear strength and compressibility of compacted soils, *Highway Research Record* 177 (1967), pp. 4-21.
- [53] Lekarp, F., Isacsson, U., Dawson, A.: State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates, *Journal of Transportation Engineering*, 126 (2000) 1, pp. 66-75.
- [54] Lekarp, F., Isacsson, U., Dawson, A.: State of the Art. II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates, *Journal of Transportation Engineering*, 126 (2000) 1, pp. 76-83.
- [55] Mishra, D., Qian, Y., Kazmee, H., Tutumluer, E.: Investigation of geogrid-reinforced railroad ballast behavior using large-scale triaxial testing and discrete element modeling, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2462 (2014), pp. 98-108.
- [56] Kwan, C.C.J.: Geogrid reinforcement of railway ballast, doktorska disertacija, University of Nottingham, UK, pp. 195, 2006.
- [57] Qian, Y., Tutumluer, E., Huang, H.: A validated discrete element modeling approach for studying geogrid-aggregate reinforcement mechanisms, *Proceedings GeoFrontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, Geotechnical Special Publication No. 211, ASCE, pp. 10, 2011.
- [58] Hussaini, S.K.K.: An Experimental Study on the Deformation Behaviour of Geosynthetically Reinforced Ballast, doktorska disertacija, University of Wollongong, Australia, pp. 211, 2013.
- [59] Palmeira, E., Góngora, I.: Assessing the Influence of Some Soil-Reinforcement Interaction Parameters on the Performance of a Low Fill on Compressible Subgrade. Part I: Fill Performance and Relevance of Interaction Parameters, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2 (2016), pp. 17.
- [60] Han, B., Ling, J., Shu, X., Gong, H., Huang, B.: Laboratory investigation of particle size effects on the shear behavior of aggregate-geogrid interface, *Construction and Building Materials*, 158 (2018), pp. 1015-1025.
- [61] Sarsby, R.: The influence of aperture size/particle size on the efficiency of grid reinforcement, *Proceedings of the 2nd Canadian Symposium on Geotextiles and Geomembranes*, Edmonton, Canada, pp. 7-12, 1985.
- [62] Koerner, R.M.: *Designing with geosynthetics*, Fifth Edition, Prentice Hall New Jersey, pp. 816, 2005.
- [63] Ahmadi, M.S., Moghadam, P.P.: Effect of Geogrid Aperture Size and Soil Particle Size on Geogrid-Soil Interaction under Pull-Out Loading, *Journal of textiles and polymers*, 5 (2017) 1, pp. 25-30.3
- [64] Futaki, M., Suzuki, H., Yamato, S.: Super large triaxial compression tests on reinforced sand with high strength geogrid, *Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, The Hague, pp. 759-764, 1990.
- [65] Perkins, S.W.: *Geosynthetic Reinforcement of Flexible Pavements: Laboratory Based Pavement Test Sections*, Federal Highway Administration Report FHWA/MT-99-001/8138, Montana Department of Transportation, pp. 140, 1999.
- [66] Qian, Y., Han, J., Pokharel, S.K., Parsons, R.L.: Performance of triangular aperture geogrid-reinforced base courses over weak subgrade under cyclic loading, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (2013), pp. 1013-1021.
- [67] Han, B., Ling, J., Shu, X., Song, W., Boudreau, R.L., Hu, W., Huang, B.: Quantifying the effects of geogrid reinforcement in unbound granular base, *Geotextiles and Geomembranes*, 47 (2019) 3, pp. 369-376