

Stanislav LENART

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12,
e-naslov: stanislav.lenart@zag.si

Branko CERUT

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12,
e-naslov: branko.cerut@zag.si

Ljubo PETKOVIČ

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12,
e-naslov: ljubo.petkovic@zag.si

Marko BRODNIK

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12,
e-naslov: marko.brodnik@zag.si

PREISKAVE TORNIH LASTNOSTI GEOSINTETIKOV IN DEBELOZRNATIH MATERIALOV

POVZETEK: V prispevku je predstavljena preiskava za ugotavljanje tornih značilnosti z direktnim strižnim preskusom za materiale, katerih velikosti presegajo običajno uporabljane strižne celice. V ta namen je bila na ZAG izdelana strižna celica velikih dimenzij, katere delovanje je opisano v prispevku. Prikazani so rezultati standardnih preiskav treh različnih vrst geosintetikov in rečnega proda.

TESTS OF FRICTION CHARACTERISTICS OF GEOSYNTHETICS AND LARGE GRAIN SIZE UNBOUND GRANULAR MATERIAL

ABSTRACT: Paper presents friction characteristics tests of large grain size unbound granular material using a direct shear apparatus. Large scale direct shear test apparatus was constructed at Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG) for this purpose. Its characteristics and use are described in the paper. Results of standard tests of three types of geosynthetics and river gravel are presented.

UVOD

Direktna strižna preiskava je ena najbolj pogostih in uporabljenih laboratorijskih preiskav v geotehnikih. Z njeno izvedbo dobimo na razmeroma preprost način podatke o efektivni strižni trdnosti zemljine. Ti so potrebni predvsem kot vhodni podatek za stabilnostno analizo. Testni vzorec zemljine vstavimo v aparat za direktni strig, ki ga sestavljata dva toga okvirja. Po predhodni konsolidaciji z izbrano vertikalno silo okvirjema s konstantno hitrostjo vsilimo medsebojni horizontalni pomik. Ob tem merimo tako pomik kot silo, potrebno za striženje. Striženje se izvede z dovolj majhno hitrostjo, da je preko dreniranja omogočeno sprotno disipiranje dodatnih pornih tlakov. Metodo preiskave natančno opiše privzeti slovenski standard SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004. Standard med drugim določa minimalne dimenzije preizkušancev za direktni strig. V primeru kvadratnega preizkušanca mora biti njegova širina najmanj 60 mm in višina najmanj 10 mm.

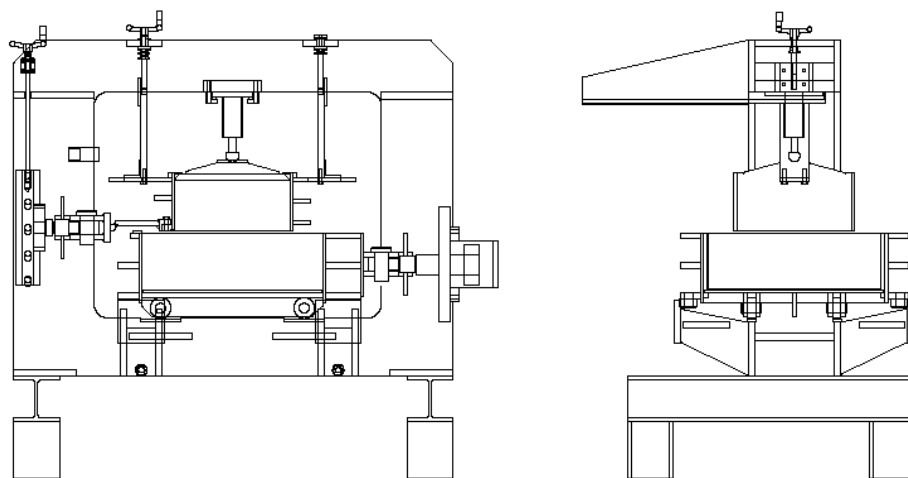
Velikost največjega zrna v preizkušancu, namenjenemu direktni strižni preiskavi, ne sme preseči 1/5 njegove višine. V primeru običajnih dimenzij laboratorijskih aparatov je velikost zrn tako omejena na nekaj milimetrov. To pomeni, da debeložrnatih materialov z maksimalnimi zrn med 16 in 32 mm, ki se običajno uporabljajo za izvedbo različnih zasipov, nasipov, nosilnih plasti prometnic, ipd., v njih ne moremo preizkušati. V ta namen se uporabljajo aparati za direktni strig večjih dimenzij, kjer je širina kvadratnega preizkušanca običajno več kot 300 mm. Abu-Hejleh in sod. (2000) poročajo o primerjalnih testih debeložrnatih materialov z aparati za direktni strig običajnih in večjih dimenzij. Za preiskave v aparatih običajnih dimenzij so bila iz preizkušanca odstranjena nadmerna zrna, kar je v konkretnem primeru (35% gramoza, 54.4% peska in 10.6% melja ter glin) pomenilo odstanitev 35% zrn velikosti gramoza. Primerjava rezultatov obeh vrst testov je pokazala, da odstanitev večjih zrn agregata vodi v podcenitev vrednosti strižne trdnosti izbranega materiala.

Zaradi napisanega se za preskušanje debeložrnatih materialov zdi smiselna uporaba aparatov večjih dimenzij. Temu se še posebej ni mogoče izogniti v primeru preizkušanja tornih lastnosti geosintetikov, ki ga določa standard SIST EN ISO 12957-1:2005. Tudi v tem primeru gre za direktni strižni preizkus, pri katerem pa je na nivoju strižne ravnine v spodnji okvir aparata vpet še geosintetik. Med obremenjevanjem se tako striženje izvaja po horizontalni ravnini med geosintetikom in agregatom v zgornjem okvirju. V ostalih podrobnostih sta priprava in izvedba preizkusa precej podobni tistim v primeru preizkušanja strižnih lastnosti (kot notranjega trenja in kohezija) samega agregata. Glavni namen preizkušanja stika med agregatom in geosintetikom je določitev kota trenja na strižni ploskvi. Običajno velja, da je kot trenja med geosintetikom in agregatom nižji od kota notranjega trenja v samem materialu (Lee in Manjunath, 2000). Poznavanje vrednosti slednjega je potrebno v stabilnostni analizi konstrukcij iz debeložrnatih materialov, brez obeh vrednosti pa ne gre, kadar se analizira stabilnost konstrukcij iz armiranih zemljin. Standard določa, da je velikost okvirjev za preiskave tornih lastnosti geosintetikov in debeložrnatih materialov z direktnim strigom minimalno 300 mm x 300 mm. Glavne težave, ki jih pri teh preiskavah srečujemo, so (Lee in Manjunath, 2000): (1) neuniformiran razpored napetosti zaradi gubanja geosintetika v ravnini striga, (2) zdrs ali zamikanje geosintetika med testom zaradi njegovega neustreznega vpetja v okvir, (3) manjšanje kontaktne površine med geosintetikom in agregatom v zgornjem okvirju med izvajanjem striga in (4) omejeni maksimalni pomiki, ki preprečujejo doseganje rezidualnega stanja preizkušanca med strigom.

OPIS NAPRAVE

Ob zavedanju vseh naštetih težav smo se na Zavodu za gradbeništvo Slovenije (ZAG) lotili izdelave aparata za direktne strižne preiskave velikih preizkušancev. Aparat sestavljata dva toga okvirja dimenzij 400 mm x 400 mm (zgornji) in 600 mm x 600 mm (spodnji). Za večjo dimenzijo spodnjega okvirja smo se odločili z namenom, da omogočimo nespremenljivo kontaktno površino med geosintetikom in agregatom v zgornjem okvirju med izvajanjem striga. Dovolj velika razlika v dimenzijah omogoča, da se zgornji okvir med preiskavo horizontalno premakne za več kot 25% svoje širine, kar normalno zadošča za doseganje rezidualnega stanja. Za potrebe preiskav tornih lastnosti geosintetikov sestavlja aparat tudi toga plošča na vrhu spodnjega okvirja, ki je po potrebi odstranljiva. S pripetjem geosintetika na njo se prepreči njegovo gubanje, zdrs ali zamik med

preiskavo. Zasnova aparata omogoča izvedbo suhih preizkusov kot tudi preizkusov popolnoma zasičenih vzorcev.



Slika 1: Skica aparata za direktne strižne preiskave debeložrnatih materialov in preiskave tornih lastnosti geosintetikov v pogledu iz dveh smeri.

Poseben izziv je predstavljalo zajemanje in krmiljenje preizkusne naprave, ki je opisano v nadaljevanju. Pri njegovi zasnovi smo izhajali iz želje, da je mogoče strižne preizkuse izvajati v skladu z obstoječimi standardi, kot tudi, da pušča proste roke za zahtevnejše raziskovalno delo. Predstavljeni aparat za direktne strižne preiskave tako omogoča neodvisno ciklično obremenjevanje v horizontalni kot tudi v vertikalni smeri. Preizkuševališče za veliki strižni test je sestavljeno iz naslednjih komponent:

Dvosmerni hidravlični bat 50/20 kN – 40 mm za vertikalno obremenitev

Na spodnji strani bata je s pomočjo zgloba, ki deluje v dveh ravninah, pritrjena toga plošča dimenzij 400x400 mm. Na zgornji strani pa je bat pritrjen na sanke, ki omogočajo odstranitev bata v času vgrajevanja materiala v obe celici. Bat je povezan na hidravlični agregat tip Hydropacer proizvajalca Amsler iz Švice. Agregat omogoča statično obremenitev kot tudi dinamično in ima pretok olja 4,2 l/min pri frekvenci 0.44 in 2.2 l/min pri frekvenci 0.88.

Dvosmerni servo-hidravlični bat 200 kN – 100 mm za horizontalno (strižno) silo.

Bat je povezan na hidravlični agregat tip B250 proizvajalca PPT Commerce iz Ljubljane in ima zmogljivost 4,6 l/min. Za krmiljenje hidravličnega bata se uporablja servoventil tip 702-02 proizvajalca Kreuzenach, ki ga krmili PID regulator krmilno-merilne elektronike tip Serija 31. Za izvajanje preiskave je možno krmiljenje horizontalnega pomika ali sile s pomočjo funkcijskega generatorja krmilno-merilne elektronike ali pa iz D/A pretvornika PC-ja s pripadajočo programsko opremo.

Hidravlična agregata za vertikalni in horizontalni bat

Krmilna-merilna elektronika tip Serija 31 proizvajalca Schenck iz Nemčije je modularne izvedbe ter vsebuje ojačevalnike za različne pretvornike, PID regulator, funkcijski generator ter I/O stikala.

Tipala za meritve horizontalne in vertikalne sile ter horizontalnega in vertikalnega pomika:

Meritev vertikalne sile je izvedena s pretvornikom tlaka z območjem 250 bar z resolucijo 0,1 bar v neposredni bližini tlačne komore bata. Meritev vertikalnih deformacij je izvedena s tremi induktivnimi pretvorniki pomika z območjem ± 5 mm z resolucijo 0,1 μ m na premeru 300 mm in zasukanimi med seboj za 120°.

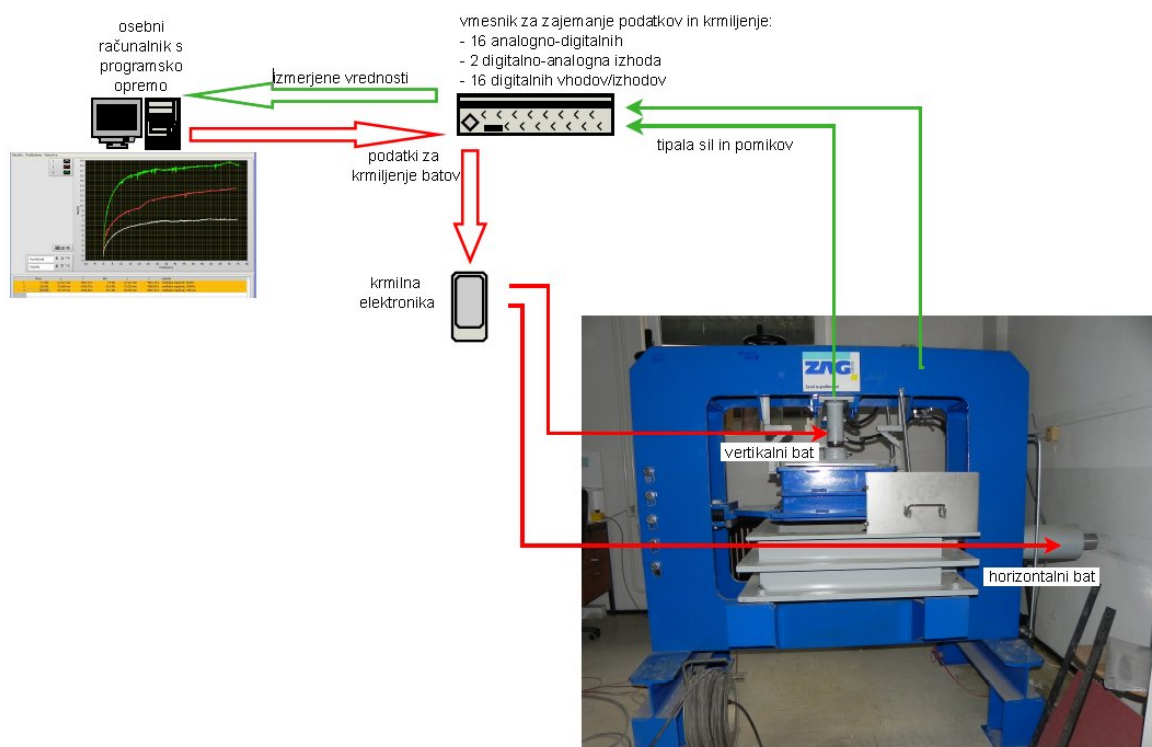
Meritev horizontalne sile je izvedena s tlačno-nateznim pretvornikom sile tip KAF/200kN proizvajalca AST iz Nemčije z resolucijo 0.02kN, meritev pomika bata pa z induktivnim pretvornikom pomika z območjem ± 50 mm z resolucijo 0,5 μ m

Vmesnik za zajemanje podatkov in krmiljenje strižnega preizkusa.

Vmesnik, ki ga trenutno uporabljamo pri preizkusu, je proizvod firme National Instruments, tip USB-6221. Poleg meritve vertikalne in horizontalne sile ter vertikalnega in horizontalnega pomika omogoča meritev še dvanajstih dodatnih tipal. Dva digitalno-analogna pretvornika in šestnajst digitalnih vhodov oziroma izhodov omogoča krmiljenje obeh med seboj neodvisnih hidravličnih batov.

Osební računalnik s programsko opremo

Programska oprema za zajemanje podatkov in krmiljenje preizkusne naprave je narejena z razvojnim orodjem LabView in je nameščena na osebnem računalniku z operacijskim sistemom Windows XP. Trenutno uporabljamo verzijo, s katero zajemamo podatke pri strižnem preizkusu po standardih SIST EN ISO 12957-1:2005 in SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004, pri čemer med preizkusom prikazujemo vrednost vertikalne sile in diagram odvisnosti strižne sile od horizontalnega pomika.



STRIŽNA PREISKAVA

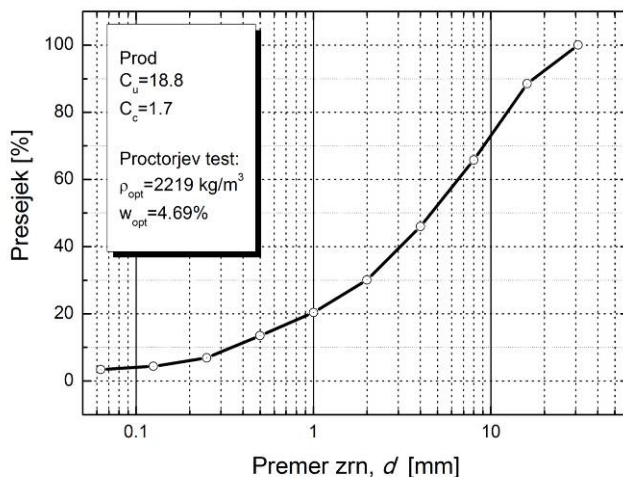
Pogoji preiskave

Z opisanim aparatom za direktni strig smo preiskovali torne lastnosti stika treh vrst geosintetikov z rečnim prodnatim materialom. Vsak stik je bil preizkušan pri treh različnih vertikalnih napetostih; 50, 100 in 150 kPa. Po začetni konsolidaciji preizkušanca na izbrano vertikalno napetost je sledilo horizontalno striženje pri hitrosti 1 mm/min. Med gornjim in spodnjim okvirjem se je med striženjem vzdrževal razmik 0.5 mm. Preizkušanci so bili striženi v nezasičenem stanju, pri vlažnosti agregata enaki optimalni vlažnosti, ugotovljeni s Proctorjevim testom.

Preiskovani materiali

V preiskavah smo uporabili tri vrste geosintetikov - netkan geotekstil (A), tkan geotekstil (B), geomrežo (C), in prodnati rečni material kot agregat. Zrnavostna sestava slednjega skupaj s pripadajočimi parametri je prikazana na sliki 2. Osnovne karakteristike preiskovanih geosintetikov so zbrane v preglednici 1. V vseh testih je bil preizkušavec pripravljen s prodnatim rečnim

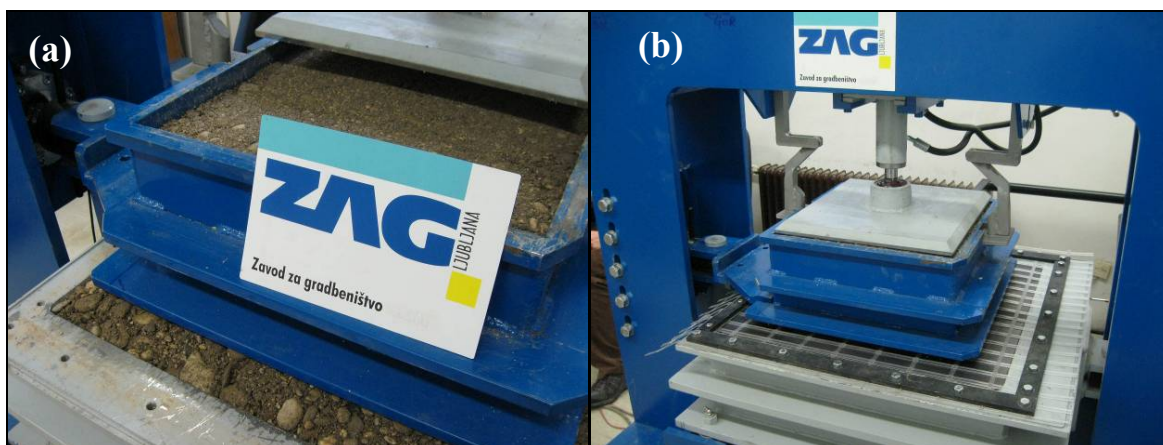
materialom z vlago enako optimalni vlagi ugotovljeni s Prostorjevim testom in nabit na suho gostoto enako približno $\rho_d=1890 \text{ kg/m}^3$, kar ustreza 85% optimalne gostote po Proctorju. Na sliki 3 je prikazan preizkušane, vgrajen v veliki strižni aparat.



Slika 2: Sejalna krivulja agregata, ki je bil uporabljen v preiskavah

Preglednica 1: Vrste in lastnosti preiskovanih geosintetikov

Oznaka	Opis	Gostota	Natezna trdnost	Natezna sila pri 2% raztežku
		[g/m ²]	[kN/m]	[kN/m]
A	netkan geotekstil (polipropilen)	220	-	-
B	tkan geotekstil (polipropilen)	110	-	-
C	geomreža (PES/PET)	580	120	42



Slika 3: Preizkušanci vgrajeni v aparat; (a) prodnati agregat, (b) geomreža

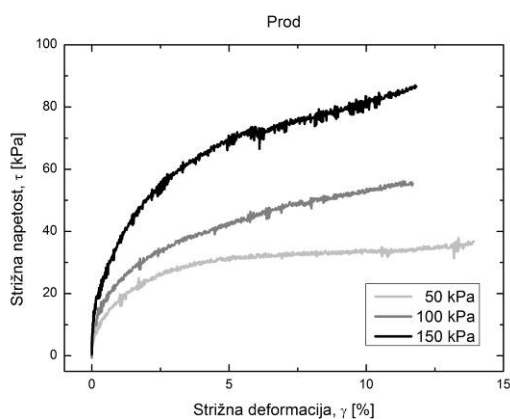
Direktni strig

V nadaljevanju so prikazani rezultati 12 strižnih testov na omenjenih materialih. Rezultati so bolj ali manj pričakovani, vsekakor pa presenečajo nizke strižne karakteristike agregata (slika 5) v

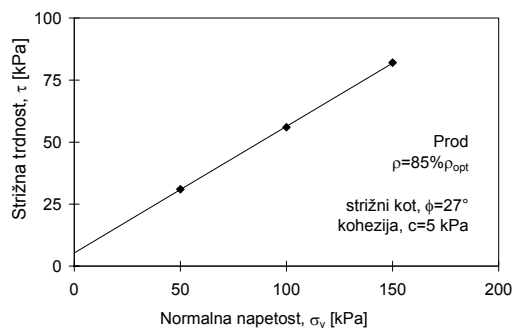
primerjavi s karakteristikami striga po stiku agregata z geosintetiki (slike 7, 9 in 11). To je mogoče razlagati z zelo nizko zgoščenostjo agregata na $85\% \rho_{opt}$. Kot notranjega trenja tako pripravljenega preizkušanca znaša 27° . Drug pomemben faktor vpliva na slabe strižne lastnosti agregata so neravnine strižne ploskve, ki smo jih opazili pri direktnem strigu vzorcev. V primeru striga po stiku agregat-geosintetik teh težav ni, ker je geosintetik pripet na togo podlago. Omenjeno pomanjkljivost testa bomo rešili z rahlo modifikacijo aparata v prihodnosti.

Rezultati preiskav postrežejo z zelo podobnim strižnim obnašanjem stika med agregatom in obema vrstama geotekstila - netkanim geotekstilom A (slika 6) in tkanim geotekstilom B (slika 8). Strižne karakteristike predstavljene na slikah 7 in 9 so praktično identične.

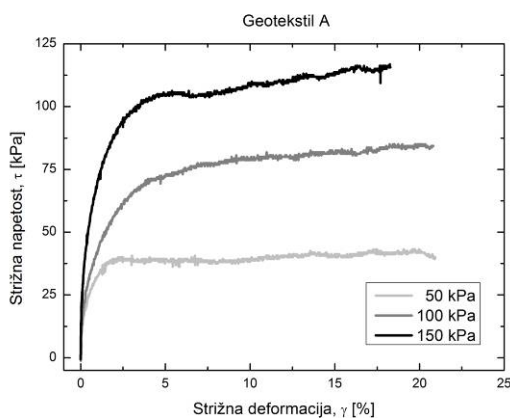
Pričakovano se z najvišjimi strižnimi trdnostmi odreže stik med agregatom in geomrežo (slika 10). Strižni kot v tem primeru doseže vrednost 41° (slika 11).



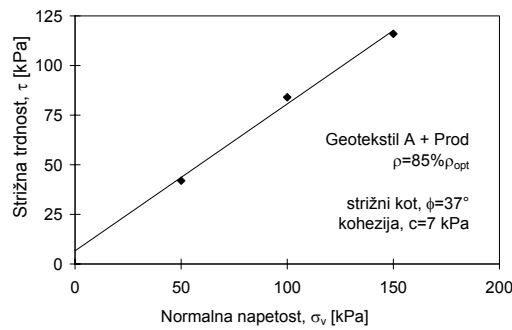
Slika 4: Strižne napetosti v odvisnosti od deformacije v produ zgoščenem na $85\% \rho_{opt}$



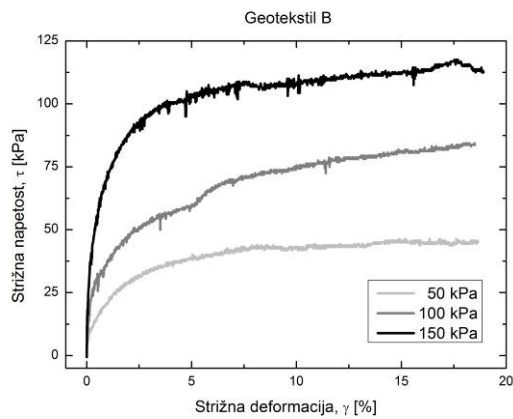
Slika 5: Kot notranjega trenja in kohezija produ zgoščenega na $85\% \rho_{opt}$



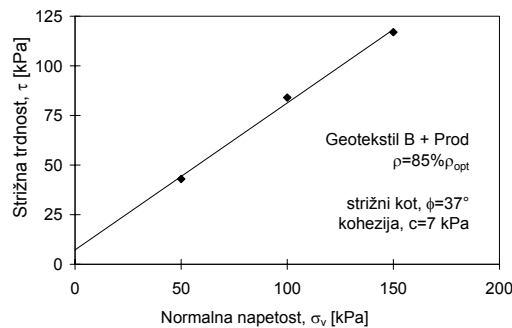
Slika 6: Strižne napetosti v odvisnosti od deformacije (stik netkan geotekstil A in prod pri $85\% \rho_{opt}$)



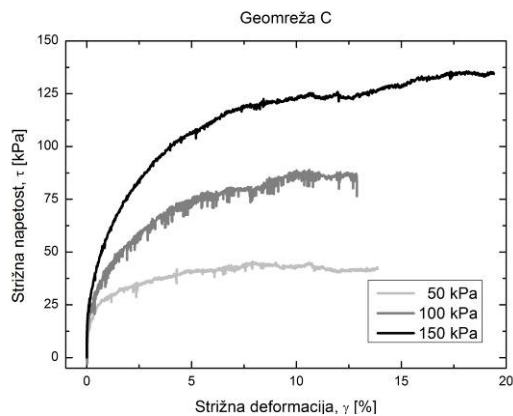
Slika 7: Kot trenja in kohezija na stiku proda zgoščenega na 85% ρ_{opt} in netkanega geotekstila (A)



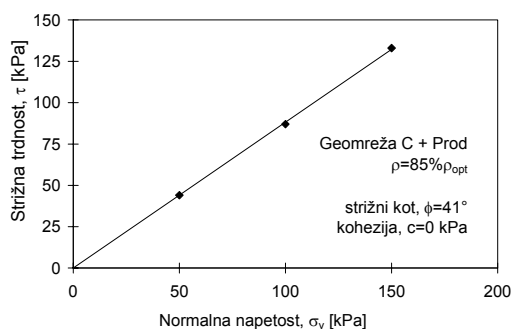
Slika 8: Strižne napetosti v odvisnosti od deformacije (stik tkan geotekstil B in prod pri 85% ρ_{opt})



Slika 9: Kot trenja in kohezija na stiku proda zgoščenega na 85% ρ_{opt} in tkanega geotekstila (B)



Slika 10: Strižne napetosti v odvisnosti od deformacije (stik geomreža C in prod pri 85% ρ_{opt})



Slika 11: Kot trenja in kohezija na stiku proda zgoščenega na 85% ρ_{opt} in geomreže (C)

ZAKLJUČEK

Predstavljen je na Zavodu za gradbeništvo Slovenije razvit aparat za direktne strižne preiskave vzorcev velikih dimenzij. Stranica kvadratnega zgornjega okvirja meri 400 mm, zaradi česar je aparat primeren za testiranje zelo velikih zrn agregata do približno velikosti 40 mm. Aparat omogoča tudi preiskave strižnih lastnosti različnih stikov geosintetik-agregat. Oprema za obremenjevanje dopušča neodvisno statično in dinamično obremenjevanje v horizontalni in vertikalni smeri, preizkušance pa je mogoče preiskovati v nezasičenem ali zasičenem stanju.

V članku so predstavljeni rezultati 12 strižnih preizkusov narejenih na stikih 3 različnih vrst geosintetikov s prodnatim rečnim agregatom. Preiskan je bil tudi kot notranjega trenja in kohezija osnovnega agregata. Ugotovljene so bile višje vrednosti tornih lastnosti stika med geosintetiki in agregatom kot znotraj samega agregata. Razlog za presenetljive rezultate najdemo v zelo slabi zgoščenosti agregata (85% ρ_{opt}) in pojavu neravnin strižne ploskve pri direktnem strigu agregata. Preiskave bomo nadgradili še s testi v zasičenem stanju in z bolj zgoščenim agregatom.

ZAHVALA

Z izdelavo mehanskih delov aparata sta pri razvoju predstavljene opreme sodelovala gospod Murn Jože iz podjetja InUM in gospod Zupančič Jože iz podjetja Ključavničarstvo Zupančič. Za njuno izdatno pomoč in potrpljenje se jima avtorji prispevka najlepše zahvaljujemo.

VIRI

- Abu-Hejleh, N, Wang, T., in Zornberg, J.G. (2000). Performance of geosynthetic-reinforced walls supporting bridge and approaching roadways structures, *Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems using Geosynthetics*, ASCE Geotechnical Spec. Publ. No. 103, 218-243
- Jewell, R.A. (1988). Direct shear tests on sand, Report No. OUEL 1719/88, *Soil Mechanics Report No. 082/88*, University of Oxford
- Lee, K.M. in Manjunath V.R. (2000). Soil-geotextile interface friction by direct shear tests, *Can. Geotech. Journal*. (37), 238-252
- SIST EN ISO 12957-1:2005, Geosintetika - ugotavljanje tornih značilnosti - 1.del: Neposredni strižni preskus
- SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004, Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 10.del: Neposredni strižni preskus