

Ing. Jaroslav S t a n e k, CSc., VÚHU

Chování jílovité sypaniny za vysokých napětí
a proměnlivé vlhkosti

1. Úvod

V 7. pětiletce byl v rámci resortního úkolu R-10-125-301-03 řešen úkol "Výzkum fyzikálně-mechanických vlastností zemin na vysokých výsypkách", při jehož řešení vystoupily do popředí závažné problémy chování jílovité sypaniny při vysokých normálních zatíženích.

Úroveň řešení kteréhokoliv technického problému je předurčena dosaženou úrovní příslušného vědního oboru, teoretickými a praktickými znalostmi řešitele a v neposlední řadě i úrovní a komplexností existujících podkladů. K poslední uvedené podmínce lze dodat, že neúplnost a nereprezentativnost výchozích podkladů nelze již, byť sebedokonalejším postupem řešení, odstranit a jejich nepříznivý vliv se projeví v plné míře ve výsledcích daného problému.

V souvislosti s geotechnikou je nutno uvést, že dosud neexistuje ani uspokojivé exaktní řešení otázky šíření a rozdělení napětí v pevných homogenních a izotropních látkách, tj. látkách značně jednodušších, než je jílovitá zemina, ani jednoznačné vysvětlení původu vazebních sil mezi jílovitými částicemi, jimiž jsou u zeminy, tvořené těmito částicemi byť i jen malým podílem, podstatně ovlivněny její fyz.-mechanické vlastnosti. Kromě stěžejního problému geotechniky, týkajícího se šíření a rozdělení napětí a jimi vyvolaných deformací v nehomogenním, anisotropním a nespojitém prostředí, existuje ještě řada dílčích problémů, mezi které, jak se potvrdilo, patří i chování jílovité sypaniny při vysokém zatížení a proměnlivé vlhkosti. Tento problém se objevil v souvislosti s pokusy stanovit smyko-

vou pevnost jílovité sypaniny a vyplnit tak existující mezeru v podkladech pro řešení stability výsypek, tvořených těmito zeminami.

Potřeba znát smykovou pevnost sypaniny jistě existovala od doby, kdy došlo k prvnímu pokusu o řešení stability výsypky a stejně stará bude zřejmě i myšlenka pokusit se o její laboratorní stanovení. Jak se však během výzkumu prokázalo, musely být případné pokusy o její stanovení zmařeny parametry existujících smykačů (malými rozměry krabice a hlavně nízkým rozsahem normálních napětí). Chybějící hodnoty smykové pevnosti se proto při výpočtech stability výsypek nahrazovaly hodnotami odhadnutými nebo získanými na základě hypotetických či spekulativních úvah.

2. Metodika řešení, dílčí výsledky a směry výzkumu

Návrh prvního prototypu velkorozměrového smykače vycházel hlavně z kompromisního řešení dvou protichůdných aspektů:

- co nejvíce se velikostí krabice smykače přiblížit ke střední kusovitosti sypaniny,
- vyvinout v krabici smykače co největší normální napětí.

Vzhledem k technologickým a materiálovým možnostem výrobce smykače (dílny VČSA) byla zvolena krabice o rozměrech 40x40x40 cm (plocha vnitřního průřezu 1600 cm²) k maximální přítláčné síle 160 000 N, vyvolávající ve vzorku sypaniny maximální napětí 1 MPa. Jak se při provozním ověřování smykače ukázalo, bylo možno za klidu (při konsolidaci) použít jen maximální normální napětí 0,7 MPa a za pohybu (při smykání) jen normální napětí 0,5 MPa. Při překročení napětí 0,7 MPa docházelo za klidu k zatlačování kuliček do vodicích drážek kuličkové dráhy a za pohybu k jejímu poškození trvalými deformacemi. Proto, až na několik výjimek, byly smykové zkoušky na tomto prvním prototypu

smykače prováděny v oboru normálních napětí 0,1 až 0,5 MPa, který odpovídal rozsahu napětí, působících ve 30 m vysokém výsypkovém stupni.

Při odběru zeminy (cca 500 kg) byly ze vzorku odstraněny kusy zeminy větší než 12 cm. Do krabice smykače se vzorek ukládal ručně a zároveň se i vážil. Průměrná hmotnost vzorku se v krabici smykače pohybovala v rozmezí 80 až 90 kg. Pak následovala konsolidace vzorku při některém ze čtyř zatěžovacích stupňů z intervalu 0,1 až 0,7 MPa za současného měření velikosti stlačení. Po skončení konsolidace se provedl smyk s průměrnou rychlostí $1 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Z výsledků měření velikosti osově (svislé) deformace vzorku v krabici smykače bylo možno stanovit velikost počátečního sednutí výsypkového stupně, realizujícího se již během jeho sypaní, jehož měření v terénu nebylo dosud provedeno. Hodnotu sednutí lze odvozovat z určené poměrné deformace, která v rozmezí působícího svislého napětí 0,1 až 0,7 MPa u sypaniny, tvořené jílovitou zeminou z hloubky do 40 m, dosahuje hodnotu až 0,30 a z větších hloubek maximálně hodnotu 0,22 (určeno na vzorcích z komořanské oblasti).

Zároveň z hodnot osově deformace byly prvně určeny hodnoty modulu přetvárnosti pro jílovitou sypaninu, platné v rozmezí svislého napětí 0,3 až 1,0 MPa. V rozmezí uvedeného svislého napětí je jeho průměrná hodnota M dána lineární závislostí

$$M = 24,5\sigma + 5 \quad \text{/MPa/}$$

(pro sypaninu, těženou z hloubky větší než 30 m)

nebo závislostí

$$M = 20,5\sigma + 3 \quad \text{/MPa/}$$

(pro jílovitou sypaninu, těženou z hloubky menší než 30 m).

Tyto výsledky byly využity při výpočtu sedání Ervěnického koridoru.

Výsledky výzkumu, týkající se smykové pevnosti, určované na prvním prototypu velkorozměrového smykače, vedly k následujícím poznatkům. Soudržnost jílovité sypaniny se za normálních napětí 0,1 až 0,5 MPa pohybuje v rozmezí 0,01 až 0,05 MPa a její závislost na hloubce původního uložení zeminy je spíše obrácená k všeobecně známému pravidlu o jejím narůstání s rostoucí hloubkou původního uložení u neporušených vzorků. Nejnižší soudržnost vykazovaly zpravidla právě vzorky sypaniny, těžené z nejnižší položených skrývkových řezů (potvrzeno v komořanské oblasti - VČSA). Hodnoty úhlu vnitřního tření u přirozeně vlhké sypaniny byly v relaci se známou tendencí jeho zvyšování s rostoucí hloubkou původního uložení vzorku. U provedených smykových zkoušek narůstala hodnota úhlu vnitřního tření v rozmezí 10° až 30° . U všech provedených smykových zkoušek byla vždy v celém průřezu smykací krabice vyvinuta vyhlazená smyková plocha.

V souvislosti s dosaženou úrovní poznatků o smykové pevnosti sypaniny s kusovitostí mezi 5 až 12 cm vznikla otázka, do jaké míry jsou získané výsledky reprezentativní ve vztahu k nevytříděné sypanině, jejíž kusovitost je zpravidla větší. Protože kusovitost vzorku se k daným rozměrům krabice nemohla zvětšit (šlo by zde o velký rozpor s ČSN 72 10 24), šlo se cestou opačnou, tj. provedly se v rámci další etapy výzkumu souběžné smykové zkoušky jílovité sypaniny, z níž byly vytříděny vzorky o kusovitosti 5 až 12 cm, 0 až 1 cm a zároveň i vzorek, tvořený 50 % podíly obou vytříděných frakcí. Protože se při smykových zkouškách u některých vzorků na jejich frakcích 5 až 12 cm a 0 až 1 cm objevila těsná shoda ve smykové pevnosti (soudržnost se lišila v tisícinách MPa a úhel vnitřního tření v minutách), vedlo toto zjištění k řešení další otázky, existuje-li vzájemný vztah mezi hodnotou smykové pevnosti, určené na hrubozrnné nebo jemnozrnné frakci ve velkorozměrovém smykači, a hodnotou smykové pevnosti, určené na jemnozrnné frakci v běžném krabicovém smykači. V kladném případě by to znamenalo nejen pro výzkum, ale i pro běžný geotechnický průzkum značné

zjednodušení, související jak s odběrem, přepravou, skladováním, přípravou i likvidací vzorků, tak i s velikostí smykového přístroje, prostorem pro jeho umístění, pracovním prostředím a s fyzickou náročností jeho obsluhy.

Provedený výzkum očekávanou paralelu mezi smykovou pevností, určenou na velkorozměrovém smykači, a hodnotou smykové pevnosti, určenou na běžném krabicovém smykači, nepotvrdil. Ukázalo se totiž, že smykové zkoušky na běžném krabicovém smykači nelze vyhodnotit pro jejich atypický průběh; i při plném využití dovoleného posunu krabice se neobjevil pokles ve smykovém odporu. Naopak docházelo během zkoušky k jeho stálému narůstání. Tento jev se objevil i při jedenáctém opakování smykové zkoušky (dvanáctém smyku) na tomtéž vzorku. Narůstání smykového odporu během smykové zkoušky se objevovalo na všech připravených frakcích 0 až 1 mm, 8 až 10 mm a 10 až 20 mm (omezení velikosti největší frakce bylo dáno rozměry krabice smykače 84 x 84 mm).

Je známo, že mezní obálky, tj. grafické znázornění funkční závislosti mezi působícím normálním napětím a k němu příslušejícím mezním smykovým napětím, mají křivkový tvar, který se obvykle v omezeném intervalu normálních napětí nahrazuje přímkou. Získané hodnoty smykové pevnosti u velkorozměrového smykače byly rovněž určeny proložením přímky koncovými body úseků, znázorňujících velikost změřených smykových odporů za různých normálních napětí v intervalu do 0,5 MPa.

Ve vztahu k vysokým výsypkám byl tento možný interval normálních napětí u 1. prototypu velkorozměrového smykače nedostatečný, a proto bylo nutno přejít ke smykovým zkouškám za vyšších normálních napětí. V době řešení úkolu byl k dispozici pouze velkorozměrový smykač Projektového ústavu dopravních a inženýrských staveb v Praze, jehož maximální rozsah normálních napětí byl omezen hodnotou 3 MPa při průřezu smykací krabice 2800 cm² (40 x 70 cm). Na tomto smykači pak pokračoval výzkum

smyskové pevnosti, simulující napěťový stav ve výsypkách vysokých až 150 m.

3. Dosažené výsledky výzkumu

Za normálních napětí v rozsahu 0 až 3 MPa se potvrdilo, že přímkové obálky, získané v rozsahu normálních napětí do 0,5 MPa, nelze aplikovat za tento rozsah. Získané výsledky smyskové pevnosti v rozsahu normálních napětí do 3 MPa dokumentují zvláštní chování jílovité sypaniny, doprovázené podstatnými skoky v tomto chování.

- a) V oboru normálních napětí do 1 MPa (max. do hloubky 50 m pod povrchem výsypky) zachovávají si zakládané jílovité zeminy charakter sypaniny. Úhel vnitřního tření může dosáhnout až 30° , soudržnost maximální hodnoty 0,05 MPa. Mezi těmito dvěma složkami smyskové pevnosti se ukázala určitá nepřímá úměrnost. Na vyšší hodnoty úhlu vnitřního tření se váží nižší hodnoty soudržnosti a naopak. Jejich absolutní velikost závisí hlavně na druhu jílovité sypaniny a její vlhkosti, což pro určitou lokalitu souvisí úzce i s hloubkou jejího původního uložení v rostlém stavu.
- b) V oblasti normálních napětí 1,0 až 1,5 MPa nastává jev, který byl nazván "zhroucení struktury" jílovité sypaniny, kdy vzorek za tímto napětím ztrácí charakter sypaniny a chová se jako vzorek celistvý, což je doprovázeno poklesem úhlu vnitřního tření a růstem soudržnosti (úhel vnitřního tření klesne nejčastěji pod polovinu, soudržnost vzroste přibližně na dvojnásobek - obojí vůči hodnotám zjištěným za normálních napětí do 1 MPa).
- c) Vzorky sypaniny s přirozenou vlhkostí do 30 % objemových si snížené hodnoty smyskové pevnosti udržely až do maximálního možného vyvoditelného normálního napětí 3 MPa, daného konstrukcí smykače PÚDIS Praha (toto napětí působí v hloubce cca 150 m pod povrchem výsypky).

- d) U jílovitých zemin s vyšší přirozenou vlhkostí (obvykle nad 30 %), zpravidla z hloubek do 30 až 40 m, se jev "zhroucení struktury" posouvá do oboru nižších normálních napětí a zlom na mezní obálce není již tak ostrý, případně zcela vymizí, jak tomu bylo u vzorků zemin odebraných z 1. řezu na lokalitě Vršany a Merkur. U těchto zemin byl také v jediném případě prokázán jev, nazvaný "zhroucení textury" v oboru normálních napětí do 3 MPa za přirozené vlhkosti sypaniny, vedoucí ke ztekucení vzorku sypaniny a k poklesu smykové pevnosti k neměřitelným hodnotám instalovanými měřidly. Nejpravděpodobnější příčinou ojedinělosti tohoto zjištění byla horní hranice normálního napětí 3 MPa použitého smykače.
- e) Vliv vlhkosti na snížení smykové pevnosti za působícího napětí do 3 MPa lze zatím definovat tak, že dojde-li ke zvýšení přirozené vlhkosti sypaniny o 7 až 10 % objemových, pohybuje se úhel vnitřního tření jílovité sypaniny v rozmezí 1° až 5° .

Otevřenou otázkou zůstává chování jílovité sypaniny za normálního napětí vyššího než 3 MPa, což odpovídá geostatickému tlaku ve výsypkách vyšších než 150 m, tedy otázka nabývající stále na aktuálnosti. Potvrdí-li se, že jev, nazvaný "zhroucení textury" jílovité sypaniny, doprovázený jejím ztekucením, nastává i za přirozené vlhkosti v oboru normálních napětí do 6 MPa, tj. za tlaků, existujících u podložky výsypky s výškou do 300 m, bude možno u těchto výsypek předpokládat existenci tří oblastí s odlišným chováním jílovitých zemin. Do první oblasti bude příslušet svahová a povrchová část výsypky, sahající do hloubky, v níž již působí napětí vyvolávající u sypaniny "zhroucení struktury" (max. hloubka cca 50 m). Druhá, přechodná oblast, omezená shora plochou, na níž působí napětí vyvolávající jev "zhroucení struktury", a zdola plochou, na níž je dosaženo napětí vyvolávající jev "zhroucení textury". Třetí část - jádro výsypky - bude tou částí výsypky, v níž bude překročeno napětí, vyvolávající "zhroucení textury" jílovité sypaniny.

V této souvislosti bude u vysokých výsypek pro jejich stabilitu hrát nejdůležitější roli stav sypaniny ve svahové části výsypky, která bude v přeneseném smyslu slova vytvářet opěrnou zeď proti provalení měkce plastických až tekutých zemin z přechodné části a jádra výsypky. Tato skutečnost povede i k novému chápání problematiky stability vysokých výsypek a tím i k novému metodickému přístupu k jejich stabilitnímu řešení.

4. Směry dalšího výzkumu

V souvislosti s prokázaným jevem "zhroucení struktury" jílovité sypaniny, kdy vzorek za normálních napětí vyšších než 1,0 až 1,5 MPa se chová jako celistvý a tím jeho pevnostní parametry nejsou již ovlivněny původní kusovitostí, byly u nově projektovaného smykače zmenšeny rozměry krabice na 16 x 16 x 16 cm. Tímto zmenšením původní krabice velkorozměrového smykače dochází ke snížení potřebné hmotnosti vzorku ze 400 kg na 25 kg, ke snížení pracnosti s jeho odběrem, přípravou, naplňováním a vyprázdněním smykací krabice a zároveň i ke snížení požadavků na dopravu pro dovoz vzorku a jeho likvidaci.

Dále u nově projektovaného smykače dochází více než k šestinásobnému zmenšení potřebné přítláčné síly pro vyvolání žádoucího normálního napětí, čímž konstrukce smykače je méně robustní, řešení přenosu této síly z pohybující se části krabice do nepohyblivé podložky jednodušší a měření působících napětí přesnější.

Nejpodstatnějším přínosem zmenšené krabice nově projektovaného smykače je však to, že určení smykové pevnosti bude možné již v etapě průzkumu ložiska, a to na vzorcích odebraných z vrtných jader, což by u rozměrů krabice 40 x 40 x 40 cm vzhledem k požadované hmotnosti vzorku 400 až 500 kg nebylo možné.

Po výrobě a uvedení nově projektovaného smykače s rozměry krabice 16 x 16 x 16 cm, s přítláčnou silou 155 000 N a smy-

kovou silou 75 000 N a s dosažitelnou rychlostí smykání $0,002 \text{ mm.min}^{-1}$ do provozu, bude možno pokračovat ve vytýčených směrech dalšího výzkumu, které lze v hlavních rysech charakterizovat takto:

- a) Ověřit zatím ne zcela prokázaný jev "zhroucení textury", jež by rozhodujícím způsobem ovlivnil stabilitu vysokých výsypek a přístup k řešení jejich stability.
- b) Zachytit graficky nebo analytickou funkcí vliv vlhkosti na smykovou pevnost sypaniny.
- c) Ověřit vliv rychlosti zatěžování na vznik jevu "zhroucení struktury" (ztekucení vzorku) v podmínkách odvodněné a neodvodněné smykové zkoušky.
- d) Pokusit se na základě dosažených výsledků o metodiku výpočtu stability vysokých výsypek.
- e) Navrhnout zásadní hlediska pro technologii zakládání, respektující poznatky o chování jílovité sypaniny ve vysokých výsypkách.

Recenzoval: Ing. Josef Romportl,
VÚHU Most