EAN 93
31. konference o experimentální analýze napětí
25.–27.5.1993 Měřín ČESKÁ REPUBLIKA

DETERMINING OF CONSTITUTIVE PARAMETERS OF SOILS IN TRIAXIAL APPARATUS
MĚŘENÍ KONSTITUČNÍCH PARAMETRŮ ZEMIN V TROJOSÉM PŘÍSTROJI

Boháč J., Feda J. a Herle I.

In determining constitutive parameters of soils laboratory tests are indispensable. Since soils are path and history dependent, the most commonly used device is hydraulic triaxial apparatus which makes modelling of general stress path possible. However, special attention must be paid to homogeneity of stress and strain and to all intrinsic errors of the device that are briefly summarised. By fitting the cell with local gauges and bender elements, detailed investigation of soil stiffness can be carried out as demonstrated by tests with reconstituted boulder clay.

Úvod

Pro definici konstitučních parametrů zemin je třeba provést laboratorní zkoušky. Vzhledem k charakteru zemin, jejichž chování je závislé na drahách napětí, je zpravidla nutné užít přinejmenším hydraulický trojosý přístroj (popis viz Herle et al., 1993). Nutnou podmínkou při určení konstitučních parametrů zemin je však dodržení homogenity pole napětí a přetvoření.

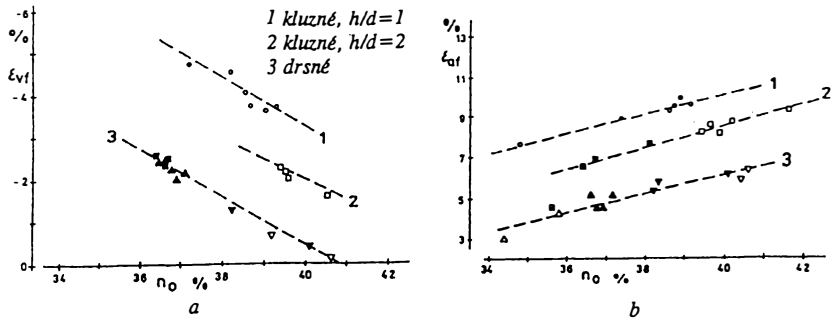
Homogenita přetváření a napětí v trojosém přístroji.

Při standardní triaxiální zkoušce je zemina (podstavy válcového vzorku) v kontaktu s porézními drenážními destičkami, které vnášejí do systému parazitní smyková napětí. Svislé (osové) napětí působící na vzorek proto není napětím hlavním a přetváření vzorku je nehomogenní. Tření v podstavách vzorku omezuje příčné (radiální) deformace, v průběhu smykové zkoušky vzorek získává typický soudkovitý tvar a vytvářejí se výrazné smykové plochy. Obdobně při izotropním stlačování nabývá vzorek zhruba tvar rotačního hyperboloidu a pole přetvoření je rovněž nehomogenní. K tomuto jevu dochází i v případě uložení vzorku na relativně hladké destičky, např. ocel, dural či plexisklo.

Tento nedostatek se při standardní zkoušce řeší zvýšením štíhlosti vzorku, který při poměru výšky k průměru 2 až 2.5 poskytuje věrohodné hodnoty pevnosti. Je-li však cílem stanovit parametry přetvárné, je třeba zkoušet vzorky s polem napětí i přetvoření homogenním.

Nejvhodnějším způsobem omezení vzniku smykových napětí v podstavách vzorku je užití tzv. kluzných destiček, sestávajících z jedné vrstvy silikonové vazelíny a jednoho či dvou gumových disků připravených z běžné gumové membrány pro trojosé vzorky. Samotné kluzné destičky však homogenitu přetváření vzorků nezajistí, je třeba zkoušet vzorky s poměrem výšky k průměru 1:1, neboť vyšší vzorky nejsou stabilní a přetváření je nehomogenní (Feda et al.,1993).

Při zkouškách zbraslavského písku byla vrcholová přetvoření vzorků středně ulehlých s homogenním polem napětí a přetvoření zhruba dvojnásobná než u vzorků standardních s přetvořením nehomogenním (obr.1 - přímky 1 a 3). Oproti tomu přetváření vzorků spraše s kluznými destičkami se nelišilo od chování vzorků standardních. Rozdíl v chování vzorků s homogenní deformací a deformací nehomogenní je významný u dilatantních materiálů, méně podstatný je vliv uložení vzorků u materiálů kontraktantních, Feda et al. (1993).



Obr.1. Vliv homogenity přetvoření (kluzných destiček) na vrcholové objemové (1a) a osové (1b) přetvoření zbraslavského písku.

Některé další parazitní vlivy a měření deformací při trojosé zkoušce.

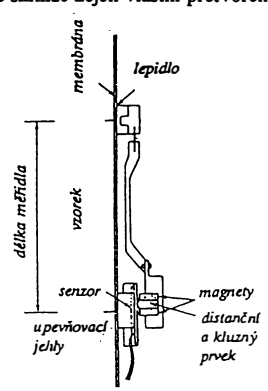
Je-li objemové přetvoření nasyceného trojosého vzorku měřeno prostřednictvím změny objemu pórové kapaliny, je třeba uvážit při vyhodnocní zkoušky vliv penetrace membrány do povrchových pórů vzorku. U střednězrnného zbraslavského písku může parazitní objemová změna způsobená penetrací membrány dosahovat až 50% registrované změny objemu vzorku (Boháč a Feda, 1992). Penetraci membrány lze zanedbat pouze u jemnozrnných materiálů.

Některá měřidla objemových změn jsou opatřena těsnící membránou (Bellofram), která tvoří rozhraní mezi zdrojem saturačního tlaku (zpravidla stlačený vzduch) a pórovou kapalinou. Stlačitelnost membrány a poddajnost měřidla způsobují chybu v měření změn objemu. Tyto vlivy je třeba kalibrovat a to vždy při stejných sytících tlacích jako při vlastní zkoušce.

Měření objemové změny je vždy ohroženo netěsností drenážního systému. Kromě chyby v objemové deformaci se netěsnost projeví při běžném uspořádání zkoušky i při výpočtu radiální deformace a okamžité průřezové plochy. Výsledkem drobné netěsnosti potom může být odchylka (nepozorovaná) od zamýšlené dráhy napětí, neboť řídící počítač stanovuje osové napětí v průběhu zkoušky z průřezové plochy vzorku.

Při měření osového přetvoření vzorku vně komory registruje snímač nejen vlastní přetvoření vzorku, ale i stlačení snímače síly a další posunutí, např. vůli v závitech uložení snímače osové síly (obr. 1a in Herle et al., 1993). Poddajnost vlastního snímače síly je třeba vždy kalibrovat zkouškou s relativně nestlačitelným (např. duralovým) vzorkem, která musí věrně kopírovat dráhy napětí aplikované při zkoušce se zeminou. Stejným způsobem se určí vliv stlačení horních (často vícedílných) a dolních destiček včetně stlačení filtračních a kluzných vrstev (tzv. ložný efekt).

Lokální měření osové deformace uvnitř trojosé komory umožňuje snížit o řád (až na 0.001%; někteří autoři uvádějí 0.0001% - Tatsuoka a Shibuya, 1992) obor spolehlivého měření a nevyžaduje korigování ložného efektu a poddajnosti systému. Snímače osové deformace se připevňují přímo na vzorek (např. snímače založené na Hallově efektu, obr. 2), případně se měří posunutí referenčních bodů jiným způsobem (přehled např. in Boháč, 1993). Ideální instrumentace trojosého vzorku by měla obsahovat lokální měření osové deformace a měření radiální deformace uvnitř komory, snímač pórového tlaku ve střední části vzorku, snímač osové síly uvnitř komory a běžné měření



Obr.2. Lokální snímač osové deformace využívající Hallova efektu (Clayton a Khatrush, 1986)

objemu a osové deformace vně komory. V každém případě je vhodné instrumentovat vzorek redundantními měřidly, neboť pravděpodobnost selhání je zejména při dlouhodobých zkouškách vysoká.

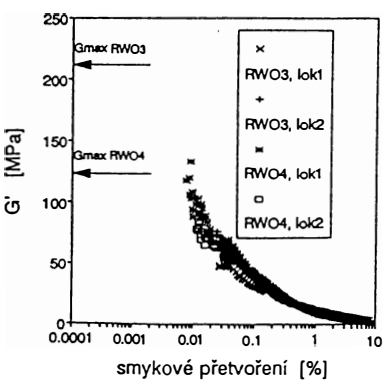
Přesnost měření přetvoření a napětí

Při hodnocení kvality trojosých zkoušek je třeba bedlivě rozlišovat přesnost a citlivost měření. Běžně užívané snímače síly mají při šestnáctibitovém A/D převodníku a rozsahu tlaku 0 až 1 MPa citlivost cca 0.031 kPa. Skutečná přesnost měření při trojosé zkoušce je však (v ideálním případě) zhruba ± 1 kPa a je třeba ji průběžně kontrolovat, neboť může během zkoušky podstatně klesnout na ± 10 kPa. Obdobná je situace při měření deformací. Elektronická instrumentace trojosé komory nezabezpečuje sama o sobě větší přesnost měření, pouze provádění zkoušek usnadňuje. Může vést při nedostatečné pozornosti a interpretaci k chybným datům. Skutečně dosaženou přesnost je třeba vždy ověřit, zejména s ohledem na linearitu a stabilitu měření.

Hydraulický trojosý přístroj užitý pro níže uvedené experimenty byl vybaven dvěma lokálními snímači na principu Hallova efektu s citlivostí 0.0017% a přesností ± 0.004%. Externě se osové přetvoření měřilo snímačem LVDT (citlivost 0.0023%; přesnost ± 0.004%). Objemové změny se registrovaly měřidlem Imperial College (0.0037%; ± 0.005%), tlaky běžnými snímači Druck (0.03kPa; ± 0.2kPa) a osová síla snímačem Surrey University (0.03kPa; ± 1.0kPa), bližší popis in Boháč (1993).

Měření smykové tuhosti

Znalost smykového modulu zeminy je potřebná při numerické analýze chování konstrukcí. Je při tom obecně známo, že v mnoha případech jsou přetvoření zemin při pracovním zatížení (a to i statickém) malá, řádově 0.01% až 1%, Burland (1989). Po řadu let nebylo vysvětleno, proč polní měření (dynamická, založená na sledování průchodu vln zeminou) dávají řádově vyšší hodnoty tuhosti zemin než statická laboratorní měření. Vyvinula se zavádějící terminologie, rozlišující mezi "statickou" a "dynamickou" tuhostí zemin. S rozvojem laboratorních metod v posledních letech (lokální měření) se dospělo ke srovnatelným hodnotám tuhosti "statické" s "dynamickou" a ozřejmila se vhodnost správnějšího rozlišení na tuhost při malých a velkých deformacích.

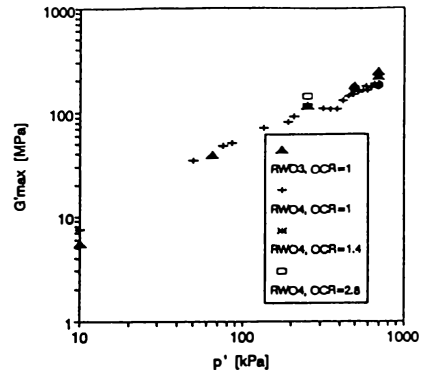


Obr.3. Sečný smykový modul rekonstituovaného jílu

Typický průběh smykového modulu zeminy je ilustrován výsledky zkoušek rekonstituovaných vzorků ledovcového jílu. Zkoušky se prováděly v hydraulickém trojosém přístroji s přesností uvedenou výše. Komora byla vybavena piezoelektrickými čidly (tzv. bender elements) pro vysílání a příjem smykových vln, což umožňuje stanovení smykového modulu vzorku při velmi malých deformacích, menších než 0.001%. Měří se čas potřebný pro průchod vlny od jedné podstavy vzorku ke druhé podstavě a smykový modul se vypočte z rychlosti vlny. V oblasti velmi malých přetvoření dosahuje smykový modul přibližně konstantní (své maximální) hodnoty G_{max}. Při tzv. malých deformacích (0.001% až 1%) je závislost G na smykovém přetvoření silně nelineární (obr. 3) a pro velká přetvoření je G blízké nule, tedy opět zhruba konstantní. Pro soudržné zeminy je maximální smykový modul závislý na středním efektivním napětí p', překonsolidaci (OCR) a plasticitě zeminy (Viggiani, 1992).

Změna sečného smykového modulu G při smykové zkoušce s konstantním p' je znázorněna na obr. 3. Výsledky dynamických měření, udávající vztah mezi p' a G_{max}, jsou uvedeny na obr. 4. Z obr. 4 lze určit G_{max} vzorků RWO3 a RWO4 při smyku: při zkoušce RWO3 bylo p'=700 a

$G_{max} \doteq 210$ MPa a pro RWO4 je $G_{max} \doteq 120$ MPa při p'=250 kPa. Hodnoty G_{max} z obr. 4 jsou vyznačeny na obr. 3. Umožňují interpolovat průběh tuhosti mezi daty získanými statickou trojosou zkouškou při malých přetvořeních (pro smykové přetvoření $\varepsilon_s > 0.01$ %) a hodnotami G_{max} při velmi malých přetvořeních.



Obr.4. Maximální smykový modul stanovený z rychlosti šíření smykových vln.

Závěr

Při měření konstitučních parametrů v trojosém přístroji je třeba zajistit, aby pole napětí i přetvoření byla homogenní. Parazitní smyková napětí, vnášená do vzorku podstavami, je třeba eliminovat tzv. kluznými destičkami. Zároveň je nutné zkoušet vzorky o poměru výšky ku průměru rovném jedné, neboť standardní vzorky 2:1 nevyhovují podmínce homogenity přetvoření.

Dalšími parazitními vlivy jsou netěsnosti, poddajnost systému a penetrace membrány. Jejich vliv je třeba vyloučit. Kde to není možné, je nutné vždy tyto vlivy uvážit při zpracování dat. Vzhledem k charakteru zkoušek je elektronika náročná na stabilitu a je třeba systém pravidelně kalibrovat.

Stanovení tuhostí zeminy z rychlosti šíření smykových vln trojosým vzorkem a jejich kombinace s daty získanými přesným měřením při běžném statickém zatěžování umožňuje nalézt smykové moduly zemin pro numerické modely při všech rozsazích přetvoření.

Výzkum byl prováděn v rámci grantu č. 27114 AVČR. Smykový modul při malých přetvořeních se měřil v Geotechnical Engineering Research Centre, City University, Londýn.

Literatura

Boháč, J. (1993). Měření malých deformací a hydrostatické sondování vzorků zemin. Výzkumná zpráva, grant 27114 AVČR, ÚTAM, Praha.

Boháč, J. a Feda, J. (1992). Membrane penetration in triaxial tests. Geotechnical Testing Journal ASTM, Vol. 15, No. 3., 288-294.

Burland, J.B. (1989). The Ninth Bjerrum Memorial Lecture: Small is beautiful - the stiffness of soils at small strains. Canadian Geot. Journal, Vol. 26, 499-516.

Clayton, C.R.I. a Khatrush, S.A. (1989). A new device for measuring local axial strains on triaxial specimens. Géotechnique, Vol. 36, No. 4, 593-597.

Feda, J., Boháč, J. a Herle, I. (1993). End restraint in triaxial testing of soils. Acta Technica ČSAV, Vol. 38 No.1, 1-23.

Herle I., Boháč, J. a Feda, J. (1993). Automatické řízení laboratorních zkoušek zemin. Příspěvek otištěný v tomto sborníku.

Tatsuoka, F. a Shibua, S. (1992). Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests. Rep. of the Inst. of Industrial Science, University of Tokyo, 136 str.

Viggiani, G. (1992). Small strain stiffness of fine grained soils. Ph.D. Thesis, The City University, Londýn.

Ing. Jan Boháč, doc. Ing. Jaroslav Feda, DrSc. a Ing. Ivo Herle
Ústav teoretické a aplikované machaniky, AVČR, Vyšehradská 49, 128 49 Praha 2
Tel.: (02) 293936, Fax.: (02) 295903