

Ing. Jaroslav S t a n e k, CSc

Výsledky výzkumu smykové pevnosti sypaniny na velkorozměrovém
smykači

Úvod

Ve spojitosti se stabilitním řešením výsypek je jednou ze základních fyzikálně-mechanických veličin smyková pevnost. Protože u této veličiny je rozdíl mezi hodnotami smykové pevnosti celistvého a rozrušeného vzorku značný a převodní vztah mezi těmito hodnotami neexistuje, bylo zřejmé, že v případě stabilitního řešení výsypek není možné se opírat o hodnoty smykové pevnosti určené na celistvých vzorcích zeminy. Blíže k pevnostním vlastnostem sypaniny mohou být výsledky smykových zkoušek zjištěné na rozrušeném vzorku, jehož fragmentace se co nejvíce přiblíží skutečné kusovitosti zemin ukládaných na výsypce. Z tohoto důvodu a s přihlédnutím k technologickým možnostem budoucího výrobce byl navrhnut a vyroben krabicevý smykač s rozměry krabice 40x40x40 cm. Na tomto smykači byla pak provedena řada zkoušek, jejichž výsledky jsou uvedeny v dalším textu.

Nástin problematiky stabilitního řešení výsypek
a výsledky výzkumu

Úlohu řešit stabilitu zemního tělesa lze definovat v zásadě takto: ze známého stavu prostorové napjatosti, známých fyzikálně-mechanických vlastností zemin a jejich změn v čase určit velikost konečné deformace zemního tělesa.

Pro zjednodušení této úlohy se obecně přechází od prostorové napjatosti k rovinné napjatosti, která je pak určena dvěma složkami napětí /např. svislou a vodorovnou/. I přes toto zjednodušení týkající se stavu napjatosti, zůstává určení obou složek napětí velmi složité. Svislou složku napětí σ_y v hloubce h pod povrchem můžeme vyjádřit obecně $\sigma_y = \gamma \cdot h$, kde γ je průměrná měrná tíha zemního sloupce o výšce h . Protože průměrná měrná tíha sloupce zeminy ve výsypce je

opět složitou funkcí mnoha veličin ovlivňujících konsolidační proces, obchází se její exaktní určení přijatelně tak, že se používá buď zjištěné průměrné měrné tíhy vrtným průzkumem, nebo se určuje na základě výsledků dlouhodobého měření koeficientu nakypření na výsypkách a známé průměrné objemové tíhy rostlých zemín. Zjištěný koeficient nakypření se v SHR pohybuje u již ulehklých výsypek v rozmezí 1,05 až 1,1 a průměrná objemová tíha rostlých jílovitých zemín těsně kolem 20 kN.m^{-3} . Proto se obvykle pro výsypky do 100 m uvažuje s malým prospěchem na stranu bezpečnosti s průměrnou měrnou tíhou 18 až 19 kN.m^{-3} .

Podle výsledků zjišťování měrné tíhy u přirozeně vlhkých jílovitých zemín na velkorozměrovém smykači doporučujeme na výsypce uvažovat

v hloubce h /m/	objemovou tíhu $\gamma / \text{kN.m}^{-3} /$
0 až 10	14,5 až 16,5
10 až 20	15,5 až 17,0
20 až 30	16,5 až 19,0
30 až 40	17,3 až 19,7
40 až 50	17,7 až 20,0
větší než 50	18,0 až 20,0

Nižší hodnoty měrné tíhy patří zeminám z geotechnického horizontu /intenzivně mechanicky porušená povrchová vrstva jílovců/, vyšší hodnoty nejnižším partiím nadložních jílovců.

Určení velikosti horizontální složky napětí je zatím pro určení skutečného stavu napjatosti nejsložitějším problémem. Jak se při výzkumu smykové pevnosti na velkorozměrovém smykači ukázalo, bude velikost horizontálního napětí silně závislá na konsistenčním stavu jílovité sypaniny. Při vrtném průzkumu prováděném ve výsypkách je běžnou skutečností, že vrtání musí být předčasně ukončeno pro vnikání měkce až ka-

šovité měkce plastických zemin do vrtu jeho dnem. Měkce plastickou konsistencí získává jílovitá sypanina během času zvýšením své přirozené vlhkosti, je-li tvořena jíly až jílovcí z geotechnického horizontu. Naopak u jílovců mimo geotechnický horizont bylo zjištěno, že pro přechod do měkce plastického konsistenčního stavu nestačí jen zvýšení vlhkosti, ale musí být současně vystaveny hnětací práci. Protože při konsolidačním procesu dochází sedáním k úbytku potenciální energie výsypkových zemin ve vztažné soustavě výsypka-podložka výsypky, musí tento úbytek energie odpovídat za své největší části práci deformační, translační i rotační vyvolávající těsnější uspořádání sypaniny.

Práce deformační může podle konsistence zeminy /u jílovitých zemin v úzké vazbě s jejich smykovou pevností/ mít charakter destrukční, vazko-pružný nebo plastický. Charakter destrukční a pružně-vazký bude na místě tam, kde u sypaniny nedošlo ke změnám vlhkosti, tj. sypanina je dosud tvořena kusy jílovců s vlhkostí blízkou přirozené. Plastické deformace /a tím i hnětení/ probíhá naopak v polohách se zvýšenou vlhkostí sypaniny.

V rámci výzkumu bylo také provedeno měření barometrického tlaku pod výsypkovým stupněm 15 m vysokým tvořeným sypaninou z pevných jílovců. Výsledkem bylo zjištění, že změny barometrického tlaku jsou současně jak pod výsypkovým stupněm, tak i v jeho okolí. Toto zjištění je v souladu i s výsledky měření objemové tíhy pro tuto hloubku. Vzhledem k hodnotám měrné tíhy, bude dobrá komunikace vzdušín a tím i vody možná až do hloubky 30 m pod povrch výsypkového stupně.

Dále bylo měřením zjištěno, že se teplota zemin ve výsypce v hloubce asi 3 m pod jejím povrchem pohybuje po celý rok v rozmezí 9° až 13°C mimo oblasti hoření výklizu. Ve spojitosti s možnou komunikací vzdušín do uvedené hloubky a zjištěnými teplotními poměry souvisí zvláštní případ zvyšování vlhkosti zemin i na výsypkách založených na suché podložce za bezsrážkového období. Změnami barometrického tlaku je vzduch o vy-

soké relativní vlhkosti /zvláště v létě/ střídavě vtlačován a vysáván z dutin v tělese výsypky. Při zvýšení barometrického tlaku dojde ke vtlačení vzduchu do mezer mezi jednotlivé kusy zeminy a k jeho ochlazení. Byla-li relativní vlhkost vzduchu blízká 100%, vyvolá pokles jeho teploty vysrážení v něm obsažených vodních par na povrchu kusů zeminy. K výměně tohoto vzduchu zbaveného určitého množství vodních par dochází poklesem a opětným zvýšením barometrického tlaku. Opakování popsaného procesu znamená stále zvyšování vlhkosti sypaniny do hloubky cca 30 m pod povrchem výsypky, což prakticky znamená zvyšování vlhkosti sypaniny v každé etáži výsypky.

Pro bližší vysvětlení problematiky stanovení horizontálního napětí uvedme další poznatky o vlivu vody na smykovou pevnost. Pokusně bylo zjištěno, že nejdelší doba, po kterou trvá úplné nasycení vodou vysušené krychličky jílovců odebraných za všech skrývkových řezů VČSA o hraně 3 cm, je 120 minut. S ohledem na tuto skutečnost byly jílovce o hraně 10 až 15 cm ponořeny na 2 hodiny do vody. Po této době ještě stále ve tvaru kusů byly z vody vyňaty a vloženy do smykače. Již při prvním zatěžovacím stupni 0,2 MPa došlo netěsnostmi kolem roznášecí desky a spárou mezi oběma částmi krabice k unikání jilu o kašovité plastické konsistenci. Argument, že takového stavu zvlhčení nemůže dosáhnout jílovitá zemina ve výsypce, protože je pod zatížením, kdežto vzorek byl vystaven vníkaní vody bez zatížení, je snadno vyvratitelný. Výsypka je tvořena etážemi běžně nepřesahujícími výšku 30 m. Proto v rozsahu generálního svahu je vzhledem ke značné mezerovitosti dobře propustná. Kusy zeminy jsou zde vystaveny napětí pouze v oblasti vzájemných kontaktů a plochy ohraničující volný prostor /mezery/, u nichž je naopak ještě snaha k dilatanci, mohou dychtivěji přijímat vodu než volně ponořené kusy jílovců. K efektu stejnému jako u smykové zkoušky, může pak dojít až po přesypání etáže dalšími etážemi s tím, že kašovitá hmota je tlačena ve směru postupu výsypky do mezer svahové části výsypky.

K problematice komunikace vody výsypkou je možné uvést další příklad. Při vrtném průzkumu kopistské vnější převýšené výsypky o výšce kolem 45 m byly zjištěny čtyři hladiny vztla-
kové vody. Pravděpodobné vysvětlení je, že při větších srážkách pronikla voda do výsypky, při čemž rychlost jejího pohybu se zmenšovala vzhledem k hutnějšímu uspořádání kusů jílovité sy-
paniny v závislosti na rostoucí hloubce případně zhuštěněj-
ších polohách se styk zeminy s pronikající vodou prodlužuje, což znamená, že dojde k zplastičnění zemin v nejhlubší části výsypky, k jejich následné deformaci /uzavření mezer/ a tím k vytvoření technicky nepropustné vrstvy. Další pronikání vět-
šího množství vody se již na tomto horizontu zastaví a součas-
ně k vzhledem k určitému obsahu vody, jímž byly výše položené zeminy obohaceny předchozím stykem s vodou a průběžně probíha-
jící konsolidaci, může dojít ke zplastičnění některé náchyl-
nější vrstvy v menší hloubce, čímž se vytvoří další nepropust-
ný horizont. Pak voda uzavřená ve volných prostorách mezi jed-
notlivými nepropustnými vrstvami může nabýt následkem pokraču-
jící konsolidace charakter vztlakové vody.

Pak otázka velikosti horizontálního napětí ve výsypce úz-
ce souvisí se stářím výsypky, konsistencí zemin v ní uložených,
případně i s existencí horizontů vztlakové vody ve výsypce.

Nejčastěji se horizontální napětí vyjadřuje pomocí koefi-
cientu bočního tlaku v klidu K_0 , a to vztahem $\sigma_x = K_0 \cdot \sigma_y$

Pro koeficient K_0 udává Jáky $K_0 = 1 - \sin \varphi$

Brooker $K_0 = 0,95 - \sin \varphi$

Rowe $K_0 = \operatorname{tg}^2 45^\circ - \varphi/2$

Vztah Roweův vychází ze vztahu mezi hlavními napětími ze mez-
ného stavu

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot \operatorname{tg}^2 45^\circ - \varphi/2 - 2 \cdot c \cdot \operatorname{tg} 45^\circ - \varphi/2$$

Pak

$$K_0 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \operatorname{tg}^2 45^\circ - \varphi/2 - \frac{2 \cdot c}{\sigma_1} \cdot \operatorname{tg} 45^\circ - \varphi/2$$

Pro σ_1 odpovídající velkým hodnotám napětí pokládá Rowe

$$\frac{2 \cdot c}{\sigma_1} \cdot \operatorname{tg} 45^\circ - \varphi/2 = 0$$

takže

$$K_0 = \operatorname{tg}^2 45^\circ - \varphi/2 = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

Vztah Jákyho a Roweův dává pro $\varphi = 0$ $K_0 = 1$, pro $\varphi = 30^\circ$ /ve většině případů maximální hodnota úhlu vnitřního tření pro jílovce/ dává Jákyho vztah $K_0 = 0,5$ a vztah Roweův $K_0 = 0,3$.

Pro jílovitou zeminu v měkce plastickém až kašovité měkce plastickém stavu, kdy se její chování blíží chování kapalin a tudíž úhel vnitřního tření klesá k nule, je zřejmé, že bude $\sigma_x = \sigma_y$.

Pro tento případ je $K_0 = 1$ a získáme ho pro $\varphi = 0$ jak ze vztahu Jákyho, tak i Roweova.

Dále podle výsledků výzkumu kritické výšky / $\varphi \neq 0$ / odpovídá pozorovaným procesům lépe vztah Jákyho.

Tím lze uzavřít otázku rovinné napjatosti spojenou s problematikou určení složek napětí ve výsypkovém tělese.

Uvedený závěr se týká teoretické stránky věci, avšak pro praktické řešení /určení horizontálního napětí/ je nutná znalost fyz. - mechanických vlastností zemin v tělese výsypky a jejich změn v čase, jak je uvedeno na počátku této kapitoly v definici pro řešení stability zemního tělesa. Takto se dostáváme ke druhé části příspěvku, týkajícího se výsledku výzkumu smykové pevnosti na velkorozměrovém smykači.

Změny fyz. - mechanických vlastností zemin ve výsypce v závislosti na čase se zatím nedají exaktně postihnout. Podle toho, co bylo výše uvedeno, vyplývá, že vnitřní výsypky dosahující výšek 100 m a větších by při sklonech, které nyní dosahují, nemohly zůstat dlouhodobě stabilní. Hlavní stabilizující funkci těchto výsypek plní čerstvě nasypané hmoty, které

vlivem času ještě neprošly změnami, k nimž již došlo ve starší části výsypky /jádra/.

Z uvedených důvodů a také i vzhledem k funkčním možnostem vyrobeného smykače se provedl výzkum smykové pevnosti na těchto čerstvě uložených jílovitých zeminách z vnitřních výsypek DJŠ a VČSA.

Smykové zkoušky se prováděly za maximálního možného normálního napětí 0,5 MPa, tj. při maximální přitlačné síle 80 000 N, rychlostí cca 1 mm.s^{-1} a to na vzorcích s hranou do 1 cm a s hranou 8 až 15 cm.

Za uvedených podmínek bylo zjištěno, že pro jílovitou sypaninu pocházející z geotechnického horizontu se jak vrcholová, tak i reziduální soudržnost pohybuje převážně v rozmezí 0,03 až 0,05 MPa, při čemž jejich vrcholová hodnota úhlu vnitřního tření má rozmezí 14° až 20° , reziduální 8° až 12° .

Pro jílovité zeminy z poloh mimo geotechnický horizont, tj. přibližně z hloubek 40 až 100 m, má sypanina vrcholovou soudržnost v rozmezí 0,02 až 0,03 MPa a reziduální rozmezí 0,03 až 0,05 MPa /v obou případech s rostoucí hloubkou původního uložení vzorku hodnota soudržnosti klesá/. Vrcholová hodnota úhlu vnitřního tření dosahuje velikosti 24° až 32° , reziduální 12° až 20° / v obou případech s rostoucí hloubkou původního uložení vzorku hodnota úhlu vnitřního tření roste/.

Vrcholové hodnoty smykové pevnosti dokumentují stabilizující význam hmot uložených v rozsahu generálního svahu pro celou výsypku. Dále hodnoty reziduální smykové pevnosti také předznamenávají, jakou měrou se snižuje stabilizující význam této opěrné části výsypky, dochází-li na jednotlivých etážích k sypání na skluz, ať už z důvodu neodpovídající výšky etáže nebo nedodržováním technologické kázně.