

EDOMETRSKI PREIZKUSI Z MERITVAMI BOČNIH NAPETOSTI

POVZETEK: Edometrski preizkusi zemljin so pomemben del laboratorijskih geomehanskih preiskav. Kljub enostavni preizkusni opremi in izvedbi preizkusa, lahko s preizkusom določimo mnogo različnih parametrov, uporabnih kasneje v geotehničnih analizah. Slabost standardnih edometriških preizkusov je, da z njimi ugotovimo samo enosodne časovno odvisne napetostno - deformacijske odnose; izvedba preizkusa je zamudna; pomanjkljivost preizkusa pa so tudi visoki začetni gradienti pornih tlakov, ki se pojavijo ob vsakem dvigu obremenitev. Zato smo v Laboratoriju za mehaniko tal, na Fakulteti za gradbeništvo, Univerze v Mariboru raziskovali drugačne, nestandardne pristope k izvedbi edometriških preizkusov. Rezultat raziskav je vpeljava meritev bočnih napetosti in zvezno naraščajoče obremenjevanje namesto stopenjskega. Takšne dopolnitve nam omogočajo več možnih variant preizkusov: preizkuse lahko izvajamo stopenjsko ali zvezno, merimo pa vertikalne napetosti, porne tlake in vertikalne deformacije ter dodatno še bočne napetosti, s primerno opremo pa tudi bočne deformacije.

Eksperimentalne izkušnje zadnjih petnajst let so naslednje. Stopenjsko obremenjevanje preizkušancev nam da boljši vpogled v potek konsolidacije in lezenje zemljine, je pa zamudno. Prednost zveznega obremenjevanja preizkušancev je bistveno skrajšan čas preizkusa, slabost tako izvedenih preizkusov pa je lahko hkratno prepletanje različnih pojavov (dvig in disipacija pornih tlakov, lezenje), kar nas ob nezadostnih izkušnjah in poznavanju lastnosti preizkušancev lahko pripelje do zelo popačenih rezultatov. Vpeljava meritev bočnih napetosti nam omogoča vpogled v razmerja bočnih in vertikalnih napetosti (K' and K'_{in}) in določitev izotropnih elastičnih konstitutivnih parametrov E , ν , K , G . To je še posebej koristno kadar edometerske preizkuse dopolnimo s triaksialnimi.

OEDOMETRIC TESTING WITH MEASUREMENT OF RADIAL STRESSES

SUMMARY: Oedometric soil tests represent an important part of geomechanical investigations. In spite of the simplicity of the testing equipment and performance of experiments, these tests yield a variety of parameters needed in geotechnical analyses. The weakness of standard oedometric tests is that they detect only uniaxial time-dependent stress-strain relationships. In addition, these tests are time-consuming, and the initial pore pressure gradients are high at every loading increment. To overcome these deficiencies, the members of the research team of the Soil Mechanics Laboratory at the Faculty of Civil Engineering, University of Maribor, have studied various non-standard approaches of oedometric tests. The result of their efforts is the introduction of radial stress measurements and the replacement of stepwise incremental loading with continuous one. These improvements offer several testing possibilities: the tests can be performed either incrementally or continuously; we can measure vertical stresses, pore pressures, vertical strains and radial stresses; if appropriate equipment is used we can also measure radial strains.

The experimental experiences gained in the last fifteen years are the following. Stepwise loading of specimens offers a better insight into the consolidation and creep of soils, but it is time-consuming. The advantage of continuous loading of specimens is a considerably shorter testing time, but its weakness shows in a simultaneous involvement of different phenomena (rise and dissipation of pore pressures, creep). This may lead to distortion of results if we are not experienced enough and our knowledge of specimen properties is insufficient. The introduced radial stress measurements provide insight into the relations between radial and vertical stresses (K' and K'_{in}) and enable us to determine the isotropic elastic parameters E , ν , K , G . This latter is particularly important when oedometric tests are complemented with tri-axial tests. The introduced measurement of radial strains enables the treatment of anisotropy, but the experimental experiences gained so far are too modest.

UVOD

V dokaj kratki zgodovini geomehanike je bilo razvitih nekaj tipičnih postopkov za določanje mehanskih lastnosti zemljin. Eden od osnovnih je t.i. edometriški preizkus, ki ga izvajamo v laboratoriju na edometriškem aparatu. Z njim lahko določamo lastnosti stisljivosti, konsolidacije in vodoprepustnosti zemljin. Preizkus se je uveljavil predvsem zaradi:

- enostavnosti aparata, priprave in vgradnje preizkušanca
- enostavne izvedbe preizkusa
- jasno definiranih preizkusnih pogojev
- določljivosti množice parametrov.

Slabosti konvencionalnih edometriških preizkusov pa so:

- velikost (majhnost) preizkušanca
- visoke hipne spremembe posameznih stopenj napetosti
- visoki gradienti pornih tlakov v začetni fazi vsake spremembe napetosti
- včasih dolgotrajnost preizkusa
- poznan je samo enoosni odnos napetost-deformacija.

Raziskovalci so v zadnjih dvajsetih letih podajali različne ideje za izboljšave in spremembe ter jih podkrepili z raziskavami, mnenja o njihovi uporabnosti pa so različna. Pričujoči prispevek obravnava možnosti določanja odnosa bočnih in vertikalnih napetosti. Dejstvo je, da nas klasični pristop izvedbe edometriškega preizkusa (pri katerem poznamo samo vertikalno napetost, ki jo stopenjsko spreminjamo, merimo pa vertikalno deformacijo, ki se za vsako stopnjo vertikalne napetosti spreminja v odvisnosti od časa) precej omejuje pri vpogledu v napetostno-deformacijske odnose. Tako triosnega napetostnega stanja v preizkušancu ne poznamo in ne vemo kako se le to pri spremembah vzpostavi in spreminja. Zato razmerje med bočnimi in vertikalnimi napetostmi (K_0) v naravi iz preizkusa ni znano, prav tako niso določljivi moduli E , ν , K , G .

To lahko dosežemo z uvedbo meritev bočnih napetosti. Problem, ki se pri tem pojavi je dvojen: po eni strani v smislu mehanike zemljin po drugi pa opreme, ki mora omogočati meritve. V Laboratoriju za mehaniko tal (LMT), na Fakulteti za gradbeništvo, Univerze v Mariboru smo raziskovali drugačne, nestandardne pristope izvedbe edometerskih preizkusov. Rezultat raziskav je sklep, da je smiselno standardne edometriške preizkuse dopolniti, tako da vpeljemo dvoosne napetostno-deformacijske odnose in skrajšamo čas izvedbe posameznega preizkusa. To lahko dosežemo na dva načina: prvič vpeljemo meritve bočnih napetosti (in morda tudi deformacij) in drugič, preizkušane obremenjujemo z zveznim prirastkom vertikalne napetosti namesto stopenjskega obremenjevanja. Takšne dopolnitve nam omogočajo več možnih variant preizkusov: preizkuse lahko izvajamo stopenjsko ali zvezno, merimo pa vertikalne napetosti, porne tlake in vertikalne deformacije ter dodatno še bočne napetosti, s primerno opremo pa tudi bočne deformacije. Preizkuse izvajamo na edometerskem aparatu opremljenem z merilci bočnih napetosti. Preizkuse lahko izvajamo s stopenjskim obremenjevanjem ali zveznim obremenjevanjem. V tem prispevku se bomo omejili predvsem na preizkuse s stopenjskim obremenjevanjem.

OPREMA

Za izvedbo edometriških preizkusov z merjenjem bočnih napetosti je potrebna minimalna sprememba opreme. Potrebujemo standardno opremo za izvedbo edometriškega preizkusa, ki jo primerno priredimo. Primerno je tudi, da so preizkusi računalniško vodeni, kar pa ni nujno. Opremo sestavljajo:

- edometerski aparat z obročem in pripadajočo strojno opremo
- merilna oprema z merilci in povezavami
- računalniška strojna in programska oprema:
 - za zajemanje in hranjenje podatkov ter interpretacijo meritev
 - za programiranje poteka preizkusa.

Glede obremenjevanja preizkušanca v osnovi ločimo dva pristopa:

- klasično stopenjsko obremenjevanje, z več konstantnimi stopnjami vertikalnih napetosti
- zvezno obremenjevanje, z zveznim naraščanjem vertikalne napetosti oz. deformacije.

Vsak od pristopov zahteva primerno merilno in računalniško opremo za izvedbo preizkusa in teoretično podlago, pri čemer je izvedba preizkusa z zveznim obremenjevanjem zahtevnejša.

Za izvedbo preizkusov se obroč opremi s tremi merilnimi lističi za merjenje bočne napetosti na kontaktu preizkušaneč - obroč. V tem primeru ustvarimo med preizkusom dvoosno napetostno stanje in enoosne deformacije. Druga možnost je, da je obroč sestavljen iz treh delov (z medsebojnim kotom 120°), ki se lahko preko bočnega mehanizma bočno pomikajo, prav tako imajo bočno nameščene merilce napetosti. Ostala oprema se primerno dopolni.

IZVEDBA PREIZKUSA

Za kvalitetno izvedbo preizkusa je pomembnih več faz:

- vzorčenje
- določitev osnovnih fizikalnih lastnosti
- priprava preizkusne opreme in kalibracija
- priprava in vgradnja preizkušance (iz posameznega vzorca en ali več preizkušancev)
- zasičenje preizkušance (popolno zasičenje ali pa pustimo nespremenjeno zasičenost $S_r < 1$)
- obremenitev na začetno stanje in meritve
- potek preizkusa (stopenjsko ali zvezno obremenjevanje) in meritve
- preizkusi prepustnosti (po potrebi)
- hranjenje meritev, izračuni in interpretacija rezultatov
- določitev fizikalnih lastnosti preizkušance po končanem preizkusu.

Konvencionalni stopenjski (inkrementalni) preizkus izvedemo z več stopnjami napetosti kot pri standardnih testih. Na vsaki stopnji i je izbrana vertikalna napetost σ_{zi} [kPa] časovno konstantna, merimo pa: čas t_i [s], vertikalni pomik $w_{zi}(t)$ [mm/100], porni tlak $u_{wi}(t)$ [kPa] in bočno napetost $\sigma_{ri}(t)$ [kPa].

Med potekom vsake stopnje obremenitve (i) interpretiramo spremembe odnosov:

totalna napetost – čas; ...	σ_{zi} [kPa]=kons., $\sigma_{ri}(t)$ [kPa] $\leftrightarrow t_i$ [s]
porni tlak – čas; ...	$u_{wi}(t)$ [kPa] $\leftrightarrow t_i$ [s]
efektivna napetost – čas; ...	σ_{zi} [kPa]=kons., $\sigma_{zi}'(t)$ [kPa], $\sigma_{ri}'(t)$ [kPa] $\leftrightarrow t_i$ [s]
vertikalni pomik (specifična deformacija, količnik por) – čas;	$w_{zi}(t)$ [mm], $\varepsilon_{zi}(t)$ [-], $e_i(t)$ [-] $\leftrightarrow t_i$ [s]
vertikalni pomik (specifična deformacija, količnik por) – log. časa;	$w_{zi}(t)$ [mm], $\varepsilon_{zi}(t)$ [-], $e_i(t)$ [-] $\leftrightarrow \log t_i$ [s]

Za celotni preizkus pa odnose:

vertikalni pomik (specifična deformacija, količnik por) – vertikalna napetost;	$w_z(U_v)$ [mm], $\varepsilon_z(U_v)$ [-], $e(U_v)$ (-) $\leftrightarrow \sigma_z'$ (kPa)
vertikalni pomik (specifična deformacija, količnik por) – log. vertikalne napetosti;	$w_z(U_v)$ [mm], $\varepsilon_z(U_v)$ [-], $e(U_v)$ [-] $\leftrightarrow \log \sigma_z'$ [kPa]
bočna napetost - vertikalna napetost;	σ_r' [kPa] – σ_z' [kPa], σ_r'/σ_z' $\leftrightarrow \sigma_z'$ [kPa]

Pri zveznem obremenjevanju vzpostavimo začetno napetostno stanje, ki včasih ustreza napetostnemu stanju v naravi, ter pustimo, da se preizkušaneč stabilizira. Nato dvigujemo obremenitev po želeni zvezni poti, pri čemer obstaja več možnosti obremenjevanja ($d\sigma_z/dt=\text{konst.}$, $d\varepsilon_z/dt=\text{konst.}$ ali $du_w/d\sigma_z=\text{konst.}$). Interpretacija sprememb odnosov je podobna kot pri stopenjskem obremenjevanju.

INTERPRETACIJA REZULTATOV

Preizkus s stopenjskim obremenjevanjem

Na posamezni stopnji obremenitve je vertikalna napetost konstantna. Merjene količine se s časom spreminjajo. Vertikalni pomik (oz. deformacija) ima značilne tri faze: inicialni (hipni) pomik, primarno fazo, ko pomik oz. deformacija narašča po značilni eksponentni krivulji in sekundarno fazo, z značilnim lezenjem. Bočna napetost ob dvigu obremenitve (vertikalne napetosti) hipno naraste, nato pa s časom upada po značilni eksponentni krivulji, ki doseže najnižjo točko na meji med primarno in sekundarno

fazo. Porni tlak ob dvigu obremenitve naraste bolj ali manj hipno (odvisno od stopnje zasičenosti) in s časom upada.

Iz izmerjenih količin določimo parametre kot pri standardno izvedenem preizkusu.

Koeficient konsolidacije c_v je definiran

$$c_{vi} = \frac{T_{vi} \cdot H^2}{t_i} \quad c_{vi} = \frac{k_i}{m_{vi} \cdot \gamma_w} \quad (1)$$

Stopnja sekundarne konsolidacije C_α je definirana kot naklon krivulje v fazi sekundarne konsolidacije v pollogaritmičnem diagramu "sprememba volumna - čas". Iz odnosa "količnik por - efektivna napetost" dobimo koeficient spremembe volumna m_v

$$m_v = \frac{\Delta e}{(1 + e_0) \cdot \Delta \sigma_z} = \frac{a_v}{(1 + e_0)} \quad (2)$$

njegova inverzna vrednost je edometrski modul E_{oed}

$$E_{oed} = \frac{1}{m_v} \quad E_{oed} = \frac{\Delta \sigma_z \cdot (1 + e_0)}{\Delta e} \quad (3)$$

S pomočjo gornjih parametrov določimo koeficient prepustnosti zemljine k_z

$$k_z = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (4)$$

Iz naklona v pollogaritmičnem diagramu "količnik por - efektivna napetost" določimo indeks stisljivosti C_c

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log \sigma_{z2} / \sigma_{z1}} \quad C'_c = \frac{\Delta \varepsilon}{\log \sigma_{z2} / \sigma_{z1}} \quad (5)$$

Iz dekompresijske krivulje določimo indeks nabrekanja C_s

$$C_s = \frac{\Delta e_s}{\log \sigma_{z2} / \sigma_{z1}} \quad C'_s = \frac{\Delta \varepsilon_s}{\log \sigma_{z2} / \sigma_{z1}} \quad (6)$$

Iz rekompresijske krivulje pa rekompresijski indeks C_r

$$C_r = \frac{\Delta e_r}{\log \sigma_{z2} / \sigma_{z1}} \quad C'_r = \frac{\Delta \varepsilon_r}{\log \sigma_{z2} / \sigma_{z1}} \quad (7)$$

Izmerjene bočne napetosti omogočajo določitev elastičnih parametrov

$$E_{oed} = \frac{\Delta \sigma_z}{\Delta \varepsilon_z} \quad \lambda = \frac{\Delta \sigma_r}{\Delta \varepsilon_z} \quad (8)$$

$$K = \frac{E_{oed} + 2\lambda}{3} \quad G = \frac{E_{oed} - \lambda}{2} \quad E = \frac{9KG}{3K + G} \quad \nu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G} \quad (9)$$

Preizkus z zveznim obremenjevanjem

Vpeljava zveznega obremenjevanja omogoča predvsem hitrejšo izvedbo preizkusa. Priprava preizkušanca, vgradnja in začetna stopnja obremenitve se izvede enako kot pri preizkusu s stopenjskim obremenjevanjem. Preizkušanec se zatem obremeni z zvezno spreminjajočo obtežbo. Iz enačbe

$$c_v \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} = \frac{\partial u_w}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \quad (10)$$

sledi določitev parametrov:

$$E_{oed} = \alpha_M \frac{\partial \sigma'_z}{\partial t} \cdot \left(\frac{\partial \varepsilon_z}{\partial t} \right)^{-1} \quad (11)$$

$$k = \alpha_k \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial t} \frac{H^2}{2u_w} \quad \text{in} \quad c_v = \alpha_c \frac{\partial \sigma'_z}{\partial t} \frac{H^2}{2u_w} \quad (12)$$

Vrednosti α_M , α_k , and α_c so odvisne od stopnje časovnih sprememb napetosti in robnih pogojev. Za neko razmerje $du_w/d\sigma_z$ sledi

$$\alpha_M = 1 - \frac{du'_w}{d\sigma} \cdot \bar{f} \quad \alpha_k = \frac{1}{f(\zeta)} \quad \alpha_c = \alpha_M \cdot \alpha_k \quad (13)$$

kjer so

$$f = \frac{d\sigma'_z}{du_w} (1 + C_1 \cdot \sinh a\zeta + C_2 \cdot \cosh a\zeta) \quad a = \operatorname{arccosh} \left(1 - \frac{du_w}{d\sigma_z} \right)^{-1} \quad (14)$$

$$\bar{f} = \int_0^1 f(\zeta) d\zeta \quad \zeta = \frac{z}{h} \quad (15)$$

Prednosti preizkusa z zveznim obremenjevanjem so:

- enostavna izvedba
- hitrost izvedbe.

Pomanjkljivosti takšnega preizkusa so:

- vpogled v lezenje ni omogočen
- napake pri prevelikem prirastku obremenitve.

Pri preizkusu s stopenjskim ali zveznim obremenjevanjem lahko določimo tudi t.i. *napetostne kvociente* (ki nakazujejo na verjetno vrednost količnika mirnega zemeljskega pritiska K_0). Napetostni kvocient K_{oed} je razmerje med totalno radialno in totalno vertikalno napetostjo. Napetostni kvocient K'_{oed} je razmerje med efektivno radialno in efektivno vertikalno napetostjo. Za vsako stopnjo obremenitve lahko določimo tudi t.i. inkrementalni napetostni kvocient. Inkrementalni napetostni kvocient ΔK_{oed} je razmerje med spremembami totalne radialne in totalne vertikalne napetosti, $\Delta K'_{oed}$ pa med efektivno radialno in efektivno vertikalno napetostjo.

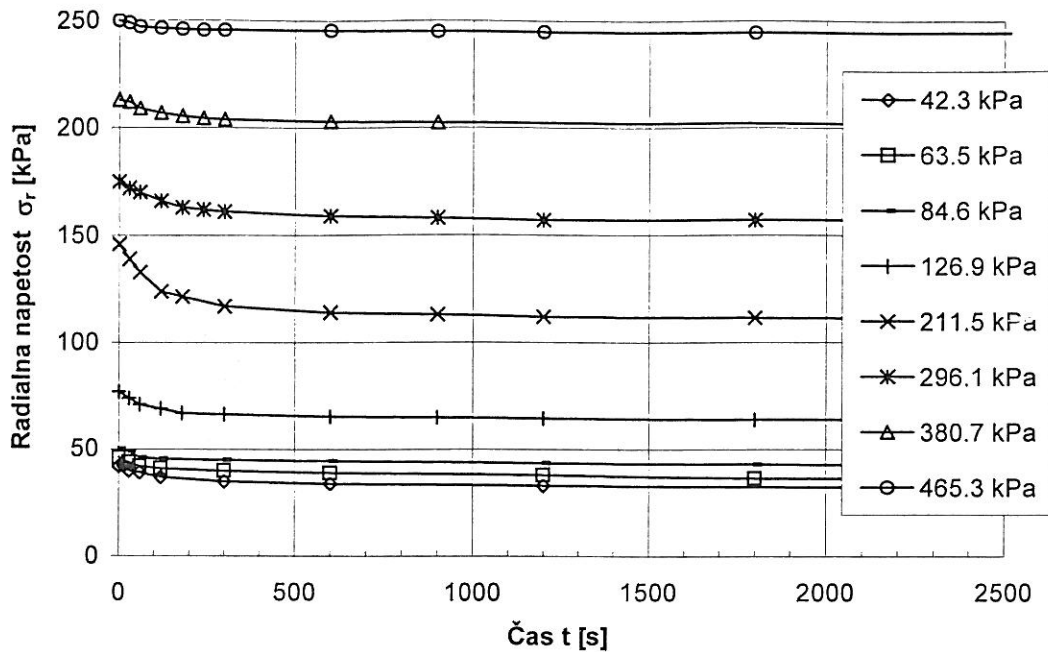
$$K_{oed} = \frac{\sigma_r}{\sigma_z} \quad K'_{oed} = \frac{\sigma'_r}{\sigma'_z} \quad \Delta K_{oed} = \frac{\Delta \sigma_r}{\Delta \sigma_z} \quad \Delta K'_{oed} = \frac{\Delta \sigma'_r}{\Delta \sigma'_z} \quad (16)$$

Kvocienti K_{oed} , K'_{oed} , ΔK_{oed} in $\Delta K'_{oed}$ so funkcije časa, npr. $K'_{oed}(U_v=0\%) > K'_{oed}(U_v) > K'_{oed}(U_v=100\%)$.

Meritve radialne napetosti torej omogočajo določitev vseh parametrov kot pri standardnem preizkus, hkrati pa še elastičnih parametrov K , G , E , ν in *napetostnih kvocientov* K_{oed} , K'_{oed} , ΔK_{oed} in $\Delta K'_{oed}$, kar je tudi dobra osnova za izvedbo triaksialnih preizkusov.

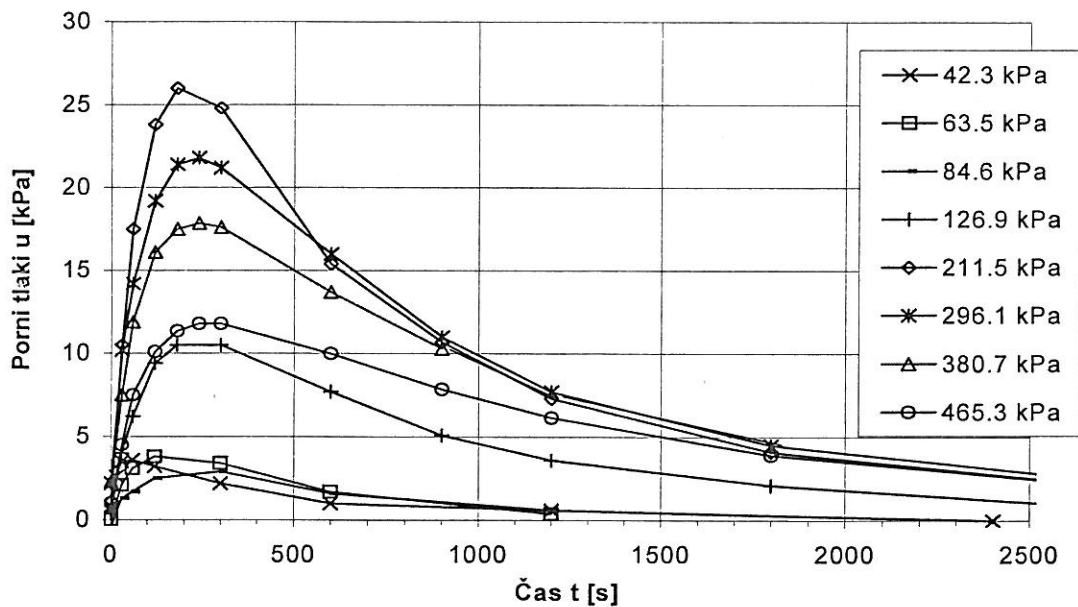
PRIMER

Kot tipičen primer je podan preizkus na srednjegnetni glini v geomehanskem laboratoriju Univerze v Trondheimu, Norveška (NTU Trondheim). Preizkus je izveden na aparatu s tridelnim obročem. Preizkušane premera 50 mm in višine 20 mm je bil stopenjsko obremenjevan s hipnimi dvigi vertikalnih napetosti. Iz slike 1 so razvidni odzivi s praktično hipnimi porasti totalne bočne napetosti ob vsakem dvigu vertikalne napetosti in nato upadom bočne napetosti do nekega končnega stanja.



Slika 1. Časovne spremembe radialnih napetosti za stopnje vertikalnih obremenitev

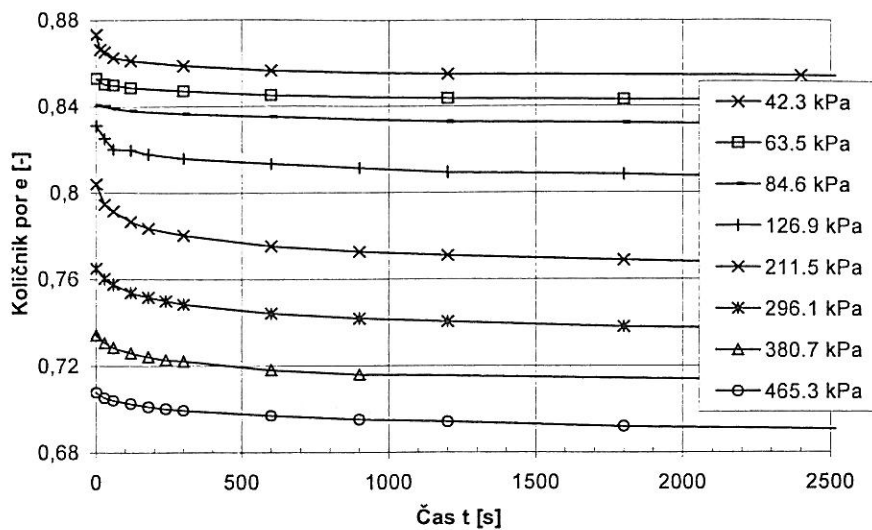
Časovni razvoji pornega vodnega tlaka (slika 2) pri posameznih stopnjah vertikalne obremenitve imajo značilne krivulje. V začetku obremenitve skoraj hipno narastejo, nato pa upadajo po značilni krivulji.



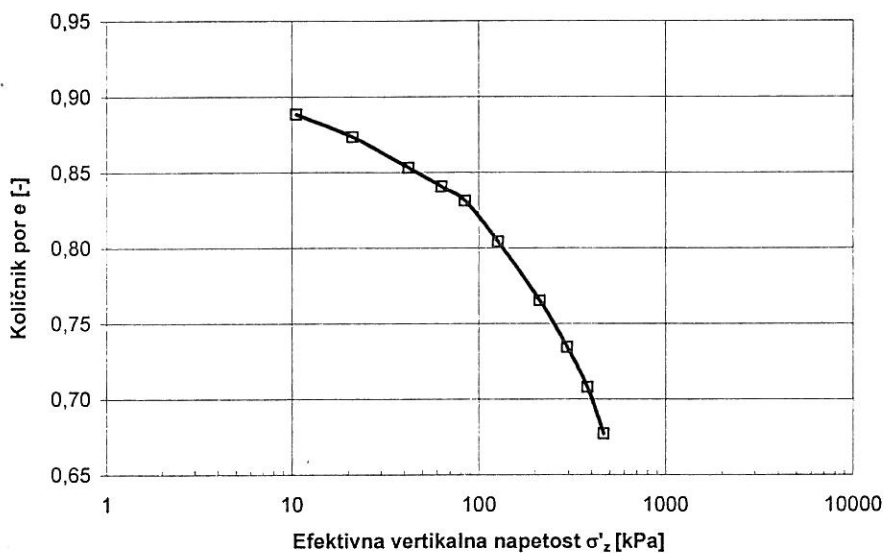
Slika 2. Časovne spremembe pornih tlakov za stopnje vertikalnih obremenitev

Grafični prikaz časovnega razvoja posedkov oz. vertikalne deformacije ima značilne krivulje. V konkretnem primeru je bila uporabljena Casagrandejeva metoda interpretacije posedkov.

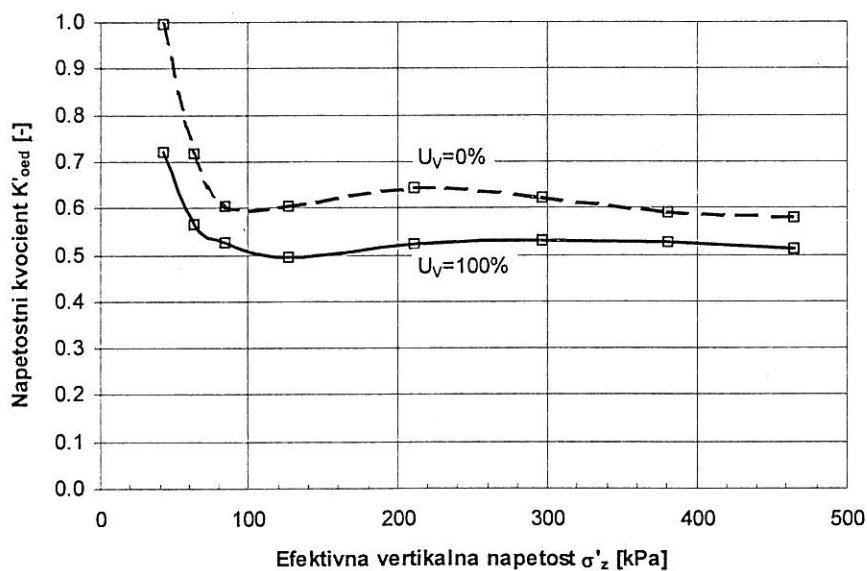
Parametre C_{α} , c_{vj} in k_{zj} določimo iz časovnih diagramov za vsako stopnjo obremenitve. Iz napetostno-deformacijskih odnosov $e - \sigma'_z$ in $e - \log \sigma'_z$ (slika 4) določimo indekse C_c , C_s in C_r ter elastične E_{oed} , K , G , E , ν .



Slika 3. Časovne spremembe količnika por za stopnje vertikalnih obremenitev



Slika 4. Odnos količnik por – efektivna vertikalna napetost za stopnje obremenitve



Slika 5. Napetostni kvocient K'_{oed} v odvisnosti od vertikalne obremenitve σ'_z , in stopnje kons. U_v

Na sliki 5 je prikazano razmerje med radialno in vertikalno napetostjo (K'_{oed}) za posamezne stopnje obremenitve in različne stopnje konsolidacije $U_V = 0 - 100\%$. Iz odnosa med $K'_{oed} - \sigma'_z$ je razvidno, da je K'_{oed} pri nizkih napetostih visok, nato pa postane praktično konstanten. Inkrementalni napetostni kvocient $\Delta K'_{in}$ se ujema s K'_{oed} , v območju, ko ta postane konstanten.

ZAKLJUČEK

Uvedba edometriških preizkusov z meritvami bočnih napetosti predstavlja zanimivo dopolnitev k standardno izvedenim preizkusom. Uvedba preizkusov z meritvami bočnih napetosti je tehnično nezahtevna. Potrebna je le enostavna tehnična dopolnitev opreme (merilci bočnih napetosti) in uporaba znanih konstitutivnih odnosov pri interpretaciji rezultatov. Takšen preizkus omogoča določitev vseh parametrov kot pri standardnem preizkusu, napetostnih kvocientov K_{oed} , K'_{oed} , $\Delta K'_{oed}$ in $\Delta K'_{oed}$ ter elastičnih konstitutivnih parametrov K , G , E , ν .

Preizkuse lahko izvajamo stopenjsko ali z zveznim prirastkom napetosti. Stopenjsko obremenjevanje preizkušancev nam da boljši vpogled v potek konsolidacije in lezenje zemljine, je pa zamudno. Prednost zveznega obremenjevanja preizkušancev je bistveno skrajšan čas preizkusa, slabost tako izvedenih preizkusov pa je lahko hkrati prepletanje različnih pojavov (dvig in disipacija pornih tlakov, lezenje), kar nas ob nezadostnih izkušnjah in poznavanju lastnosti preizkušancev lahko pripelje do zelo popačenih rezultatov.

Hitrost obremenjevanja je največji problem preizkusov z zveznim obremenjevanjem. Pri neprimerni (preveliki) hitrosti, lahko ob takšni interpretaciji rezultatov kot pri stopenjskem obremenjevanju, rezultati bistveno odstopajo. To še posebej velja za materiale z dolgotrajno konsolidacijo in občutljive na lezenje. Takrat je pri izračunih parametrov primerno upoštevati korekcijske (korelacijske) faktorje. Njihova vrednost se pri dovolj počasni izvedbi približuje vrednosti 1.

Dokler ni dovolj izkušenj, je vsekakor primerno izvesti hkrati preizkuse s stopenjskim in zveznim obremenjevanjem, katerih rezultati ne smejo bistveno odstopati.

Edometriški preizkus z meritvami bočnih napetosti je tudi dobra osnova za izvedbo triaksialnih preizkusov.

Vpeljava meritev bočnih deformacij dopušča obravnavo anizotropije. Dosedanje eksperimentalne izkušnje za vpeljavo takšnih preizkusov so preskromne, zaradi različnih tehničnih in teoretičnih težav (oprema, dimenzije preizkušanca) pa verjetno tovrstni preizkusi ne bodo zaživel v praksi.

LITERATURA

- Janbu, N., Tokheim, O., Senneset, K. (1981) Consolidation test with continuous loading. Proc. X. ICSMFE, Vol. 1, 645-654, Stockholm
- Janbu, N. (1985) Soil models on offshore engineering. The Rankine lecture, Geotechnique 35, No. 3, 241-281
- Leroueil, S. (1996) Compressibility of clays: fundamentals and practical aspects. Journal of geotechnical Engineering, ASCE, Reston, VA 122(7), 534-543
- Senneset, K. (1989) A new oedometer with splitted ring for the measurement of lateral stress, XII. ICSMFE, Vol. 1, 115-118, Rio de Janeiro