VPLIV ANIZOTROPNEGA NAPETOSTNEGA STANJA NA DEFORMACIJSKE LASTNOSTI PEŠČENIH ZEMLJIN

THE EFFECT OF ANISOTROPIC STRESS STATE UPON THE DEFORMATION PROPERTIES OF SANDY SOIL

Barbara Likar, univ. dipl. inž. grad. doc. dr. Stanislav Lenart, univ. dipl. inž. grad. ZAG, Dimičeva 12, 1000 LJUBLJANA prof. dr. Bojan Majes, univ. dipl. inž. grad. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova cesta 2, 1000 LJUBLJANA Znanstveni članek UDK 624.131:69

Povzetek Napetosti, ki delujejo na vzorec zemljine med standardnim triosnim preizkusom, lahko simulirajo razmere, ki so na določeni globini v temeljnih tleh na sredini simetrične obtežbe, npr. v osi objekta. S tovrstnimi preiskavami pa ni mogoče ustvariti splošnega napetostnega stanja, ki je značilno za temeljna tla zunaj sredin-ske osi objekta. Za takšne anizotropne napetostne pogoje je bil razvit torzijski triosni aparat, v katerem se preiskuje votle vzorce zemljin. V članku so predstavljene raziskave dveh različnih peščenih materialov pri uporabi različnih začetnih efektivnih napetostih v obročni smeri. Vse preiskave so bile vodene deformacijsko po japonskem standardu za določitev deformacijskih lastnosti zemljin s torzijskimi triosnimi preiskavami votlih vzorcev. Preiskave so bile opravljene na Zavodu za gradbeništvo Slovenije (ZAG) v Ljubljani. Rezultati kažejo na velik vpliv anizotropne konsolidacije na strižno togost zemljin.

Ključne besede: triosni torzijski aparat, anizotropno napetostno stanje, deformacijske lastnosti, peščene zemljine

Summary Stresses that can be applied on soil sample tested in a standard triaxial test can simulate conditions at certain depth of foundation soil at the central axis of load, e.g. the central axis of a building. This kind of tests cannot reproduce general stress state, typical for foundation soil outside of central axis of building. A triaxial torsional apparatus was developed to enable such tests at anisotropic stress state. Hollow cylindric specimens are tested in this case. The paper presents the tests made in two different sandy materials with different initial effective circumferential stresses. All tests were run in strain controlled mode like prescribed in the Japanese standard for the determination of deformation properties of soil with the hollow cylinder apparatus. The tests were conducted at Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG) in Ljubljana. The results show a great impact of anisotropic consolidation upon the shear stiffness of soil.

Key words: triaxial torsional apparatus, anisotropic stress state, deformation properties, sandy soil

1 • UVOD

Torzijski triosni aparat za votle vzorce je bil razvit za preiskave zemljin v anizotropnih napetostnih staniih. Možnost dinamične oziroma ciklične vrste obremenjevanja vzorcev omogoča uporabo preiskav s tovrstno opremo za določanie dinamičnih lastnosti zemlijn z anizotropnim začetnim napetostnim stanjem. Takšne preiskave omogočajo študijo obnašanja zemljine med dinamično obtežbo (npr. potres ali prometna obtežba) pod temeljem nekega objekta tudi zunaj njegove osi. Na vertikalno in horizontalno ravnino v teh primerih poleg normalnih efektivnih vertikalnih σ_{v} in horizontalnih σ_{b} napetosti delujejo tudi strižne napetosti τ (slika 1). Rezultirajoče napetosti, ki nastanejo v temeljnih tleh kot posledica različnih vrst obtežb (vertikalni in horizontalni zemeljski pritisk, dodatna obtežba ipd.), lahko predstavimo z glavnimi napetostmi σ_1 in σ_3 (σ_2 zaradi ravninskega primera ne omenjamo), katerih smeri v splošnem ne sovpadajo z vertikalno in horizontalno smerjo, pač pa so lahko poljubno rotirane. Kot zasuka glavnih napetosti od vertikalne smeri označimo z α .

Standardne triosne preiskave omogočajo obremenjevanje vzorcev z glavnimi napetostmi zgolj v vertikalni in horizontalni smeri, ne pa tudi njihove rotacije. Tako je mogoče predstaviti zgolj napetostno stanje v homogenih temeljnih tleh v osi pod simetrično obtežbo. σ_v označuje vertikalno napetost, σ_h pa horizontalno napetost v temeljnih tleh v osi obtežbe. Uporaba torzijskega triosnega aparata za votle vzorce omogoča laboratorijske preiskave zemljin, pri katerih so zahtevani posebni napetostni pogoji. Yamada in Ishihara (Yamada, 1983) sta tako preiskovala vpliv oblike obremenitve na odpornost peskov med dinamičnim obremenjevanjem. Ugotovila sta, da pri vibracijskem tipu potresa nastopi likvifakcija prej, kot če je obremenitev impulznega (udarnega) tipa. Odpornost zemljine na pojav likvifakcije lahko bistveno poveča ali zmanjša prisotnost strižne napetosti v začetnem napetostnem stanju (Higuchi, 2001). Omenjene ugotovitve so bile dodatno potrjene in dopolnjene (Buchheister, 2007) tudi s spoznanji, da ima na obnašanje zemljine med dinamično obremenitvijo vpliv tudi smer obremenjevanja, ki je lahko vertikalna, strižna ali kombinacija obeh. Od načina vzpostavitve začetnega napetostnega stanja, spreminjanja smeri in velikosti glavnih napetosti je odvisen tudi razvoj deformacij (Zdravković, 2001). Tako je pri konsolidaciji, ko je količnik mirnega zemeljskega tlaka $K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \approx \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_v} = 0$ (konsolidacije, kjer so radialne deformacije nične $\varepsilon_h = 0$) in naknadnem obremenjevanju, s katerim je doseženo želeno napetostno stanje, razvoj deformacij odvisen od izbire napetostne poti.



Slika 1 • Splošno napetostno stanje v temeljnih tleh v točki: (i) v sredini osi in (j) zunaj osi objekta

2 • DINAMIČNI TORZIJSKI TRIOSNI APARAT ZA VOTLE VZORCE

Raziskave, ki jih opisujemo v nadaljevanju, so bile opravljene z dinamičnim torzijskim triosnim aparatom za votle cilindrične vzorce Wille Geotechnik v Geomehanskem laboratoriju ZAG Ljubljana (slika 2). Posamezen preizkus je bil v celoti voden z računalniškim programom GEOsys, od faze preplavljanja vzorca do obremenjevanja.

Aparat upravlja servohidravlični sistem. Sestavlja ga tog obremenjevalni okvir višine 3,05 m in mase 1300 kg, ki zagotavlja stabilno lego celice pri dinamičnem obremenjevanju z visokimi frekvencami. Vanj je vpet hidravlični bat, ki omogoča vertikalno in torzijsko obremenjevanje. V okvir postavimo triosno celico s preizkušancem. Tlake v celici se vzpostavlja z elektromehaničnimi volumskimi kontrolniki pritiska (VPC – volume pressure controler), ki so med preiskavo vodeni računalniško in obenem merijo volumske spremembe (slika 3). Tlak v vzorcu in notranji celični tlak (votli vzorec) ustvarjata VPC-ja s kapaciteto 250 ml, medtem ko zunanji celični tlak ustvarja VPC s 1000 ml kapacitete. Vsi VPC-ji imajo zmogljivost 1 MPa in natančnost 0,1 kPa. Rotacija, vertikalni pomik, torzija in vertikalna sila se med preiskavo merijo z zunanjimi merilniki, ki so zunaj celice, in natančnejšimi notranjimi merilniki, ki so znotraj celice oziroma neposredno na preizkušancu. Votel cilindrični vzorec ima višino 200 mm, zunanji premer 100 mm in notranji premer 60 mm. VPLIV ANIZOTROPNEGA NAPETOSTNEGA STANJA NA DEFORMACIJSKE LASTNOSTI PEŠČENIH ZEMLJIN • Barbara Likar, Stanislav Lenart, Bojan Majes





Slika 2 • Torzijski triosni aparat za votle vzorce na ZAG

Slika 3 • Volumski kontrolniki pritiska (VPC)

3 • IZVEDBA PREISKAV

3.1 Napetosti in deformacije v torzijsko obremenjenem votlem preizkušancu

Poljubno napetostno stanje v votlem preizkušancu vzpostavimo s spreminjanjem razmerij med notranjim celičnim tlakom (p_i), zunanjim celičnim tlakom (p_o), vertikalno silo (W) in torzijskim momentom (M_r) (slika 4). Te količine se med preiskavo spreminjajo neodvisno druga od druge. Njihov vpliv na posamezne komponente napetosti, tj. na vertikalno (σ_z), obročno (σ_θ), radialno (σ_r) in strižno ($\tau_{\theta z}$) napetost, je opisan z naslednjimi enačbami:

$$\sigma_z = \frac{W}{\pi (r_o^2 - r_i^2)} + \frac{p_o r_o^2 - p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}$$
(1)

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i}$$
(2)

$$\sigma_r = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i}$$

$$\tau_{\theta z} = \frac{3M_T}{2\pi (r_o^3 - r_i^3)}$$

kjer predstavljata r_o in r_i zunanji in notranji polmer vzorca. Za vertikalno (ε_z), obodno (ε_{θ}), radialno (ε_r) in strižno ($\gamma_{\theta z}$) deformacijo veljajo enačbe:

$$\mathcal{E}_z = \frac{W}{l_0}$$

(3)

(4)

$$\varepsilon_{\theta} = -\frac{u_o + u_i}{r_o + r_i} \tag{6}$$

$$\varepsilon_r = -\frac{u_o - u_i}{r_o - r_i} \tag{7}$$

(5)
$$\gamma_{\theta t} = \frac{2\theta(r_o^3 - r_i^3)}{2H_0(r_o^2 - r_i^2)}$$
 (8)



Slika 4 • Obremenitve in napetosti pri votlem vzorcu

Barbara Likar, Stanislav Lenart, Bojan Majes • VPLIV ANIZOTROPNEGA NAPETOSTNEGA STANJA NA DEFORMACIJSKE LASTNOSTI PEŠČENIH ZEMLJIN

Oznaka *w* predstavlja vertikalni pomik na referenčni dolžini (višini) vzorca I_{α} H_{o} začetno višino vzorca, θ zasuk vzorca v radianih ter u_{o} in u_{i} zunanji in notranji radialni pomik vzorca. Za ugotavljanje vpliva začetnih napetostnih stanj na strižno togost zemljine smo spreminjali vrednost efektivne obročne napetosti (σ'_{θ} glede na konstantno vrednost efektivne vertikalne napetosti (σ'_{z}) in ničelne efektivne strižne napetosti ($\tau_{\theta z}$). Omenjena efektivna obročna napetost predstavlja v dvodimenzionalnem prostoru horizontalno napetost.

3.2 Testni material

Preiskave smo opravljali na dveh vrstah peščenih materialov: umetno sestavljenem enozrnatem pesku (v nadaljevanju pesek z oznako GZ) in naravnem peščenem melju (v nadaljevanju melj z oznako G57).

3.3 Program preiskav

Na vsakem od obeh testnih materialov so bili opravljeni trije testi s 7 do 11 stopnjami obremenjevanja. Preizkušanci so bili pripravljeni po metodi suhega nasipavanja (pesek)



Slika 5 • Sejalni krivulji testnih materialov

		enozrnati pesek, GZ	peščeni melj, G57				
Specifična masa, $ ho_s$	(g/cm ³)	2,637	2,762				
Parametri zrnavostne sestave							
<i>d</i> ₁₀	(mm)	1,3	0,010				
d ₅₀	(mm)	2,2	0,041				
C _u	(-)	2,1	6,2				
C _k	(-)	1,2	1,1				

Preglednica 1 • Nekaj osnovnih lastnosti testnih materialov

		GZ1	GZ2	GZ3	G57-1	G57-2	G57-3
Začetna višina, H _o	(mm)	203	200	201	195	196	199
Notranji polmer, r _i	(mm)	30	30	30	30	30	30
Zunanji polmer, r _o	(mm)	50	50	50	50	50	50
Po začetni konsolidaciji							
Suha gostota, $ ho_{\scriptscriptstyle dc}$	(g/cm ³)	1,677	1,677	1,740	1,416	1,457	1,472
Količnik por <i>, e</i> c	(-)	0,5724	0,5722	0,5156	0,9499	0,8952	0,8761
Vertikalna napetost, σ'_{zc}	(kPa)	100	100	100	100	100	100
Radialna napetost, σ'_{rc}	(kPa)	100	85	115	100	108	115
Obročna napetost, $\sigma' \theta_c$	(kPa)	100	160	40	100	70	40

Preglednica 1 • Geometrijske lastnosti vzorcev in konsolidacijske napetosti

oziroma po sedimentacijski metodi (melj) (Ishihara, 1996), saturirani z uporabo CO₂ in konsolidirani na različna začetna napetostna stanja. Vse preiskave so bile nedredinarane in vodene deformacijsko, kot to zahteva japonski standard JGS 0543-2000 za dinamične torzijske triosne preiskave votlih vzorcev.

Pri vsakem od materialov je bil prvi vzorec izotropno konsolidiran na vrednost efektivne obročne napetosti 100 kPa (GZ1 in G57-1), druga dva vzorca sta bila anizotropno konsolidirana na vrednosti efektivne obročne napetosti 160 kPa (GZ2) in 40 kPa (GZ3) pri pesku ter 70 kPa (G57-2) in 40 kPa (G57-3) pri melju. Geometrijske lastnosti vzorcev pred konsolidacijo in vrednosti konsolidacijskih napetosti so prikazane v preglednici 2.

Končani konsolidaciji so v skladu z omenjenim standardom sledile stopnje obremenjevanja preizkušancev in določanje dinamičnega strižnega modula. Po vsaki stopnji obremenjevanja smo preizkušanec ponovno konsolidirali. Ker so bile preiskave vodene deformacijsko, je bila amplituda strižne deformacije znotraj posamezne stopnje obremenjevanja konstantna, med preiskavo so bile vrednosti enojne amplitude strižne deformacije v intervalu od 7 × 10⁶ do 4 × 10³. Enojna amplituda za vse stopnje je po posameznih preizkušancih prikazana v preglednici 3. V posamezni stopnji je bil vsak preizkušanec obremenjen z enajstimi cikli sinusne obremenitve s frekvenco 1 Hz. Za vsako stopnjo obremenjevanja smo v petem in desetem ciklu na osnovi spreminjanja strižne napetosti ($\tau_{\theta z}$) v odvisnosti od strižne deformacije (γ_{SA}) določili vrednost strižnega modula zemljine (G_{eq}), ki ga predstavlja naklon navidezne premice med skrajnima točkama histerezne zanke (slika 6).

stopnja	GZ1	GZ2	GZ3	G57-1	G57-2	G57-3
1	7,3E-04	3,1E-03	1,8E-04	5,3E-03	2,0E-04	1,8E-04
2	1,2E-03	4,1E-03	2,1E-03	5,6E-03	7,9E-04	7,3E-04
3	4,2E-03	6,2E-03	6,1E-03	6,2E-03	2,0E-03	1,1E-03
4	4,8E-03	1,2E-02	1,2E-02	9,3E-03	5,6E-03	4,1E-03
5	7,6E-03	2,4E-02	2,4E-02	2,2E-02	9,8E-03	5,0E-03
6	1,5E-02	4,6E-02	4,5E-02	4,3E-02	2,0E-02	9,1E-03
7	2,9E-02	9,0E-02	8,9E-02	8,5E-02	3,8E-02	1,9E-02
8	5,7E-02	1,8E-01	1,8E-01	1,7E-01	7,5E-02	3,6E-02
9	1,1E-01	-	3,5E-01	3,4E-01	1 <i>,</i> 5E-01	7,0E-02
10	2,2E-01	-	-	-	2,9E-01	1,4E-01
11	-	-	-	-	-	2,8E-01

Preglednica 3 • Enojna amplituda strižne deformacije γ (%) v posamezni stopnji obremenjevanja preizkušancev

4 • REZULTATI

Glavni parameter, ki nas je zanimal v navedenih preiskavah, je strižni modul zemljine (G_{eq}). Tega smo določili na osnovi izmerjenega odnosa med napetostmi in deformacijami (slika 6). Kot pričakovano, je ta v območju malih deformacij izrazito elastičen. Histerezni zanki v prvem in zadniem ciklu obremenievania sta praktično identični (slika 6a). V kasnejših stopnjah obremenjevanja se deformacije večajo in že lahko prehajajo v plastično območje (slika 6b). Histerezna zanka se značilno razširi, togost preizkušanca pa se z večanjem števila ciklov obremenitve zmanjšuje. Slika 8 kaže tipično upadanje strižnega modula preizkušanca z naraščanjem deformacije. Vidi se, da se v kasnejših stopnjah, tj. pri večji deformaciji, pojavi razlika med strižnim modulom, izmerjenim v začetnih ciklih obremenjevanja, in tistim po več izvedenih ciklih. Neelastičen odziv preizkušancev pri večjih deformacijah lahko opazimo tudi iz sprememb pornih tlakov. Medtem ko ostaja porni tlak pri majhnih deformacijah med cikličnim obremenjevanjem praktično konstanten, je pri večjih deformacijah očitno ciklično spreminjanje njegove vrednosti in postopno naraščanje (slika 7).



Slika 6 • Tipične histerezne zanke, ki nastanejo med obremenjevanjem pri (a) malih in (b) velikih deformacijah







Slika 8 • Tipično spreminjanje strižne togosti preizkušanca v odvisnosti od deformacije in števila ciklov

5 • DISKUSIJA

Vpliv anizotropnega napetostnega stanja na deformacijske lastnosti materialov smo preverjali z medsebojno primerjavo dobljenih strižnih modulov. Ker so se vzorci po končani konsolidaciji med seboj nekoliko razlikovali po gostoti, smo izmerjene strižne module normirali s funkcijo količnika por *F(e)* (Ishihara, 1996).

$$F(e) = \frac{(2,17-e)^2}{1+e}$$
(9)

Iz primerjave, prikazane na sliki 9, lahko ugotovimo, da togosti obeh obravnavanih vrst materialov upadajo z manjšanjem efektivne obročne napetosti. Razlike so največje pri manjših deformacijah in se z njihovim večanjem postopno manjšajo. V območju velikih strižnih deformacij, tj. $\gamma > 1$ %, je togost enaka ne glede na velikost efektivnih obročnih napetosti. Zaradi naraščajočega vpliva ciklične degradacije preiskave niso bile vodene pri deformacijah nad to mejo.



Slika 9 • Primerjava normiranih strižnih modulov (a) peska in (b) melja

6 • SKLEP

Deformacijsko vodene dinamične torzijske triosne preiskave votlih vzorcev so primerne za ugotavljanje vpliva dinamičnega obremenjevanja na lastnosti zemljin. Njihova glavna prednost pred drugimi dinamičnimi preiskavami je oblika vzorcev, ki omogoča vzpostavitev poljubnega realnega napetostnega stanja, kar pomeni boljši približek pogojem v naravi. Rezultat deformacijsko vodenih preiskav je dinamični strižni modul zemljine, uporaben v deformacijski analizi dinamično obremenjenih geotehničnih objektov. Preiskave so potrdile predpostavko o vplivu začetnega napetostnega stanja in njegovih izotropnih oziroma anizotropnih značilnosti na togost zemljin:

- Pri višjih vrednostih začetnih efektivnih obročnih napetosti so dosežene višje vrednosti strižnega modula zemljine.
- Razlika v velikosti strižnega modula zemljine je največja pri majhnih strižnih deformacijah in se z večanjem le-teh manjša.
- Pri velikih strižnih deformacijah (γ > 1 %) razlik v velikosti strižnih modulov ni več in je togost zemljine v tem območju neodvisna od začetnega napetostnega stanja.

7 • ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo za pomoč pri opravljanju preiskav sodelavcem geomehanskega laboratorija Zavoda za gradbeništvo Slovenije.

8 • LITERATURA

Buchheister, J., Laue J., The Influence of Different Stress States on Soil Liquefaction under a Building, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, 25.–28. junij 2007, Paper No. 1311, 2007.

Higuchi, T., Liquefaction and cyclic failure of low plastic silt, PhD Thesis, University of Sheffield, 2001.

Ishihara, K., Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics, Science University of Tokyo, Clarendon Press, Oxford, 1996.

JGS 0543-2000, Method for Cyclic Torsional Shear Test on Hollow Cylindrical Specimens to Determine Deformation Properties of Soil.

Zdravković, L., Jardine, R. J., The effect on anisotropy of rotating the principal sress axes during consolidation, Geotechnique 51, No.1, 69–83, 2001.

Yamada, Y., Ishihara, K., Undrained deformation characteristics of sand in multi-directional shear, Soils and Foundation, 23 (1), 61–79, 1983.