

**SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA
V NITRE
TECHNICKÁ FAKULTA**

**POROVNANIE MERANÍ ŠMYKOVÝCH PRÍSTROJOV
V LABORATÓRNYCH PODMIENKACH**

Diplomová práca

Študijný program:	Kvalita produkcie
Študijný odbor:	238 6800 Kvalita produkcie
Školiace pracovisko:	Katedra konštruovania strojov
Školiteľ:	prof. Ing. Jozef Bajla, PhD.

Nitra 2011

Bc. Zuzana Mikušová

Čestné vyhlásenie

Podpísaná Zuzana Mikušová vyhlasujem, že som záverečnú prácu na tému „Porovnanie meraní šmykových prístrojov v laboratórnych podmienkach“ vypracovala samostatne s použitím uvedenej literatúry.

Som si vedomá zákonných dôsledkov v prípade, ak hore uvedené údaje nie sú pravdivé.

V Nitre 5.apríla 2011

Zuzana Mikušová

Pod'akovanie

Týmto by som sa chcela poďakovať predovšetkým svojmu školiteľovi prof. Ing. Jozefovi Bajlovi, PhD., ktorý ma usmerňoval pri písaní tejto diplomovej práce a za jeho cenné rady a pripomienky. A tiež chcem touto cestou poďakovať svojej rodine a najbližším priateľom za psychickú podporu a pohodu, ktorú mi vytvárali počas písania tejto práce.

Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá problematikou merania šmykových a normálových napätí v pôde, pomocou šmykových prístrojov. V našom prípade boli použitými prístrojmi na meranie šmykových parametrov pôdy modifikovaný prstencový prístroj, vrtuľkový prístroj a krabicový šmykový prístroj. Cieľom práce bolo porovnanie meraní šmykových prístrojov v laboratórnych podmienkach, porovnať fyzikálne a mechanické údaje medzi použitými laboratórnymi šmykovými prístrojmi, vyhodnotiť namerané výsledky a následne ich porovnať, na základe výsledkov nameraných hodnôt posúdiť vhodnosť vrtuľkového a modifikovaného prístroja pre meranie šmyku. Skúšobnými vzorkami bola ílovitá pôda odobratá z okolia SPU, konkrétne z botanickej záhrady univerzity. U vzoriek boli podľa platných noriem určené ich vlastnosti ako zrnitosť, vlhkosť a merná objemová hmotnosť. Toto určenie hodnôt vlastností je potrebné pre definovanie podmienok pri samotnom meraní. Prvým použitým prístrojom bol modifikovaný prstencový prístroj, ktorý umožňuje vyvedenie normálového zaťaženia pomocou medzikružia so závažím. Modifikovaný prístroj zaznamenáva krútiaci moment pri ušmyknutí medzikružia. Priamo je tak možné určiť vrcholovú a reziduálnu šmykovú pevnosť pôdy. Druhý použitý šmykový prístroj, vrtuľkový, umožňuje meranie krútiaceho momentu, po zatlačení vrtuľky do povrchu zeminy a zaťaženi potrebným závažím. Poslednou vykonávanou skúškou bola skúška v krabicovom šmykovom prístroji, pri ktorom na upnutú vzorku postupne pôsobí normálové napätie a jedna čel'usť krabice sa postupne posúva voči druhej. Výsledným meraním je šmyková sila a posunutie krabice pri jednotlivých stupňoch zaťaženia. Všetky výsledné namerané hodnoty boli zaznamenané do tabuliek v programe Microsoft Excel. Porovnaním meraní sme tak zistili, že modifikovaný prstencový prístroj a vrtuľkový prístroj pracujú podľa daných teoretických predpokladov a to na základe porovnania ich výsledkov s výsledkami po meraní v krabicovom šmykovom prístroji, ktorý bol použitý ako etalón. Pri laboratórnych meraniach nie je nutné vzorku nijak upravovať a orezávať, čo je pri meraniach na krabicovom prístroji nutnosťou.

Kľúčové slová: šmyková pevnosť pôdy, uhol vnútorného trenia, súdržnosť, vrtuľkový prístroj, krabicový šmykový prístroj, modifikovaný prstencový prístroj, skúšobná vzorka pôdy

Abstract

This diploma work deals with measuring of shear and normal stress in soil, with shear apparatus. In our case the used equipments for measuring shear parameters of soil were modified ring apparatus, vane apparatus and shear box apparatus. The target of this work was comparison of shear apparatus measuring in laboratory conditions, comparison of physical and mechanical data between laboratory shear apparatus being used, evaluate the measured results and subsequently compare these results and on the basis of measured results of amounts compare appropriateness of vane and modified apparatus for the measuring of shear. Sample pieces were clay soil taken from the surroundings of SPU, from the university Botanic Garden to be specific. Their properties like granularity, humidity and specific bulk weight were determined according to the rules in operation. This evaluation of properties is needed for definition on conditions while measuring as such. The first used apparatus was modified ring apparatus, which allows reduction of normal load by the help of circular ring with plumb. This way you can directly determine terminal and residual shear surface strength. A second used shear apparatus, or vane apparatus, allows measuring of the torsion moment, after pushing propeller into the soil surface and burdening it with needed weight. The last was performed in the shear box apparatus, in which there is direct stress causing on the fasten sample and one jaw of the box gradually approaching the other. Resultant measuring is shear power which moves boxes in particular degrees of load. All of the measured data's were note down in Microsoft Excel tables. Comparing the measurements we found out that modified ring apparatus and vane apparatus works according to given theoretic predictions and on the basis of their results with results after measuring in shear box apparatus which was used as a gauge. In laboratory measuring is not necessary to anyhow edit or cut down the sample, which in using of shear box apparatus is normally needed.

Key words: shear strength of soil, angle of internal friction, cohesion, vane apparatus, box shear apparatus, modified ring apparatus, sample of soils

Obsah

Obsah	6
Zoznam skratiek a značiek	7
Úvod	8
1 Prehľad o súčasnom stave riešenej problematiky	9
1.1 Vlastnosti pôdy	9
1.2 Šmyková pevnosť pôdy	12
1.3 Spôsoby určovania šmykovej pevnosti pôdy	15
1.4.1 Prostá tlaková skúška	17
1.4.2 Skúška v triaxiálnom prístroji	19
1.4.3 Skúška v krabicovom prístroji	24
1.4.4 Vrtuľková šmyková skúška	29
1.4.5 Torzný prístroj	33
1.5 Prehľad používaných laboratórných prístrojov v odbornej praxi	34
2 Cieľ práce	39
3 Metodika práce	40
3.1 Charakteristika použitého materiálu	40
3.2 Charakteristika použitých laboratórných šmykových prístrojov	40
3.3 Popis experimentálneho merania šmykovej pevnosti pôdných vzoriek	44
3.4 Popis experimentov a podmienok merania	45
3.5 Záznam a spracovanie výsledných hodnôt	47
4 Výsledky práce	48
4.1 Meranie v prstencovom šmykovom prístroji	49
4.2 Meranie na vrtuľkovom prístroji	51
4.3 Meranie v krabicovom šmykovom prístroji	53
5 Diskusia	57
Návrh na využitie výsledkov	60
Záver	61
Zoznam použitej literatúry	63

Zoznam skratiek a značiek

c	súdržnosť, resp. kohézia, Pa
f	súčiniteľ trenia
h	výšky vrtuľky, m
k	rozmerová konštanta vrtuľky, m
n	počet skúšok
r	korelačný súčiniteľ
v	rýchlosť, mm.min ⁻¹
A	plocha, m ²
D	priemer vrtuľky, m
M _k	krútiaci moment, Nm
M _r	ustálený krútiaci moment, Nm
N	normálová sila, N
R	polomer vrtuľky, m
R _s	stredný polomer vrtuľky, m
S	plocha medzikružia, m
T	šmyková sila, N
α	uhol pootočenia vrtuľky, deg
Δα	zmena uhla pootočenia, deg
Δl	zmena dĺžka, resp. posunutie, m
φ	uhol vnútorného trenia, deg
σ	normálové napätie, Pa
σ _{ef}	efektívne normálové napätie, Pa
σ ₁	zvislé normálové napätie, Pa
σ ₂	vodorovné normálové napätie, Pa
τ	tangenciálne napätie, Pa
τ _f	šmyková pevnosť pôdy, Pa
τ _d	zbytková šmyková pevnosť pôdy, Pa
τ _r	kritická pevnosť pôdy, Pa

Úvod

Pôda je prostredie, ktoré využíva ľudstvo pre plnenie rôznych cieľov a požiadaviek. Pôda má niekoľko funkcií ktoré plní, predovšetkým je prostredím, v ktorom sa odohrávajú zložité procesy premeny chemických látok, vody, svetla a slnečnej energie pri úrodovných procesoch, ako aj prostredím pre ukotvenie rastlín k prostrediu. Z pohľadu človeka ide o prostredie, vytvárajúce podklad pohybu pre stroje a ľudí, so svojimi špecifickými vlastnosťami, dôležitými pre určenie jej použitia v rôznych oblastiach. Pôdne vlastnosti možno z teoretického aj praktického hľadiska rozčleniť na základné fyzikálne vlastnosti, fyzikálno-mechanické vlastnosti, hydrofyzikálne a aeračné vlastnosti a tepelné vlastnosti. Fyzikálno-mechanickými vlastnosťami pôdy sú aj uhol vnútorného trenia a súdržnosť, respektíve kohézia. Určením týchto hodnôt možno následne vypočítať ďalšie potrebné parametre.

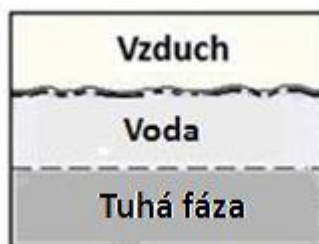
Pôda ako trojfázová sústava má preto veľmi zložitý prenos síl a zaťaženie. Každé zaťaženie a prenos pôsobiacich síl môže vyvolať jej porušenie. Každý takýto stav je nežiadúci a preto je nutné tomu predchádzať. Je preto nutné poznať šmykovú pevnosť pôdy. Šmyková pevnosť pôdy určuje na odpor, ktorý je pôda schopná vynaložiť proti šmykovému porušeniu. Tieto hodnoty šmykovej pevnosti pôdy a ďalších potrebných parametrov možno zistiť pomocou šmykových prístrojov. K týmto prístrojom menovite patrí prostý tlakový prístroj, vrtuľkový prístroj a tiež aj krabicový šmykový prístroj. Najpresnejšie výsledky šmykovej pevnosti poskytuje triaxiálny šmykový prístroj.

Pri riešení práce sme však použili iba tri základné šmykové prístroje. Prvým meracím prístrojom bol modifikovaný prstencový prístroj, druhým prístrojom bol vrtuľkový prístroj a posledným porovnávacím prístrojom bol štandardný krabicový šmykový prístroj. Výsledné hodnoty modifikovaného a vrtuľkového prístroja boli porovnávané s výsledkami krabicového šmykového prístroja, ktorí slúžil ako etalón pre porovnanie výsledkov meraní. Všetky potrebné údaje o priebehoch a výsledkoch meraní sú uvedené v nasledujúcich kapitolách predloženej diplomovej práce.

1 Prehľad o súčasnom stave riešenej problematiky

1.1 Vlastnosti pôdy

Pôda je základným pilierom ľudskej existencie a hlavným výrobným prvkom. Jej základ tvorí zmes zrn pevnej horniny, ktoré sú obklopené vodou a plynom. Tým vyplňajú póry horniny. Z hľadiska materiálového zloženia možno pôdu všeobecne charakterizovať ako heterogénny, viaczložkový systém, ktorý sa skladá z tuhej, kvapalnej a plynnej fázy. Tuhá fáza sa skladá z minerálneho a organického podielu, kvapalnú fázu tvorí roztok a plynú fázu pôdny vzduch. Zastúpenie týchto zložiek sa mení, závisí napr. od druhu pôdy a od jej zavlhčenia. Podiel tuhej fázy sa väčšinou mení v úzkom rozmedzí, najväčším zmenám podlieha pomerné zastúpenie kvapalnej a plynnej fázy. Medzi jednotlivými fázami je úzky vzťah a navzájom na seba pôsobia. Posledné dve fázy (kvapalná a plyná fáza) nemajú šmykovú pevnosť, môžu však prenášať napätie v tlaku alebo ťahu.



Obr. 1

Pôdny systém

Pôda je predovšetkým samostatný, neustále sa vyvíjajúci prírodno-historický útvar, vyznačujúci sa špecifickými znakmi stavby, skladby a vlastnosťami (Sotáková, 1988).

K hlavným vlastnostiam pôdy patria jej technické vlastnosti. Najdôležitejšou technickou vlastnosťou pôdy je súdržnosť, čiže kohézia pôdy. Súdržnosť je vlastne odolnosť voči pôsobeniu vonkajšieho tlaku na drobenie agregátov. Má tiež schopnosť vyvíjať odpor pri vnikaní cudzích telies do pôdy.

Fyzikálne vlastnosti pôdy predstavujú celý súbor vlastností, ktoré sú podmienené stupňom disperzity a vzájomnými vzťahmi medzi pevnou fázou pôdy, pôdnym roztokom a vzduchom v pôde (Noskovič et al., 2005).

Základnými fyzikálnymi vlastnosťami sú:

- merná hmotnosť - vyjadruje hmotnosť danej objemovej jednotky (napríklad m^3), v našom prípade odobratej vzorky pôdy bez pórov a bez vody. Táto špecifická hmotnosť sa mení len zriedkakedy. Toho príčinou je jej závislosť od mernej hmotnosti minerálov, z ktorých pozostáva. Merná hmotnosť sa v pôdnych vzorkách pohybuje v rozmedzí 2,35 až 2,75 $t \cdot m^{-3}$. Merná hmotnosť sa okrem iného používa aj pre výpočet hodnoty pórovitosti a zrnitosti pôdnej vzorky.
- objemová hmotnosť - objemová hmotnosť vyjadruje vlastne hmotnosť danej objemovej jednotky pôdnej vzorky ($1 m^3$) v jej prirodzenom uložení. Na rozdiel od mernej hmotnosti sú jej namerané hodnoty vždy nižšie. Dôvodom je vyjadrenie hmotnosti nielen u pevných častíc pôdy, ale aj u kvapalnej a plynnej fázy pôdy, ktorá tiež vyplňuje póry v pôde. Tento typ hmotnosti je predovšetkým závislý od priestorového usporiadania pôdnych častíc, od zrnitostného zloženia v pôde, štruktúry a prítomného obsahu vody a vzduchu v pôde.
- zrnitosť - zrnitosť je dôležitou fyzikálnou charakteristikou pôdy, ktorú môžeme určiť vizuálne pri skúmaní pôdneho profilu ako ľahkú (piesočnatá), stredne ťažkú (hlinitá), ťažkú (ílovitá), štrkovitú a kamenistú pôda. Zrnitosť ovplyvňuje pohyb vody v pôde.
- štruktúrnosť - môžeme vyjadriť ako schopnosť pôdy vytvárať vnútorné organizácie zrn rôzneho priemeru, v dôsledku čoho vzniká v pôde určité osobitné zloženie. Tiež má aj opačnú schopnosť, čiže rozpad týchto veľkých organizácií zrn na menšie. Poznáme tak štyri základné tvary pôdnej štruktúry, a to guľovitý tvar, kockovitý tvar, hranolovitý tvar a posledný doskovitý tvar.
- pórovitosť - táto vlastnosť pôdy vyjadruje celkový objem všetkých pórov a medzier, ktoré sa nachádzajú medzi pevnými časticami pôdy vyjadrených v percentách k celkovému objemu pôdy v jej neporušenom stave. Pórovitosť spolu so štruktúrou pôdy poukazujú na fakt, že je pôda poréznym útvarom. Póry v pôde tak umožňujú veľmi dôležitú činnosť v existencii rastlín. Okrem toho sú v nich vykonávané všetky fyzikálne a iné potrebné procesy potrebné pre život pôdy a jej vlastný vývoj. Pórovitosť sama o sebe nie je stálou

hodnotou pôdy a závisí od objemovej hmotnosti pôdy. Jej primerané hodnoty sa pohybujú v rozmedzí od 30 do 50 percent.

Fyzikálno-mechanické vlastnosti sú nevyhnutné pri voľbe vhodného náradia a termínu agrotechnického zásahu pri využívaní pôdy. Sú závislé od mnohých činiteľov, ako sú napríklad zrnitosť, vlhkosť, štruktúra a iné.

K najdôležitejším fyzikálno-mechanickým vlastnostiam pôdy využitelných v poľnohospodárskej pedológii však patria:

- konzistencia zemín - je fyzikalno-mechemická vlastnosť pôdy, určujúca stupeň tuhosti zeminy, plasticitu, súdržnosť čiastočiek, či príľnavosť k cudzím telesám (adhézia). Vyjadruje sa stupňom súdržnosti, lipnavosti a odporu proti deformácii pri určitej vlhkosti, ktorú vyjadrujeme termínmi: kyprá, tuhá, neplastická, plastická, lepivá a nelepivá.
- napučíavanie a usadenie - táto vlastnosť pôdy je dôsledkom pomerov vlhkostí pôdy, ktoré sú sprevádzajú objemové zmeny
- súdržnosť - alebo kohézia , sa prejavuje ako schopnosť pôdy odolávať tlaku pôsobiacemu na povrch pôdy a jej schopnosť klásť voči tomu primeraný odpor. Táto vlastnosť je závislá od množstva vody obsiahnutej v pôde a od druhu pôdy.
- lipnavosť - čiže adhézia, je schopnosť pôdy prilepiť sa k cudzím telesám, ktorá je podmienená prítlačivosťou medzi molekulami nachádzajúcimi sa na povrchu telies, ktorých sa dotýkajú.
- merný odpor - je odpor, ktorý vyvinie pôda pri pôsobení určitých telies. Tento odpor najčastejšie ovplyvňujú vlastnosti ako zrnitosť pôdy, vlhkosť, humóznosť a hĺbka pôsobenia telesa do pôdy.

Pre základné zatriedenie zeminy je potrebné zistiť zrnitostné zloženie, vlhkosť, plasticitné vlastnosti a objemovú hmotnosť. Všetky tieto vlastnosti pôdy upozorňujú na dôležitosť správneho narábania a užívania pôdy. Výsledné hodnoty nameraných vlastností udávajú smer akým je nutné postupovať k požadovaným výsledkom a či vôbec je možné tieto požadované výsledky dosiahnuť. Týmito zisťovaním fyzikálnych a mechanických vlastností pôdy sa zaoberá mechanika zemín.

Mechanika zemín je veda, ktorá sa zaoberá rovnováhou, napätím a pretvorením zemín. Zemina je sypká alebo spevnená, ľahko rozpojitelná hornina.

Mechanika zemín skúma:

- objemovú hmotnosť
- pórovitosť
- namŕzavosť
- stlačiteľnosť
- zhutniteľnosť
- únosnosť
- uhol vnútorného trenia zeminy

Podľa fyzikálnych vlastností delíme zeminy na dve skupiny:

- nesúdržné zeminy - sú veľmi piesočnaté, štrkovité, v príkrych/šikmých svahoch sa neudržia bez paženia. Zrážková voda sa v nich neudrží. Nie sú vzlínave, sú nenamŕzavé a objemovo stále. Ako základové pôdy veľmi dobré.
- súdržné zeminy - sú ílovité udržia sa v príkrych sklonoch aj bez paženia. Obsahujú íl, prach a hlinu. Ľahko prijímajú vodu a neprepúšťajú (udržiavajú) ju. Zväčšujú svoj objem, sú viac stlačiteľné ako nesúdržné. Sú menej vhodné na zakladanie.

1.2 Šmyková pevnosť pôdy

Namáhanie, teda zaťažovanie pôdy vedie často k jej porušeniu, čiže k prekročeniu jej medze pevnosti. K porušeniu tak dochádza vtedy, ak už pôda nie je schopná odolávať danému spôsobu zaťaženia. Prevažná časť prípadov porušenia pôdy má šmykový charakter. Pre všetky výpočty stability ako aj odhady únosnosti je potrebné poznať parametre šmykovej pevnosti pôdy.

Šmyková pevnosť zemín je ovplyvňovaná dvoma faktormi:

- vnútorným trením - je charakterizované uhlom vnútorného trenia φ . Závisí od druhu použitej pôdy.
- súdržnosťou pôdy „c“ (kohéziou) - dá sa definovať ako šmyková pevnosť pri nulovom normálovom napätí.

Príčinami porušenia pôd sa zaoberali mnohí vedci, teoretické základy rozpracovali Coulomb a Mohr, ktorí sformulovali dve najznámejšie metódy popisu týchto javov.

Coulomb popisoval príčiny porušenia zemín principiálne. Podľa jeho teórie nastáva porušenie práve vtedy, keď šmykové napätie dosiahne hodnotu šmykovej pevnosti $\tau = \tau_f$. Coulomb (1773) na základe jednoduchých skúšok so sypkými a súdržnými zeminami stanovil, že šmyková pevnosť sypkých zemín je:

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

kde: σ - je normálové napätie, ktoré pôsobí kolmo na plochu porušenia

$\tan \varphi = f$ - súčiniteľ trenia

φ - uhol priamky, ktorý udáva závislosť medzi napätím σ a príslušnou šmykovou pevnosťou τ od vodorovnej osi.

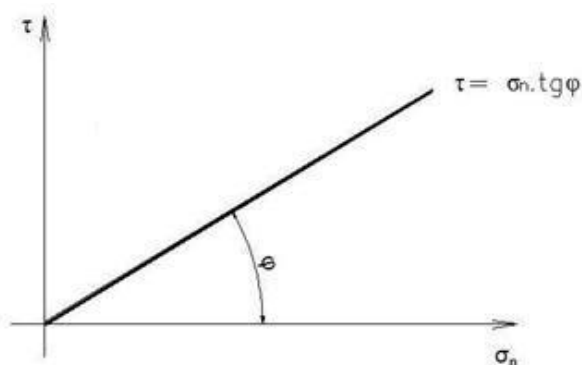
U ílov je podľa Coulomba šmyková pevnosť:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (2)$$

kde: c - súdržnosť (pri grafickom zobrazení závislosti medzi σ a τ je súdržnosť vlastne šmyková pevnosť, ak je normálové napätie $\sigma = 0$).

Podľa hodnôt φ a c dostaneme pre rôzne zeminy rôzne priamky, charakterizujúce závislosť τ na σ_n :

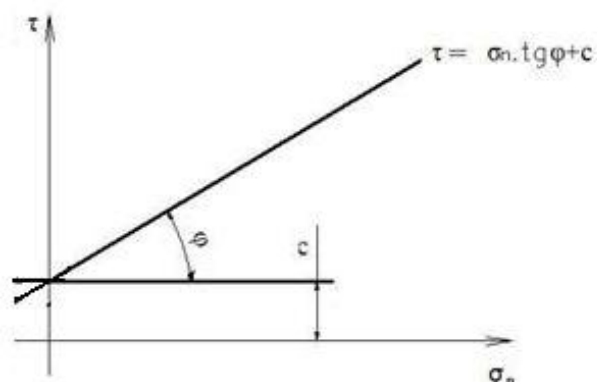
- Pri sypkých zeminách $c = 0$. Čiara $\tau = f(\sigma_n)$ prechádza počiatkom.



Obr. 2

Šmyková pevnosť pôdy podľa Coulomba pri sypkých zeminách

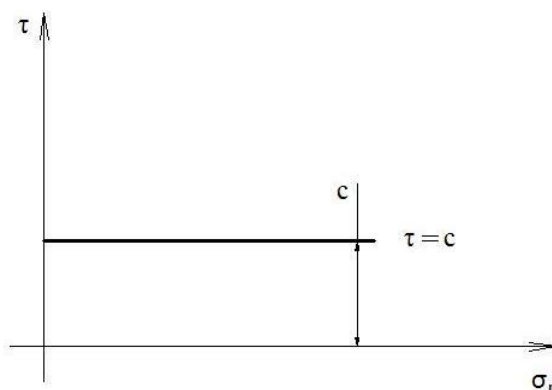
- Pri súdržných zeminách platí vo všeobecnom prípade $\varphi > 0$ a $c > 0$. Čiara $\tau = f(\sigma_n)$ pretína os tangenciálnych napätí na kladnej strane. Podľa toho môžeme súdržnosť definovať ako odpor proti ušmyknutiu pri nulovom normálovom napätí.



Obr. 3

Šmyková pevnosť pôdy podľa Coulomba pri súdržných zeminách

- V niektorých prípadoch majú súdržné zeminy uhol vnútorného trenia zanedbateľne malý, $\varphi \cong 0$. V tomto prípade je $\tau = c$ a čiara $\tau = f(\sigma_n)$.



Obr. 4

Šmyková pevnosť pôdy podľa Coulomba pri $\varphi \approx 0$

Mohrova metóda popisuje kružnicu, na ktorej je možné zobrazenie napätí v ľubovoľnom bode zaťaženej zeminy. Mohrova kružnica a obálka pevnosti znázorňujú porušenie pôdy pri kombinácii maximálnych hodnôt šmykového napätia a efektívneho

normálového napätia. Obálka Mohrových kružníc vytvára temer priamku, ktorú popísal Coulomb.

1.3 Spôsobu určovania šmykovej pevnosti pôdy

Šmyková pevnosť pôdy sa určuje priamo v teréne, čo znamená priame vykonanie skúšky na danom type pôdy alebo v laboratóriu, kde sú skúšobné vzorky odobraté priamo z terénu. Veľkú výhodu preto majú skúšky vykonávané priamo v poľných podmienkach, kde sa tak prejavuje presnosť nameraných hodnôt šmykovej pevnosti pôdy. Aj napriek tomu však najväčšou nevýhodou priamych skúšok býva ich finančná a realizačná náročnosť. Z toho dôvodu sú častejšie používané práve laboratórne skúšky. Pri týchto skúškach musia byť zachované všetky pôvodné vlastnosti odobratých vzoriek. Výsledky laboratórných skúšok sa budú čoraz viac približovať realite, čím najpresnejšie namodelujeme podmienky, pri ktorých pôsobí priama skúška v teréne.

Druhy skúšok šmykovej pevnosti pôdy:

a. priame skúšky - „in situ“ :

- penetračné metódy - zatlačanie plochých dosiek
- zatlačanie základných telies
- zaťažovacie skúšky
- šmykové skúšky - skúška na blokoch
- vrtuľková skúška

b. laboratórne skúšky:

- prostá tlaková skúška
- skúška v triaxiálnom prístroji (typy skúšok - UU, CU, CD)
- skúška v krabicovom prístroji
- vrtuľková šmyková skúška

Prístroje na stanovenie šmykovej pevnosti zemín, môžeme tiež rozdeliť nasledovným spôsobom do týchto troch skupín:

- translačné prístroje - sú prístroje zložené z dvoch krabíc, preto sa nazývajú aj krabicové prístroje

- torzné prístroje - prístroje s valcovitým tvarom
- trojosové prístroje - sú triaxiálne prístroje na meranie šmykovej pevnosti zemín

1.4 Šmykové prístroje používané v laboratórnych podmienkach

Skúšky šmykovej pevnosti pôdy vykonávané v laboratórnych podmienkach umožňujú pomerne presne definovať okrajové podmienky a eliminovať nežiadúce vplyvy. Napriek tomu sa za ťažšie považuje odber vzorky a jej príprava. Najdôležitejšie pri tom je zabezpečiť zachovanie pôvodných vlastností odobratých vzoriek, či už pri samotnom odbere alebo ďalej v laboratóriu.



Obr. 5

Odber vzoriek

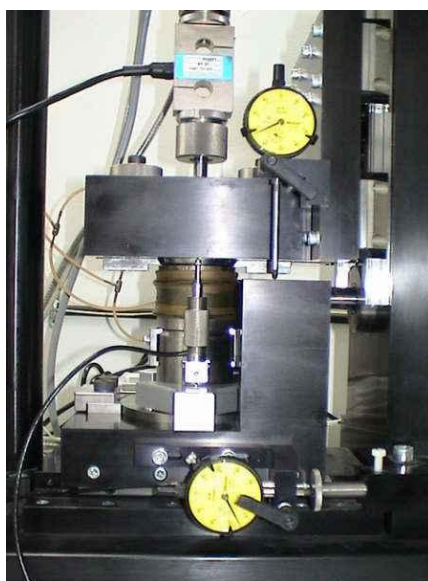
Po odobratí vzorky z pôdy, následne v laboratóriu rozoznávame dva základne pojmy:

- skúšobná vzorka porušená - je vzorka pôdy, ktorej sa odberom zmenili vlastnosti, ako štruktúra či vlhkosť pôdy. Všetky tieto zmeny sa pri každej vykonanej skúške musia zapísať do záznamu o skúške. Každá zmena vlastností vzorky sa prejaví na výsledkoch skúšky. Preto je nutné tieto zaznamenať pre ich porovnanie a následne vyvodenie potrebných záverov.
- skúšobná vzorka neporušená - u tohto typu vzorky v priebehu odberu nenastala žiadna zmena vlastností, ako napríklad zmena štruktúry, vlhkosti, zrnitosti a iných. Vzorka zostala neporušená až do začiatku vykonania určeného typu skúšky.

Základné vybavenie laboratória je dané podľa typov vykonávaných skúšok. Je možné stanoviť základné laboratórne podmienky, ktoré sú neskôr menené podľa druhu vykonávanej skúšky. Hlavnými požiadavkami laboratórných prostredí je dostatočné osvetlenie, vlhkosť a teplota prostredia, potrebná meracia technika a vodný zdroj.

1.4.1 Prostá tlaková skúška

Prostá tlaková skúška je skúška určená pre laboratórne stanovenie šmykovej pevnosti pôdy vykonávaná podľa normy STN 72 1025. Vzorky pôd používané u tohto typu skúšky sú súdržné, vodou nasýtené, vhodné použiť v neporušenom, ale aj porušenom stave. Táto skúška je inak charakterizovaná aj ako rýchla skúška. To znamená, že je vhodné aj rýchle zaťažovanie vzorky pôdy kde v priebehu tejto krátkej doby nie je možná jej konsolidácia.



Obr. 6

Prístroj na meranie pevnosti v prostom tlaku

Skúšobné vzorky majú tvar kruhového valca s minimálnym priemerom 38 mm. Ako pri ostatných skúškach, tak aj pri tejto nesmie skúšobná vzorka pôdy obsahovať neprípustne hrubé zrná, ktorých najväčšia časť nesmie byť väčšia ako 1/6 priemeru vzorky. Pri odoberaní skúšobnej vzorky sa musí dbať na zachovanie jej pôvodných vlastností.

Podľa typu použitého skúšobného prístroja je možné určiť aj typ prevádzanej skúšky, ktoré sa však považujú za rovnocenné:

- skúška s riadenou deformáciou
- skúška s riadeným napätím

Skúšobný prístroj umožňuje vyvodenie a meranie osovej sily na skúšobnej vzorke. Nárast deformácie musí byť nastavený v rozsahu 0,2 až 2% počiatočnej výšky vzorky za minútu tak, aby šmýkanie trvalo asi 8 až 10 minút. Skúška prebieha v kľudnom a ničím nerušenom prostredí, bez akýchkoľvek otrasov alebo zmien teploty, či iných jej prirodzených vlastností.

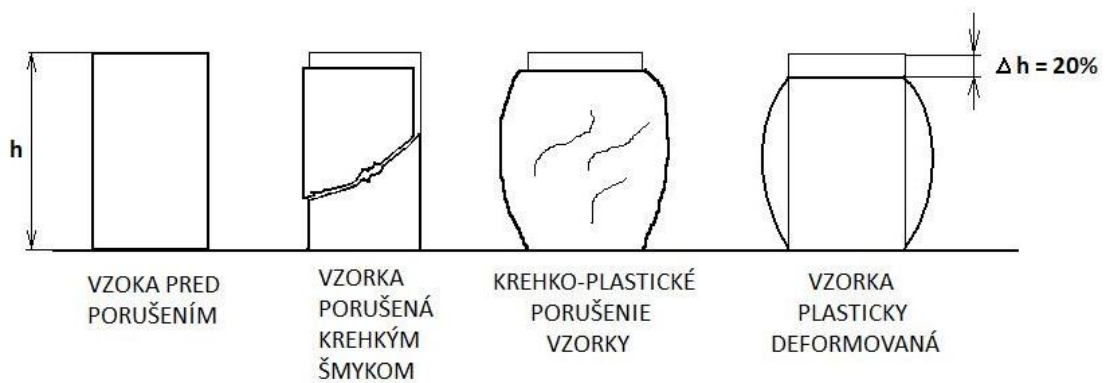
Skúška sa považuje za ukončenú vtedy, ak by bola splnená jedna z uvedených podmienok:

- osová sila v skúšobnom prístroji poklesne na hodnotu 0,9 jej najvyššej dosiahnutej hodnoty P_f
- osová deformácia dosiahla 15% výšky skúšobnej vzorky

Po ukončení priebehu skúšky sa vykonáva grafické znázornenie porušenia skúšobnej vzorky a následné vyhodnotenie celej skúšky.

Vyhodnotenie skúšky sa dokladuje do záznamu o skúške, ktorý obsahuje:

- identifikačné údaje o skúšobnej vzorke a meracom zariadení
- údaje o príprave vzorky a priebehu skúšky (rýchlosť deformácie)
- údaje pre výpočet fyzikálnych parametrov pred skúškou a po skúške
- údaje o deformácií a sile
- grafické znázornenie porušenia skúšobnej vzorky
- ostatné odchýlky, ktoré mohli ovplyvniť výsledok skúšky
- niektoré z údajov prvotných záznamov o skúške môžu byť zaznamenávané v dátovom médiu automatickej registrácie, tie však musia obsahovať údaje na ich vyhľadávanie.



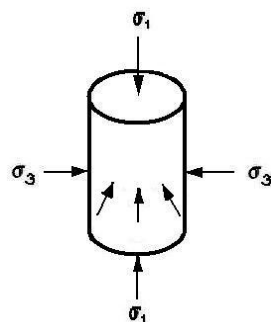
Obr. 7

Príklady porušenia vzoriek pri tlakovej skúške

Výsledkom skúšky je zistenie prostej tlakovej pevnosti v maximálnych napätiach, prípadne totálna súdržnosť. V prípade, že skúšobná vzorka obsahuje neprípustné zrná alebo bola skúška vykonávaná len na jednej skúšobnej vzorke, je výsledná hodnota vykonanej skúšky len orientačná.

1.4.2 Skúška v triaxiálnom prístroji

Triaxiálne skúšky šmykovej pevnosti zemín (Zavoral, 1987) poskytujú podklady predovšetkým pre výpočty únosnosti základov stavieb (neporušené vzorky) a pre posudzovanie stability svahov zárezov (neporušené vzorky) a násypov (hutnené vzorky alebo neporušené vzorky odobrané z násypov). Laboratórnu metódu stanovenia šmykovej pevnosti zemín triaxiálnym prístrojom popisuje norma STN 72 1031, ako metódu založenú na namáhaní skúšobnej vzorky rastúcim osovým zaťažením pri konštantnej rýchlosti osovej deformácie v smere stláčania a pri konštantnom tlakovom plášťovom napätí do porušenia skúšobnej vzorky ušmyknutím alebo do dosiahnutia stanovenej deformácie. Triaxiálny prístroj sa zaraďuje do skupiny trojosových prístrojov. To znamená, že pri týchto skúškach je skúšobná vzorka namáhaná priestorovým napätím. Toto napätie v troch navzájom kolmých smeroch je vopred známe.



Obr. 8

Pôsobenie napätí na skúšobnú vzorku

Podľa toho následne rozlišujeme tieto štandardné typy skúšok UU, CIU, CAU, CIUP (CIP), CAUP(CAP), CID, CAD podľa tabuľky 1:

Tab. 1

Štandardné typy skúšok

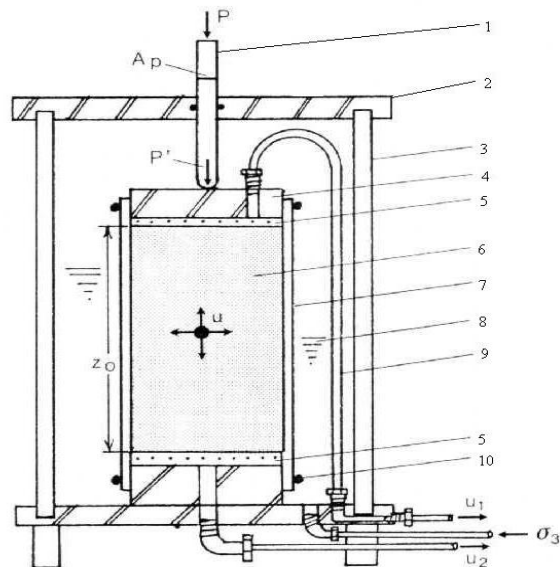
Podmienky šmykania	Podmienky konsolidácie		
	Bez konsolidácie	Konsolidácia izotropná	Konsolidácia anizotropná
Skúšobná vzorka neodvodnená, bez merania pórového tlaku	UU	CIU	CAU
Skúšobná vzorka neodvodnená a meraním pórového tlaku	-	CIUP (CIP)	CAUP (CAP)
Skúšobná vzorka odvodnená	-	CID	CAD

Postup skúšky sa volí na základe použiteľnosti výsledkov pre účel použitia daného typu pôdy.

Vzorka zeminy má kruhový tvar a jej menovité priemery sú 38 mm a 100 mm a na oboch základniach má porézne dosky. Pomer výšky vzorky k priemeru pred vykonaním skúšky býva aspoň 2. Skúšobné vzorky pri tomto druhu skúšky môžu obsahovať aj neprípustne hrubé zrná. To je však podmienené ich ojedinelým výskytom vo vzorke a neovplyvnia tak výsledok skúšky. Pri manipulácii so vzorkou pred použitím v skúšobnom zariadení je nutné dbať na zvýšenú opatrnosť, kvôli zachovaniu

pôvodných vlastností skúšobnej vzorky. Taktiež tieto vlastnosti nesmie zmeniť ani prostredie, v ktorom sa bude vzorka nachádzať počas skúšky. Na určenie šmykovej pevnosti pôdy sú potrebné minimálne tri zhodné skúšobné vzorky, najlepšie s ešte jedným rezervným. Pred skúškou sa stanovuje hmotnosť vzoriek s maximálnou presnosťou.

Na začiatku skúšky sa skúšobná vzorka pôdy, ktorá má kruhový tvar vloží do tlakovej komory a obalí sa tenkou gumovou blanou. Táto tlaková komora je vyplnená vodou, ktorej sa mení tlak. Pomocou nej sa vzorka stlačí bočnými napätiami σ_2 a σ_3 . Pôsobí na vzorku zo všetkých strán a v priebehu skúšky sa udržiava na konštantnej hodnote. Týmto tlakom je zemina stláčaná. Piest na hornej časti vzorky pôsobí stále sa zväčšujúcim zvislým napätím až do hodnoty σ_1 .



Obr. 9

Schéma triaxálneho prístroja (Bajla, 2004)

- 1 – zaťažovací piest, 2 – vrchná príruha, 3 – valcový plášť, 4 – zaťažovacia hlava s drenážnym otvorom, 5 – vzorka pôdy, 6 – filtračná platňa, 7 – nepriepustný pružný návlek (membrána), 8 – voda, 9 – odvodňovacia hadička, 10 – pružný tesniaci krúžok

Skúšobná vzorka sa osadí na podstavu prístroja a uzavrie sa. Takáto vzorka je následne vystavovaná napätiu pôsobiacemu zo všetkých strán, alebo postupne sa zväčšovanému zvislému napätiu σ_1 . Pri následnom meraní sa zvislé napätie σ_1 pôsobiace na vzorku pôdy zväčšuje a vodorovné napätie $\sigma_2 = \sigma_3$ zostáva na konštantnej

hodnote až do okamihu, keď sa začnú vytvárať klzné plochy. Po takomto vytváraní klzných plôch sa skúšobná vzorka pôdy ušmykne a zvislé napätie σ_1 tak poklesne.

Po ukončení skúšky sa skúšobná vzorka opäť zväži s rovnakou presnosťou ako pred začatím skúšky. Následne sa zjednotia dosiahnuté výsledky, vytvorí sa záznam o priebehu skúšky a porušenie vzorky sa graficky znázorní.

Záznam o skúške obsahuje podľa normy STN 72 1031 Laboratórne metódy stanovenia šmykovej pevnosti zemín triaxiálnym prístrojom nasledovné údaje:

- identifikačné údaje skúšobnej vzorky
- identifikačné údaje skúšobného prístroja a meracieho zariadenia, najmä menovitý priemer skúšobnej vzorky, typy meradiel a ich kalibračné konštanty
- údaje o príprave skúšobnej vzorky, najmä popis zeminy, stav vzorky, výskyt neprípustne hrubých zrn, metódy prípravy, počiatočné rozmery skúšobnej vzorky a pod.
- okrajové podmienky skúšky, t.j. symbolické označenie typu skúšky, veľkosť komorového tlaku, veľkosť nasýteného tlaku, spôsob zaťažovania pri konsolidácii, veľkosť osovej sily pri anizotropnej konsolidácii, spôsob odvodnenia pri nasýtení, konsolidácii a šmýkaní, rýchlosť osovej deformácie pri šmýkaní a pod.
- údaje pre výpočet fyzikálnych parametrov skúšobnej vzorky pred skúškou, eventuálne po nasýtení, po konsolidácii a po skúške
- údaje o priebehu nasycovania, konsolidácie a šmýkania, t.j. najmä záznamy objemových zmien, osovej sily a pórových tlakov
- údaje získané po vybratí skúšobnej vzorky z komory, ako spôsob porušenia, výskyt a množstvo neprípustne hrubých zrn v šmykovej zóne a pod.
- odchýlky od normových postupov a spresnenia tam, kde norma pripúšťa voľbu medzi normovými alternatívami
- ostatné okolnosti, ktoré mohli ovplyvniť výsledok skúšky

Výsledky merania môžeme vyhodnotiť pomocou Mohr-Coulombovým kritériom porušenia:

- pre výpočet uhla vnútorného trenia:

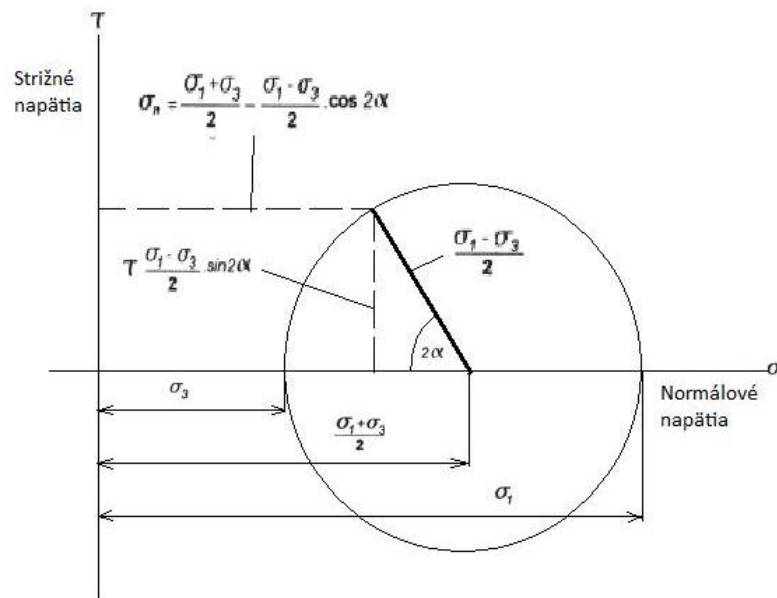
$$\sin \varphi' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \quad (3)$$

- pre výpočet súdržnosti:

$$\sigma_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \Delta\sigma \quad (4)$$

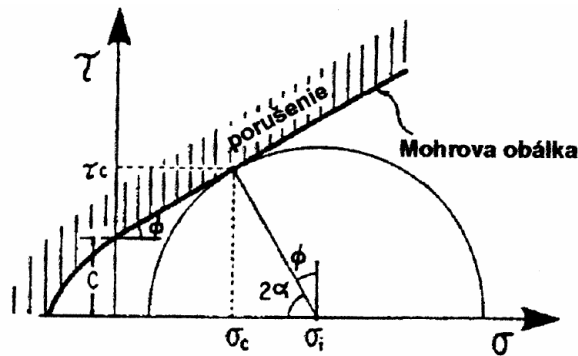
$$\tau_n = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3) \cdot \cos \varphi}{2} \quad (5)$$

Grafické vyhodnotenie skúšky pomocou Mohrovej kružnice:



Obr. 10

Znázornenie dvojdimenzionálneho napät'ového stavu Mohrovou kružnicou (Price, 1981)



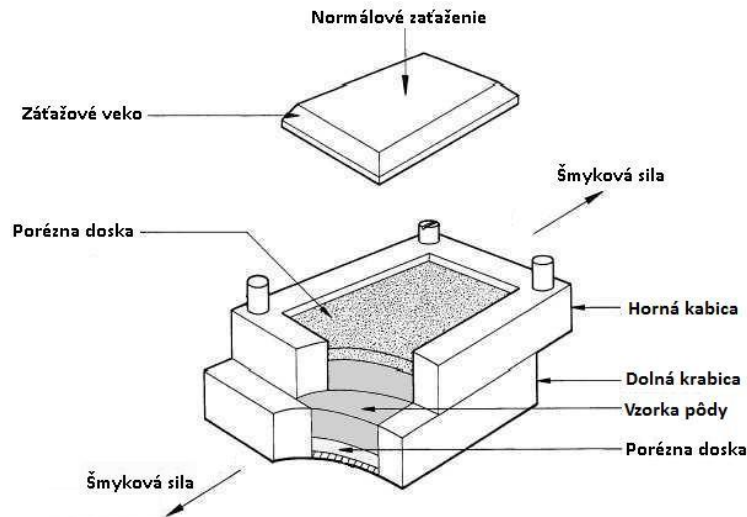
Obr. 11

**Znázornenie napätia pri porušení zemiны Mohrovou kružnicou a obálkou pevnosti
(Chabroňová, 2009)**

1.4.3 Skúška v krabicovom prístroji

Skúška v krabicovom šmykovom prístroji je priamou skúškou pre stanovenie šmykovej pevnosti zemiны vopred danou plochou porušenia. Skúšku stanovuje normy STN 72 1030 Laboratórne metódy stanovenia šmykovej pevnosti zemiны krabicovým prístrojom. Hlavným účelom tohto druhu skúšky je stanovenie efektívnej vrcholovej a reziduálnej šmykovej pevnosti. Parametre šmykovej pevnosti (Zavoral et al., 1987) sa používajú pri stanovení únosnosti plošných základov a pilót, pri návrhu oporných múrov a pažených konštrukcií a pri riešení stability zemných svahov.

Podstatou skúšky v krabicovom šmykovom prístroji je zaťažovanie už odvodnenej vzorky pôdy konštantným normálovým napätím. Po ukončenej konsolidácii skúšobnej vzorky sa na ňu aplikuje plynulo vzrastajúce šmykové zaťaženie pri konštantnej rýchlosti šmykového posunutia až po dosiahnutie jeho stanovenej hodnoty.



Obr. 12

Pôsobenie krabicového šmykového prístroja na vzorku pôdy

Hlavnými parametrami skúšky sú doba konsolidácie skúšobnej vzorky a rýchlosť šmykového posunutia. Tieto rozhodujúce parametre musia byť prispôbené výške vzorky a jej vlastnostiam takým spôsobom, aby tlak vody v póroch pôdy neovplyvňoval prostredníctvom normálového napätia meraný odpor proti ušmyknutiu po dobu celého procesu šmykania.

Hlavnou časťou použitého krabicového prístroja je dvojčelust'ová krabica. To znamená, že prístroj má hornú a spodnú krabicu uloženú do vodiacich drážok, ktorej posuv je vykonávaný prostredníctvom motora cez prevodovku. Rýchlosť posuvu je možné do určitej miery zmeniť v hodnotách pohybujúcich sa v rozmedzí od 0,002 do 10,0 mm za minútu. Na krabicovom prístroji nie je možné zároveň vykonávať meranie a následne odčítavať zvislú deformáciu vzorky. Vyvodzovanie zvislého normálového napätia je zabezpečené pákovým systémom so závažiami. Najväčšia možná dosahovaná hodnota pôsobiaceho normálového napätia je 400 kPa.

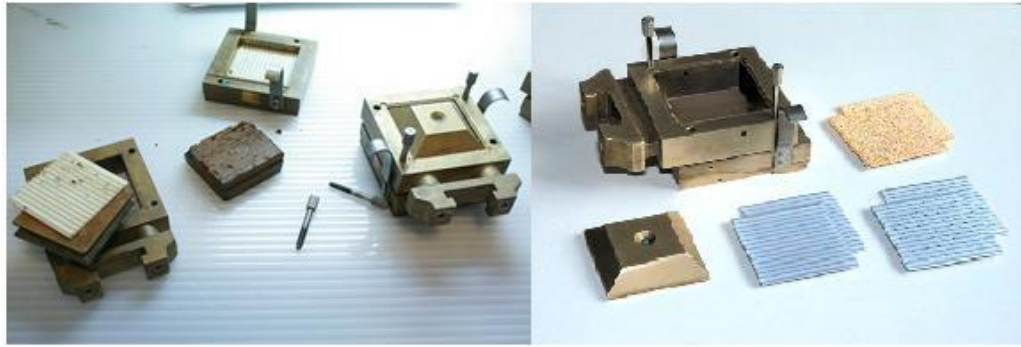


Obr. 13

Krabicový šmykový prístroj na KS

Pri odoberaní vzorky pôdy a po ňom je najdôležitejšie zachovať požadovaný tvar vzorky a jej pôvodné vlastnosti až do priebehu samotnej skúšky v krabicovom šmykovom prístroji. Tieto pôdne vzorky majú kruhový alebo štvorcový prierez, pričom sa za štandardnú považuje vzorka s kruhovým prierezom o priemere 100 mm. Výška vzorky by nemala presahovať 0,25-násobok svojho priečného rozmeru a po konsolidácii nesmie byť menšia ako 0,10-násobok svojho priečného rozmeru. Skúšobné vzorky nesmú obsahovať neprípustne hrubé zrná. Za také považujeme častice o veľkosti 0,1 výšky skúšobnej vzorky a väčšie. Pre vykonanie skúšky sú potrebné najmenej 4 skúšobné vzorky rovnakých fyzikálnych vlastností. Každé vzorke je potrebné určiť jej vlhkosť a počiatočnú objemovú hmotnosť.

Po všetkých potrebných meraniach vlastností vzoriek ich následne každú postupne umiestnime do šmykovej krabice medzi dve filtračné doštičky, ktorých hlavnou úlohou je odvodnenie vzorky, zabezpečenie styku s vodou po jej zaliatí a tiež prenášanie normálneho a šmykového zaťaženia na vzorku.



Obr. 14

Zloženie šmykovej krabice

Výhodou skúšky v krabicovom šmykovom prístroji je možnosť testovania rôznych druhov zemín, aj štrkových, pre ktoré je dôležitý dostatočne veľký rozmer krabice.



Obr. 15

Skúšobné krabice pre rôzne druhy zemín

Hlavné parametre skúšky (doba konsolidácie a rýchlosť šmykového zaťaženia) musia byť prispôsobené výške a vlastnostiam vzorky tak, aby tlak vody v póroch vzorky neovplyvňoval meraný odpor proti ušmyknutiu počas celého priebehu šmýkania, prostredníctvom normálového napätia.

Pri dodržaní všetkých zadaných krokov potom z krabicovej šmykovej skúšky dostávame potrebné parametre vrcholovej šmykovej pevnosti zemín a reziduálnej šmykovej pevnosti zemín.

Skúšobná vzorka je v krabicovom prístroji zaťažovaná normálovým napätím, po ktorom nasleduje proces konsolidácie. Po ukončení tohto procesu sa kolíky spájajúce čeluste krabice vytiahnu a medzi nimi vznikne 0,5 mm medzera. Následne potom

začneme skúšobnú vzorku zaťažovať šmykovou silou, spôsobom zaťažovania konštantnou rýchlosťou šmykového posunutia v .

V priebehu skúšky šmykovým zaťažovaním vzorky, zaznamenávame veľkosť pôsobiacej sily, normálovej deformácie a šmykového posunutia. Pritom postupujeme tak, aby bolo možné vyhodnotiť maximálnu hodnotu vzniknutého šmykového napätia a tomu zodpovedajúce šmykové posunutie. Skúšobná vzorka je zaťažovaná do doby, až kým šmykové posunutie nezačne dosahovať 10 % priečného rozmeru krabice.

Po ukončení skúšky sa skontroluje krabicový šmykový prístroj, prípadné vzájomné natočenie čelustí, zaťažovaná skúšobná vzorka uložená v prístroji a urobí sa predbežné vyhodnotenie vrcholovej pevnosti. Skúška reziduálnej šmykovej pevnosti sa vykonáva pri najmenej troch rôznych hodnotách pôsobiaceho normáloveho napätia.

Všetky zistenia sa potom zapisujú do záznamu o výsledkoch skúšky. V zázname o skúške je nutné uviesť tiež spôsob porušenia skúšobnej vzorky, vzhľad šmykovej plochy, funkčnosť a polohu. Záznam o skúške musí obsahovať tieto údaje, ktoré stanovuje norma STN 72 1030 Laboratórne metódy stanovenia šmykovej pevnosti zemín krabicovým šmykovým prístrojom:

- identifikačné údaje vzorky (lokalita, názov sondy, hĺbka odberu, laboratórne číslo a podobne)
- identifikačné údaje použitého prístroja a meracieho zariadenia (rozmer šmykovej krabice, kalibračnej konštanty meradiel a podobne)
- údaje o skúšobnej vzorke a jej príprave (geotechnický popis zeminy, popis stavu vzorky, konzistencie zeminy, výška vzorky, údaje pre výpočet počiatočnej vlhkosti a podobne)
- súčinitele konsolidácie alebo medzu tekutosti zeminy
- údaje o priebehu konsolidácie (hodnota normáloveho zaťaženia, čas začiatku konsolidácie, údaje zaliati vzorky vodou a hodnota normálovej deformácie)
- údaje o priebehu šmýkania (čas začiatku šmýkania, rýchlosť šmykového posunutia, jednotlivé hodnoty šmykovej sily, normálovej deformácie a šmykového posunutia, poprípade vzájomné natočenie čelustí, u reverzného šmýkania údaje o prerezaní a poradí posunu a podobne)
- údaje získané po vybratí skúšobnej vzorky z krabice

- odchýlky od ustanovenia tejto normy a všetky okolnosti, ktoré mohli ovplyvniť výsledok skúšky

Výsledky skúšky sa používajú pri požadovaných výpočtoch:

- hodnotu normálového efektívneho napätia vypočítame podľa vzťahu:

$$\sigma_{ef} = \frac{N}{A} \quad (6)$$

kde: N - je normálová sila, N

A - je prierezová plocha skúšobnej vzorky, m²

- šmykové napätie v ľubovoľnom okamihu šmykania sa vypočíta podľa vzorca:

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (7)$$

kde: T - je šmyková sila, N

Výsledné hodnoty sú zaznamenané v grafe šmykovej pevnosti. Na vodorovnej osy grafu bude nanášané efektívne τ_{max} normálové napätie a na zvislej osy budú nanášané hodnoty efektívnej vrcholovej pevnosti alebo efektívnej reziduálnej šmykovej pevnosti τ_{min} .

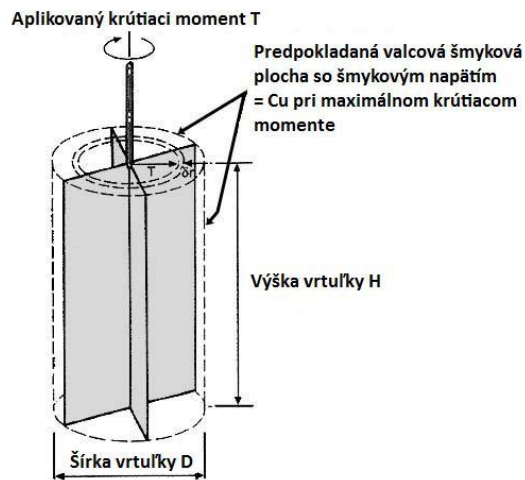
1.4.4 Vrtuľková šmyková skúška

Vrtuľková šmyková skúška patrí tiež k laboratórnym skúškam šmykovej pevnosti pôdy. Skúšobná vzorka jemnozrnnej pôdy je namáhaná otáčaním vrtuľky a zároveň jej zatláčaním do pôdy až do porušenia ušmyknutím, ktoré je vyvodené krútiacim momentom, prípadne do jeho ustálenej hodnoty. Skúškou (STN 72 1026, 1993) sa priamo stanoví vrtuľková šmyková pevnosť zeminy alebo vrtuľková šmyková pevnosť reziduálna v podmienkach neodvodnej skúšky.

Skúška je určená predovšetkým pre súdržné zeminy ako sú íly s konzistenciou tuhou alebo mäkkou, prípadne nasýtenou vodou. Ako každá z uvedených skúšok, tak aj vrtuľková skúška sa nevykonáva na materiály, ktorý bol ovplyvnený neprípustne hrubými zrnami.

K vykonaniu daného typu skúšky je nutný vrtuľkový šmykový prístroj s citlivosťou najmenej 1 % najväčšej meranej hodnoty a pravidelne, to znamená každý

pol rok musí byť prekalibrovaný. Vrtuľkový prístroj je zložený z torznej hlavy a skúšobnej vrtuľky, ktorá sa do nej upína. Skúšobná vrtuľka pozostáva z dvoch častí, a to z nosného hriadeľa a krídel vrtuľky.



Obr. 16

Rozmery skúšobnej vrtuľky

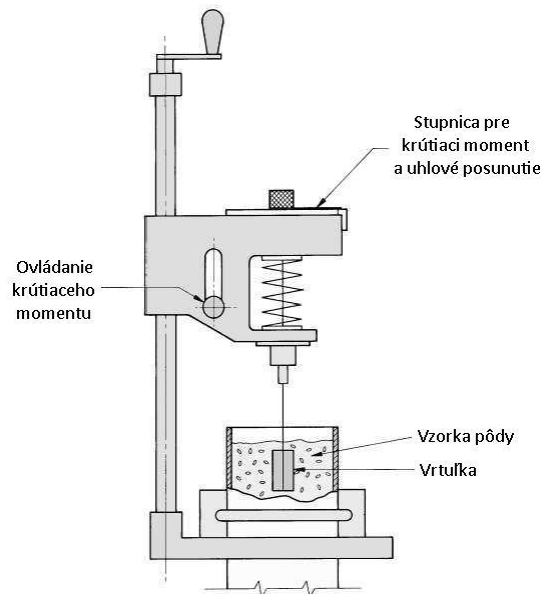
Príprava skúšobnej vzorky prebieha tak, aby sa zabránilo zmene jej prirodzených vlastností. Minimálny rozmer plochy skúšobnej vzorky pôdy, do ktorej sa vrtuľka zatláča je najmenej 3x väčší ako je daný priemer vrtuľky. Skúšku je nutné vykonávať najmenej trikrát, pre lepšie vyhodnotenie výsledkov.

Skúška má vopred zadaný postup, do voľby ktorého sa spravidla zahrňuje rozhodnutie o type skúšky (povrchová alebo podpovrchová), skúšobnej vzorky a o rýchlosti otáčania vrtuľky. Všetky odlišnosti od štandardného postupu sa uvádzajú do záznamu o skúške a do výsledkov o skúške. Skúška sa vykonáva na neporušenej vodorovnej ploche. Skúšobná vzorka sa do prístroja upevní tak, aby vplyvom otáčania vrtuľky nedošlo k jej samotnému pohybu zo základnej polohy.

Pri vykonávaní povrchovej skúšky sa vrtuľka do skúšobnej vzorky zatlačí do takej hĺbky, aby horná hrana krídel vrtuľky a povrch skúšobnej vzorky boli v jednej úrovni. V prípade podpovrchovej skúšky sa vrtuľka do skúšobnej vzorky zatlačí hornou hranou krídel vrtuľky minimálne do potrebnej hĺbky h pod povrch skúšobnej vzorky.

Pri skúške sa zaznamenáva hodnota maximálneho dosiahnutého krútiaceho momentu M_k , pri ktorom sa zemina pri pootáčaní vrtuľky ušmykne. K dosiahnutiu ustálenej hodnoty krútiaceho momentu M_r sa vykonáva ďalšie rovnomerné otáčanie

vrtuľky, čo znamená 5 až 10 otáčok v priebehu jednej minúty. Skúšku je potrebné vykonávať na tej istej vzorke aspoň trikrát, čo znamená tri merania na troch rozličných miestach skúšobných plôch.



Obr. 17

Schéma vrtuľkového prístroja

Skúška sa považuje za ukončenú, pri dosiahnutí konštantnej hodnoty krútiaceho momentu. Následne po jej ukončení vykonáme pomalé vytiahnutie vrtuľky z použitej skúšobnej vzorky, bez najmenšieho porušenia okolitej zeminy. Každú zmenu stavu pred skúškou, počas nej alebo už po skúške je nevyhnutné zapísať po dokončení skúšky do záznamu o skúške a do výsledkov.

Záznam o skúške je dôležitým podkladom pre následné vyhodnotenie skúšky a preto musí obsahovať tieto hlavné údaje, ktoré presne popisuje norma STN 72 1026 Laboratórne stanovenie šmykovej pevnosti zemín vrtuľkovou skúškou:

- identifikačné údaje o vzorke
- identifikačné údaje skúšobného prístroja a meracieho zariadenia (typy meradiel a ich kalibračné konštanty)
- údaje o príprave skúšobnej vzorky, hlavne popis zeminy, stav vzorky, výskyt hrubých zrn, spôsob prípravy, počiatočné rozmery vzorky
- údaje získané v priebehu skúšky (krútiaci moment, pootáčanie vrtuľky a podobne)

- okrajové podmienky skúšky (rozmery vrtuľky, rýchlosť otáčania vrtuľky, hĺbka zatlačenia vrtuľky, druh vzorky, obal a podobne)
- ostatné okolnosti, ktoré mohli ovplyvniť výsledok skúšky
- objemovú hmotnosť a vlhkosť skúšanej zeminy
- odchýlky od normového postupu a upresnenia tam, kde je možnosť alternatívnych postupov

Výsledkom merania vo vrtuľkovom prístroji je tabuľka s nameranými hodnotami uhla pootočenia vrtuľky α a príslušnej hodnoty vrtuľkovej šmykovej pevnosti v kPa.

Po vykonaní skúšky vrtuľkovým šmykovým prístrojom nasledujú výpočty šmykovej pevnosti ako aj iných hodnôt (STN 72 1026, 1993):

- výpočet vrtuľkovej šmykovej pevnosti τ_k je daný vzťahom:

$$\tau_k = \frac{M_k}{k} \quad (8)$$

kde: M_k - krútiaci moment, Nm

k - rozmerová konštanta vrtuľky, m^3

- vzťah pre výpočet vrtuľkovej šmykovej pevnosti reziduálnej:

$$\tau_r = \frac{M_r}{k} \quad (9)$$

kde: M_r - krútiaci moment, Nm

k - rozmerová konštanta vrtuľky, m^3

Krútiaci moment (Zavoral et al., 1987) bol odvodený za predpokladu rovnomerného rozloženia napätí po celej výške vrtuľky a porušenia zeminy na valcovej ploche a priemere zhodnom s priemerom vrtuľky:

$$M_k = \frac{4 \cdot \pi \cdot c \cdot R^3}{3} + 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot c \cdot h \quad (10)$$

A po dosadení $D = 2 \cdot r$ krútiaci moment vypočítame:

$$M_k = \pi \cdot \left(\frac{D^3}{6} + \frac{h \cdot D^2}{2} \right) \cdot c \quad (11)$$

Konštanta vrtuľky k sa v prípade pod povrchovej skúšky pri $\tau = c$ vypočíta nasledovne:

$$k = \frac{3\pi \cdot h \cdot D^2 + \pi \cdot D^3}{6} \quad (12)$$

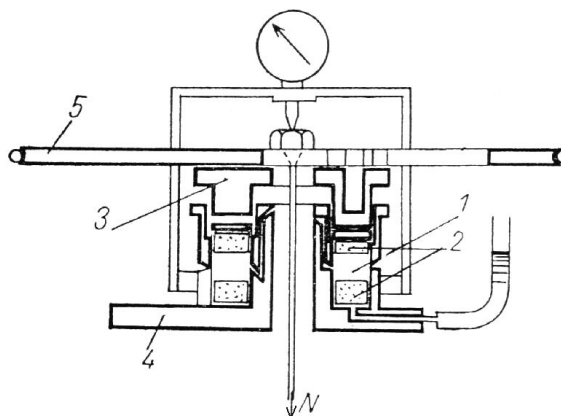
V prípade povrchovej skúšky, t.j. zahĺbenie vrtuľky iba po jej vrchný okraj platí vzťah:

$$k = \frac{6\pi \cdot h \cdot D^2 + \pi \cdot D^3}{12} \quad (13)$$

Ako výsledok vrtuľkovej šmykovej skúšky sa udáva aritmetický priemer vypočítaný najmenej z troch nameraných hodnôt. Výsledok skúšky tiež tvoria hodnoty vrtuľkových šmykových napätí a rovnako aj ďalšie identifikačné údaje o použitých skúšobných vzorkách.

1.4.5 Torzný prístroj

Torzne prístroje sú ďalšími prístrojmi používanými na zisťovanie šmykovej pevnosti pôdy. Majú valcovitý tvar, kde sa nad a pod vzorkou nachádza ryhovaná kovová alebo porézna doska. Skúšobná vzorka pôdy sa zaťaží a pri otáčaní hornej časti prístroja, kde sa nachádza koleso s lanom, sa vo vzorke vytvorí klzná plocha. Otáčaním vzorky sa na tejto klznej ploche vzorka ušmykne. Následne je možné vypočítať šmyková pevnosť τ z pôsobiaceho krútiaceho momentu na kolese a z odporu vzorky na kruhovej klznej ploche. Nevýhodou u tohto typu prístroja je nerovnomernosť veľkosti vykonávanej dráhy pri otáčaní hornej polovice skúšobnej vzorky. Ušmyknutie zeminy závisí od nadobudnutia určitej hodnoty tejto dráhy, ktorá je závislá na druhu použitej vzorky zeminy a jej hustoty. Po prekročení hodnoty šmykovej pevnosti τ_f , jej hodnota obvykle poklesne na hodnotu zbytkovú τ_d . Túto tiež nazývame aj hodnotou v pohybe alebo hodnotou dynamickou. Potom šmykovú pevnosť pôdy τ_f nazveme statickou hodnotou alebo tiež hodnotou v klúde. Hodnota v klúde je odvodená z fyziky, kde je pri procese šmykania potrebná väčšia sila pri uvedení telesa z klúdu do pohybu, než je sila potrebná na to aby teleso v klúde zostalo.



Obr. 18

Torzny prístroj na stanovenie šmykovej pevnosti zemín (Bajla, 2004)

1-vzorka zeminy, 2-porézne dosky, 3-horná pohyblivá časť, 4-spodná pevná časť, 5-otáčací kruh s lanom

Pri tomto type šmykového prístroja môže pri krútení nastať ušmyknutie zeminy bližšie k obvodu skúšobnej vzorky a hodnota šmykovej pevnosti τ_f následne poklesne na dynamickú hodnotu (zbytkovú, pohybovú alebo ustálenú). V určitej vzdialenosti od vonkajšieho okraja skúšobnej vzorky, v okamihu dosiahnutia statickej hodnoty šmykovej pevnosti τ_f , pričom v blízkosti stredu vzorky sa zeminy ešte neušmykla, sa pri vzniknutom šmykovom napätí len posunula. Pre odstránenie tohto nežiaduceho stavu sa skúšobné vzorky pripravujú v tvare medzikružia. Prístroj má dve časti, kde je spodná časť prístroja pevná a horná pohyblivá. Horná časť prístroja sa otáča a k nej pripravený kruh vyvíja krútiaci moment, potrebný na ušmyknutie zeminy. Výhodou je, že pri otáčaní sa veľkosť zaťaženia nemení, čiže zostáva konštantná. Torzný prístroj sa preto používa na rýchle orientačné stanovenie šmykovej pevnosti pôdy. Výsledné hodnoty sa zobrazujú rovnako ako u krabicového prístroja.

1.5 Prehľad používaných laboratórnych prístrojov v odbornej praxi

Triaxiálny testovací prístroj

Tento triaxiálny testovací systém je automatické tlakové zariadenia na testovanie tlaku. Používa sa v kombinácii so zariadením na testovanie tlaku. Tento systém používa jednotky HOEK, ktoré sú doplnené o uchytačacie nástroje potrebné k testovaniu.



Obr. 19

Triaxiálny testovací prístroj

Automatický digitálny priamy / reziduálny šmykový stroj s programovateľným pneumatickým zvislým zaťažením systému

Plne automatické riadenie celého testu. Automatické pneumatické použitie zvislého zaťaženia. Kompaktný dizajn, ľahko presný a montovateľný na štandardný laboratórny stôl. Zvislá sila je pozitívne aplikovateľná na šmykové krabice bez trenia. Možnosť nastavenia rôznych rýchlostí a posuvu (dopredu a dozadu) pri reziduálnej šmykovej skúške. Jednoduché a okamžité nastavenie požadovaných parametrov testu prostredníctvom veľkého digitálneho grafického displeja. Priame spojenie medzi šmykovou krabicou, pohonnou jednotkou a dynamometra pre axiálny prenos horizontálnou silou pozdĺž šmykovej roviny. Normálové zaťaženie pôsobiace na skúšobnú vzorku je tiež zachované aj po ukončení skúšky, až po ukončenie programátorom.



Obr. 20

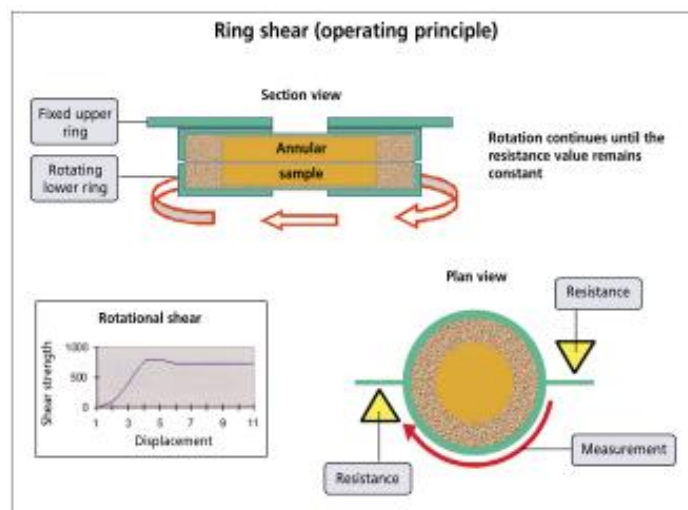
Krabicový šmykový prístroj (Shearmatic27-WF2180)

Digitálny prstencový šmykový prístroj (Torshear 27-WF2202)

Tento prístroj obsahuje:

- mikroprocesorom riadený pohon systému
- rýchlosť vykonávanej skúšky je nastaviteľný pomocou klávesnice
- rýchly prístup bez obmedzenia otáčok
- plynulá regulácia otáčok 0,001 až 99,9 °/min
- sériový port RS 232 pre vzdialené ovládanie PC
- LCD displej - 4 riadky a 20 znakov

Tento prstencový šmykový prístroj, pri skúške reziduálnej šmykovej pevnosti preformuluje prstencové pôdne vzorky. Hlavná výhoda tejto metódy v porovnaní s priamou šmykovou skúškou spočíva v nepretržitom šmýkaní s konštantnou hodnotou počas celej skúšky. Táto metóda nám umožňuje opakovane vykonať skúšku v laboratóriu podľa poľných podmienok, s veľmi presnými reziduálnymi hodnotami šmykového napätia.



Obr. 21

Princíp fungovania prstencového prístroja



Obrázok 22

Digitálny prstencový šmykový prístroj

Vrtuľkový šmykový prístroj (ručné ovládanie VSA-01)

Skladá sa z krútiacej hlavy výškovo nastaviteľnej, pomocou vodiacej skrutky možno točiť hnacie koleso pre zahĺbenie vrtuľky do vzorky. Priemer vrtuľky, priemer tyče, veľkosť lopatky výška lopatky sa určuje podľa IS špecifikácii. Hriadeľ vrtuľky je pripojený k hornej časti s ukazovateľom, ktorý udáva uhol krútiaceho momentu. Následne po spracovaní určí krútiaci moment.



Obr. 23

Ručný vrtuľkový prístroj

Prostý šmykový prístroj

Dynamický a statický prostý šmykový prístroj schopný aplikovať cyklické zaťaženie až 50 Hz. Digitálne servo riadenie šmykového a normálového zaťaženia alebo posunutia. Softvér pre automatické vykonávanie jednoduchej šmykovej skúšky s novodobým grafickým displejom. Prístroj má pevnú hornú a dolnú posuvnú základňu namontovanú na špeciálne lineárne ložiská. Systém má tiež pevnú vnútornú podporu, aby sa minimalizoval postranný súlad s horným vekom. Jednou z výhod prístroja je, že nevyžaduje zosilnenie membrány. Tento prístroj môže byť použitý pri testovaní prostým šmykom alebo trojosovo s výškou do 2,5 násobku priemeru vzorky.



Obr. 24

Prostý šmykový systém

2 Cieľ práce

Šmyková pevnosť pôdy ovplyvňuje návrh všetkých základov, oporných konštrukcií, výkopov, násypov a svahov. Jej hodnota je určovaná buď priamo v teréne alebo v laboratóriách na skúšobných vzorkách odobratých z pôdy. Aj napriek tomu, že sú skúšky vykonávané v teréne presnejšie, však ich najväčšou nevýhodou býva finančná a realizačná náročnosť. Z tohto dôvodu sa častejšie používajú práve laboratórne skúšky. Preto cieľom danej problematiky diplomovej práce je porovnanie meraní šmykových prístrojov v laboratórnych podmienkach s nasledovným postupom:

- porovnať fyzikálne a mechanické údaje medzi použitými laboratórnymi šmykovými prístrojmi,
- uskutočniť porovnávacie merania na vybraných šmykových prístrojoch priamo v laboratórnych podmienkach,
- vyhodnotiť namerané výsledky a následne ich porovnať,
- na základe výsledkov nameraných hodnôt posúdiť vhodnosť vrtuľkového a modifikovaného prístroja pre meranie šmyku.

3 Metodika práce

Pre zabezpečenie splnenia stanoveného cieľa diplomovej práce sme postupovali podľa nasledovných krokov:

- štúdium literatúry, potrebnej k spracovaniu danej témy,
- charakteristika použitého materiálu,
- charakteristika požitých laboratórných šmykových prístrojov,
- popis experimentálneho merania šmykovej pevnosti pôdných vzoriek,
- popis experimentov a podmienok merania,
- záznam a spracovanie výsledných hodnôt,
- vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov meraní,
- diskusia,
- záver,
- návrh na využitie výsledkov v praxi.

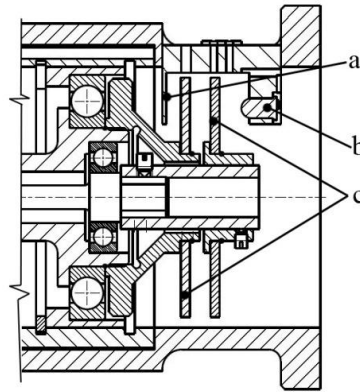
3.1 Charakteristika použitého materiálu

Pre účel vykonania skúšok v laboratórných podmienkach boli použité vzorky pôdy odobraté z okolia SPU, presnejšie z botanickej záhrady SPU. Materiálom použitým pri vykonávaní laboratórných meraní bol íl. Tieto odobraté vzorky boli dostatočne zabezpečené proti vysychaniu v priebehu laboratórných prác a to ich uložením do špeciálnych obalov. Vlhkosť odobratých pôdných vzoriek s hodnotou 23,2 % bola stanovená pomocou normy STN 72 1012. Ich objemová hmotnosť bola 1240 kg.m^3 podľa normy STN 72 1010 a zrnitostné zloženie podľa štandardnej metodiky na Katedre pedológie.

3.2 Charakteristika požitých laboratórných šmykových prístrojov

Prvým prístrojom použitým na určenie šmykovej pevnosti pôdy bol modifikovaný prístroj. Táto metóda pomocou medzikružia so závažím, umožňuje vyvodenie normálového zaťaženia. Modifikovaný prístroj zaznamenáva krútiaci moment, pri

ušmyknutí medzikružia. Priamo je tak možné určiť vrcholovú a reziduálnu šmykovú pevnosť pôdy. Spoločné meranie krútiaceho momentu a uhla pootočenia medzikružia, bolo riešené originálnym spôsobom pomocou optoelektrického princípu merania. Tento spôsob je zobrazený na obrázku 26.



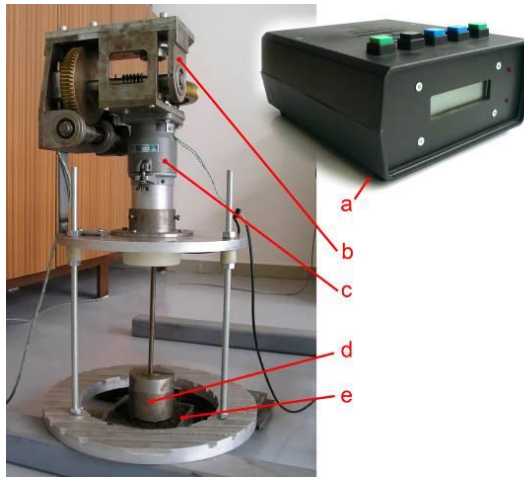
Obr. 25

Spôsob merania krútiaceho momentu na deformačnej (Vargic, 2007)

a – fotodióda, b – LED dióda, c – polarizačné filtre

Pomocou vyobrazenej LED diódy a fotodiódy bol nameraný uhol pootočenia medzikružia. Meranie prebiehalo pomocou fóliového krúžku nachádzajúcom sa medzi pozitívnymi diódami, ktorý bol pripevnený na kotúč súhlasne otáčajúci sa spolu s medzikružím.

Samotný merací prístroj pozostáva z torznej hlavy a skúšobného medzikružia, ktorá sa skladá z nosnej tyče a medzikružia s krídelkami. Kvalitnejší záber v skúšobnej vzorke pôdy pri meraní modifikovaným prístrojom umožňuje výška krídeliek (výstupkov), ktorá dosahuje spravidla 2-3 mm. Priemer medzikružia s hodnotou 68 mm bol daný s ohľadom na rozsah snímača krútiaceho momentu a šírka medzikružia bola 9 mm. Pri meraní sa plynulo otáča uhlovou rýchlosťou 3 až 10 stupňov za minútu a tiež obvodovou rýchlosťou 2 mm za minútu.



Obr. 26

Modifikovaný šmykový prístroj (Vargic, 2007)

a– záznamník, b– prevodovka pohonu, c– meracia časť, d– normálová záťaž, e– vzorka pôdy

Druhým použitým prístrojom bol vrtuľkový prístroj. Skúška tohto druhu je vhodná pre mäkké až tuhé jemnozrnné pôdy. Vrtuľkový prístroj sa skladá z torznej hlavy a skúšobnej vrtuľky v nej upnutej. Tento prístroj umožňuje vyvodenie krútiaceho momentu, pôsobiaceho na pôdu prostredníctvom skúšobnej vrtuľky. Jej výška je obvykle 2 krát väčšia ako jej šírka a priemer by nemal byť menší ako 12 mm. Pre zaistenie neporušenia vzoriek, je nutná čo najmenšia hrúbka krídel vrtuľky. Konštrukcia prístroja umožňuje upevnenie skúšobných vzoriek tak, aby pri otáčaní vrtuľkou nedochádzalo k súčasnému otáčaniu vzoriek.

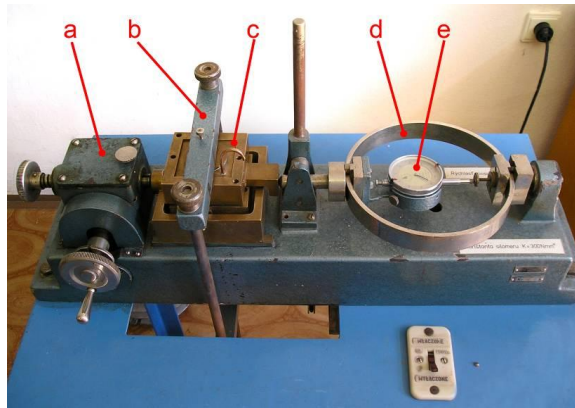


Obr. 27

Virtuálny model a skutočné prevedenie vrtuľkového šmykového prístroja (Vargic, 2007)

a – hnacia časť, b – meracia časť, c – oporná časť

Posledným použitým prístrojom na meranie šmykovej pevnosti pôdy bol krabicový šmykový prístroj. Tento prístroj slúžil ako tzv. etalón, čiže prístroj použitý na porovnanie výsledkov meraní na základe jeho presnosti. Jeho hlavnou časťou je dvojčelust'ová krabica. Spodná časť prístroja uložená vo vodiacich drážkach je posúvaná pomocou motora cez prevodovku, ktorej rýchlosť sa pohybuje v rozmedzí od 0,002 až do 10,0 mm za min. Vzorka pôdy používaná v krabicovom šmykovom prístroji má štvorcový tvar s rozmermi 60 x 60 mm. Pripravená vzorka je uložená medzi priepustné doštičky. Závažie slúži na pôsobenie normálovej sily, ktoré symetricky zaťažuje vzorku pôdy cez hornú časť.



Obr. 28

Krabicový šmykový prístroj (Vargic, 2007)

a – pohon, b – normálové zaťaženie, c – krabica so vzorkou, d – deformačný prstenec, e – odčítakomer

3.3 Popis experimentálneho merania šmykovej pevnosti pôdnych vzoriek

Základnými podmienkami merania modifikovaným prístrojom je určenie druhu vzorky a rýchlosť otáčania. Skúška bola vykonávaná na vodorovnej neporušenej podložke. Vzorka je upravená tak, aby nedošlo k nežiadúcemu pootáčaniu samotnej skúšobnej vzorky. Vyvodenie požadovaného normálového zaťaženia zabezpečuje u tohto typu prístroja medzikružie s príslušným závažím. Pri meraní zaznamenávame rovnaké výsledné fyzikálne parametre ako pri translačnej skúške. Rozdielom výsledkov je posunutie o uhol $\Delta\alpha$ a nie o dĺžku Δl a tiež náhradou translačného pohybu rotačným. Skúška bola vykonávaná aspoň trikrát na troch rozličných miestach skúšobných vzoriek.

Pri meraní vrtuľkovým prístrojom je nutné v prvom rade určiť o aký druh skúšky pôjde - povrchová skúška a podpovrchová skúška. U povrchovej skúšky sa vrtuľka zatláča do skúšobnej vzorky pôdy do hĺbky rovnej výške krídel vrtuľky. Podpovrchová skúška má skúšobnú vrtuľku zatlačenú do skúšobnej vzorky v hĺbke minimálne h pod povrchom. Skúška zaznamenáva krútiaci moment, pri ktorom sa vzorka pôdy ušmykne. Vrtuľkou sa otáča do doby dosiahnutia konštantného krútiaceho momentu. Výsledkom skúšky je aritmetický priemer nameraných hodnôt.

Posledné meranie, meranie v krabicovom šmykovom prístroji je založené na zaťažovaní skúšobnej vzorky pôdy konštantným normálovým napätím. Vzorka pôdy je vložená do šmykovej krabice medzi porézne doštičky. Skúška sa vykonáva pre 3 až 4 rôzne konsolidačné napätia. Po ukončení konsolidácie, vzorku zaťažujeme šmykovým napätím. Zaťažovanie sa vykonáva pri konštantnej rýchlosti šmykového posunutia až kým sa dosiahne jeho stanovená hodnota. Každá skúška sa prevádza až do ušmyknutia vloženej vzorky.

3.4 Popis experimentov a podmienok merania

Šmyková pevnosť pôdy odobratej v okolí SPU bola určovaná v laboratórnych podmienkach v priestoroch SPU. Vzorky ílovitej pôdy boli skúšané v modifikovanom prístroji, vo vrtuľkovom prístroji a v krabicovom šmykovom prístroji. Prístroje všeobecne zaznamenávali odpor pôdy proti vonkajšiemu zaťaženiu. Výsledky merania popisuje Coulombova teória porušenia pôdy, ktorá definuje šmykovú pevnosť pôdy podľa nasledovného vzťahu:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (2)$$

Merania v uvedených prístrojoch prebiehali podľa platných noriem STN 72 1026 Laboratórne stanovenie šmykovej pevnosti zemín vrtuľkovou skúškou a STN 72 1030 Laboratórne metódy stanovenia šmykovej pevnosti zemín krabicovým prístrojom. Rovnako prebiehalo aj zistenia a následne zaistenie pôvodných vlastností odobratých vzoriek pôdy. Po zabezpečení týchto podmienok boli vykonané merania v uvedených šmykových prístrojoch. Všeobecne sme určili normálové zaťaženie z použitej záťaže podľa daného vzťahu:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (14)$$

kde: N – normálová sila, N

A – strižná plocha, m²

Pri vykonávaní skúšky boli použité záťaže s hmotnosťou 18 kg, 36 kg a 54 kg. Tieto hodnoty odpovedali hodnotám normálového napätia 50, 100 a 150 kPa.

Po určení hodnoty šmykovej sily, následne vypočítame hodnotu šmykového napätia zo vzťahu:

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (7)$$

kde: T – šmyková sila, N

A – strižná plocha, m²

Hodnoty normálového zaťaženia v modifikovanom prístroji sme zvolili podľa ílovitej pôdy. Pomocou takto zvolených hodnôt bol nastavený meračí rozsah prístroja.

Na základe toho sme následne určili šmykové napätie zo vzťahu:

$$\tau = \frac{M}{R_s \cdot S} \quad (15)$$

kde: M - krútiaci moment, m

R_s - stredný polomer medzikružia, m

S - plocha medzikružia, resp. strižná plocha, m²

Pre výpočet normálového napätia boli použité nasledujúce údaje: hmotnosti závaží 1,5 kg, 3 kg a 4,5 kg, pri ploche medzikružia 2124 mm².

Pri vrtuľkovej skúške po meraní nasledoval výpočet šmykovej pevnosti daný vzťahom:

$$\tau_k = \frac{M_k}{k} \quad (8)$$

kde: M_k - krútiaci moment, Nm

k – rozmerová konštanta vrtuľky, m

a tiež reziduálnej šmykovej pevnosti podľa vzťahu:

$$\tau_r = \frac{M_r}{k} \quad (9)$$

kde: M_r - krútiaci moment, Nm

k - rozmerová konštanta vrtuľky, m³

Krabicová šmyková skúška bola meraná s tromi hodnotami normálového zaťaženia, tiež podľa pokynov a postupov normy. Skúšobná vzorka mala štvorcový prierez o rozmeroch 60×60 mm, teda plocha vzorky bola 3600 mm². Pri meraní na osadenú vzorku pôsobilo normálové napätie.

3.5 Záznam a spracovanie výsledných hodnôt

Pri vyhodnotení všetkých vykonaných typov skúšok bol použitý program Microsoft Excel, v ktorom boli vytvárané všetky výsledné tabuľky. Výsledky skúšok boli nanášané do pracovných diagramov priebehu šmykového napätia. Hodnoty zisťovaných parametrov šmykovej pevnosti pôdy, ktorými sú vnútorný uhol trenia φ a súdržnosť c sa určia modelovaním závislosti medzi normálovým napätím σ a šmykovým napätím τ metódami regresnej analýzy.

4 Výsledky práce

Meranie šmykovej pevnosti pôdy bolo vykonané na vzorke ílovitej pôdy odobratej z okolia SPU, presnejšie z botanickej záhrady SPU. Taktiež bol vykonaný aj odber prostredníctvom Kopeckého valčekmi. Namerané vlastnosti odobratej vzorky pôdy sú uvedené v tabuľke 2, jej zrnitostné zloženie v tabuľke 3 a grafom na obrázku 30.

Tab. 2

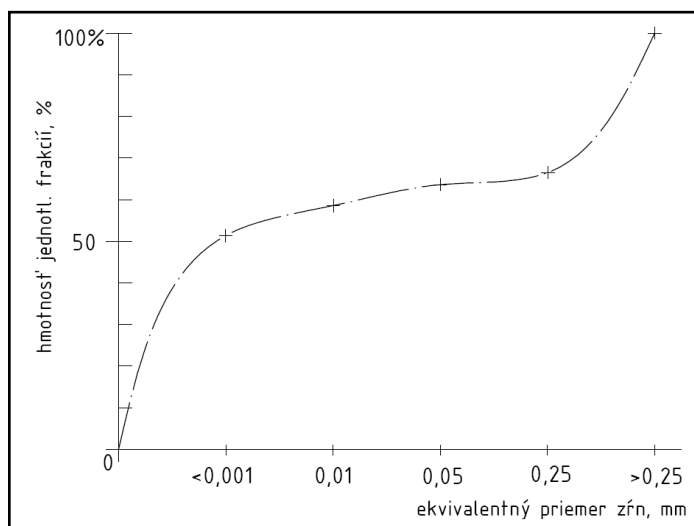
Vlastnosti odobratej vzorky pôdy

Merané parametre	Výsledné hodnoty
Objemová hmotnosť	1240 kg.m ³
Vlhkosť pôdy	23,2 %
Merná hmotnosť	1680,1 kg.m ³

Tab. 3

Zrnitostné zloženie ílovitej pôdy

Pôda	Percentuálne zastúpenie jednotlivých frakcií					
	>0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,001	<0,0001	<0,01
Íl	33,52	2,90	5,04	7,20	51,34	58,54



Obr. 29

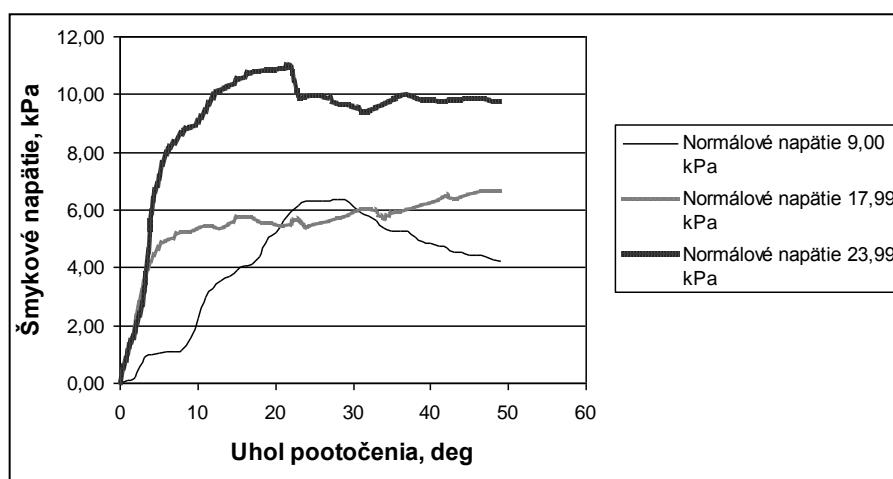
Krivka zrnitosti ílovitej pôdy

Všetky skúšobné vzorky pôdy boli podrobené meraniam najskôr vrtuľkovým šmykovým prístrojom s modifikovaným medzikružím. Potom nasledovala skúška vo vrtuľkovom prístroji, ktorá sa vykonávala podľa normy STN 72 1026 Laboratórne stanovenie šmykových vlastností pôdy vrtuľkovou skúškou a nakoniec meranie prebiehalo v štandardnom krabicovom prístroji.

4.1 Meranie v prstencovom šmykovom prístroji

Meranie modifikovanou metódou je meranie pomocou medzikružia so závažím. Závažie v prístroji zabezpečuje vyvodenie normálového zaťaženia.

Výsledkom merania sú zhodné výsledné fyzikálne hodnoty podobne ako pri translačnej skúške. Rozdiel skúšok tvorí posunutie o uhol $\Delta\alpha$ a nie o dĺžku Δl . Translačný pohyb tak nahradil rotačný pohyb.



Obr. 30

Priebeh merania v modifikovanom prístroji

V nasledujúcej tabuľke 4 sú spracované výsledky merania z prstencového šmykového prístroja. Tieto výsledné hodnoty boli získané zo záznamového zariadenia samotného meracieho prístroja.

Tab. 4

Výpis údajov meraných v modifikovanom prístroji

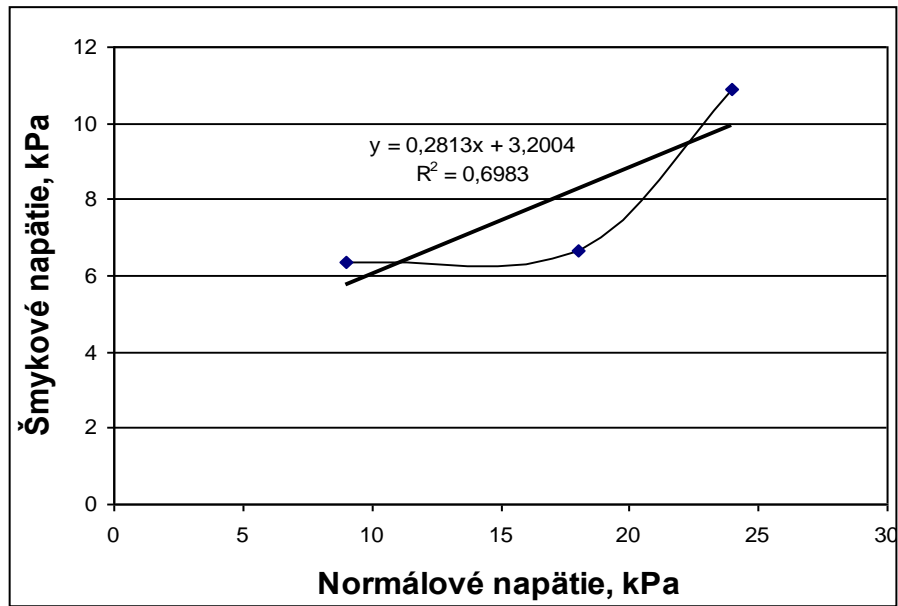
Uhol, deg	Normálové napätie, kPa											
	9				17,99				23,99			
	Šmykové napätie, kPa				Šmykové napätie, kPa				Šmykové napätie, kPa			
	Číslo merania			a.p.	Číslo merania			a.p.	Číslo merania			a.p.
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,16	0,08	0,08	0,11	0,16	1,55	0,08	0,81	0,16	2,83	0,16	1,05
2	0,22	0,16	0,22	0,20	2,34	3,66	0,16	1,91	0,16	4,94	0,22	1,78
3	0,16	0,41	2,03	0,87	4,94	4,31	2,68	3,50	3,40	6,00	0,22	3,21
4	0,16	0,41	2,34	0,97	6,65	4,62	3,74	4,18	7,56	6,51	3,66	5,91
5	0,22	0,41	2,50	1,04	7,32	4,94	4,31	4,63	9,82	6,89	4,55	7,09
6	0,22	0,41	2,68	1,10	8,03	5,20	4,55	4,88	11,53	7,24	5,02	7,93
7	0,16	0,41	2,76	1,11	8,46	5,37	4,70	5,03	12,20	7,40	5,29	8,29
8	0,22	0,47	2,76	1,15	8,95	5,53	4,86	5,19	12,85	7,56	5,37	8,59
9	0,16	1,79	2,76	1,57	9,33	5,53	4,94	5,24	13,17	7,95	5,45	8,86
10	1,44	2,34	2,91	2,23	9,41	5,53	5,12	5,33	13,24	8,38	5,45	9,02
	Maximum = 6,37				Maximum = 6,65				Maximum = 10,91			

Pri meraní dostávame hodnoty veľkosti krútiaceho momentu a uhla potočenia, ktoré boli zaznamenávané v tabuľkovej podobe do programu Microsoft Excel. Hodnota maximálneho šmykového napätia bola určovaná pri každom variante šmykového zaťaženia. Každé meranie bolo vykonávané trikrát, kde výsledné hodnoty potom boli získané pri výpočte ich aritmetického priemeru. Z výsledkov tabuľky bol následne vytvorený graf.

Tab. 5

Výsledky skúšky s modifikovaným medzikružím

Normálové napätie, kPa	Maximálne šmykové napätie, kPa	Uhol vnútorného trenia, deg	Kohézia, kPa
8,99	6,37	15,71	3,2
17,99	6,66		
23,99	10,91		



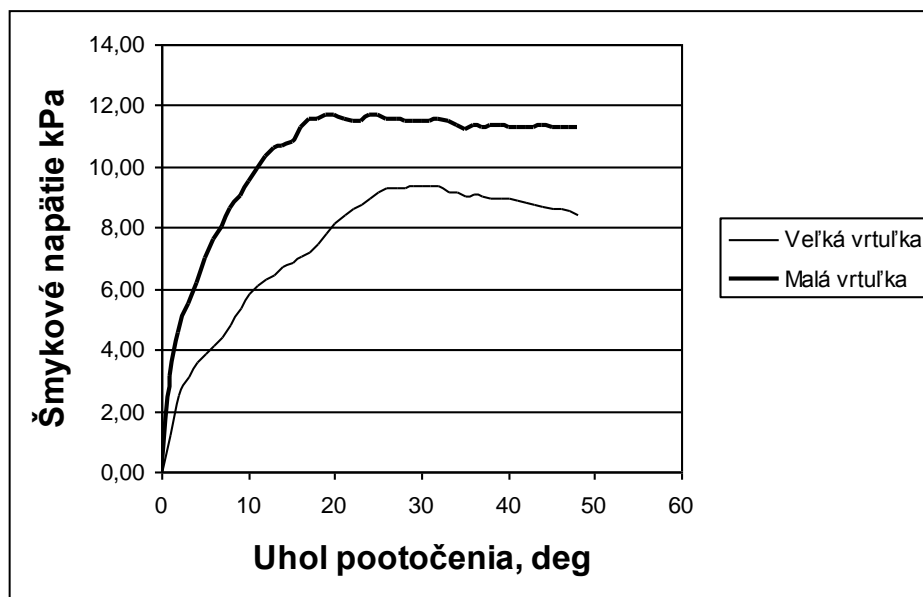
Obr. 31

Coulombova priamka so skúšky modifikovanou metódou

Z daných výsledkov vyplýva, že skúška modifikovanou metódou má lineárny charakter.

4.2 Meranie na vrtuľkovom prístroji

Po prstencovej skúške šmykovej pevnosti pôdy nasleduje skúška na vrtuľkovom prístroji. Bola vykonávaná jednoduchá vrtuľková skúška s použitím dvoch typov skúšobných vrtuliek, ktorých nameraný priebeh je znázornený na obrázku 33.



Obr. 32

Priebeh merania vo vrtuľkovom prístroji

Rozdiel maximálnej hodnoty šmykového napätia medzi malou a veľkou vrtuľkou bol v prepočte len o 2,5 kPa. Táto hodnota udáva, že malá vrtuľka mala túto hodnotu maximálneho šmykového napätia väčšiu ako veľká vrtuľka. Tieto odlišnosti v nameraných výsledkoch mala za následok nehomogenita pôdy. Pôda je veľmi rôznorodé prostredie, ktoré túto nehomogenitu spôsobuje. Pri pôde nasýtenej vodou, slúži vrtuľková skúška ako rýchla informatívna skúška. V takom prípade by sa malo maximálne šmykové napätie v pôde rovnať kohézii pôdy, teda súdržnosti a uhol vnútorného trenia tak nie je možné stanoviť. Namerané hodnoty z vrtuľkovej skúšky sú zaznamenané v nasledovnej tabuľke.

Tabuľka 6

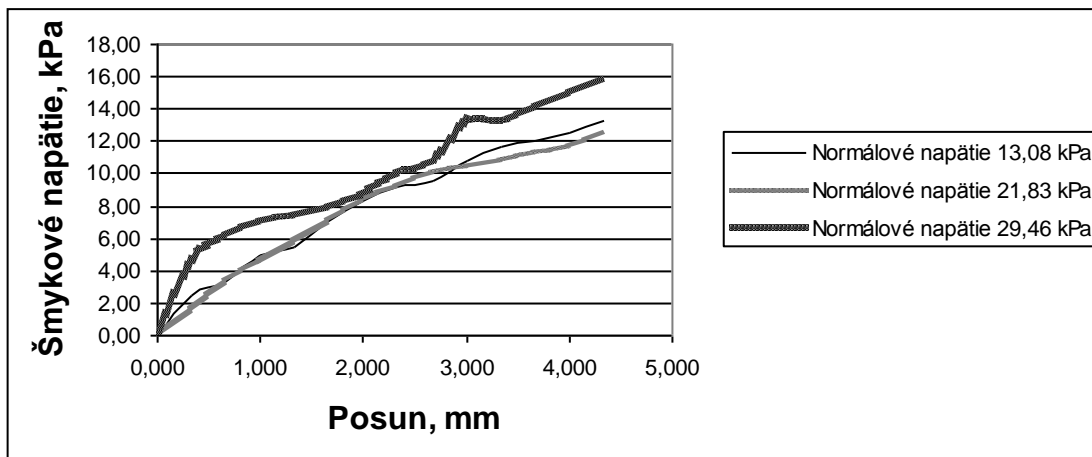
Výpis z tabuľky údajov meraných vrtuľkovým prístrojom

Uhol	Typ vrtuľky							
	Veľká				Malá			
	Šmykové napätie, kPa				Šmykové napätie, kPa			
	Číslo merania			a.p.	Číslo merania			a.p.
	1	2	3		1	2	3	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,44	0,91	1,39	1,25	5,82	1,12	2,45	3,13
2	2,23	1,97	3,25	2,48	7,57	2,45	3,64	4,55
3	2,68	2,61	4,12	3,13	8,06	3,64	4,76	5,49
4	3,14	2,94	4,71	3,60	9,53	4,13	4,98	6,21
5	3,42	3,14	5,07	3,88	10,93	4,76	5,33	7,01
6	3,68	3,42	5,40	4,17	11,98	5,33	5,61	7,64
7	4,01	3,64	5,67	4,44	12,61	5,82	5,61	8,01
8	4,28	3,84	6,35	4,82	13,66	6,66	5,61	8,64
9	4,59	4,01	7,42	5,34	14,29	6,66	6,17	9,04
10	4,87	4,17	8,51	5,85	15,42	6,66	6,45	9,51

4.3 Meranie v krabicovom šmykovom prístroji

Posledné nasledovalo meranie v krabicovom šmykovom prístroji a to na základe porovnania s vrtuľkovým prístrojom. Vzorka pôdy bola vložená do šmykovej krabice medzi porézne doštičky, pričom vzájomná poloha pohyblivej a nepohyblivej časti krabice sa zaistila odnímateľnými kovovými kolíkmi prechádzajúcimi oboma časťami skúšobnej krabice.

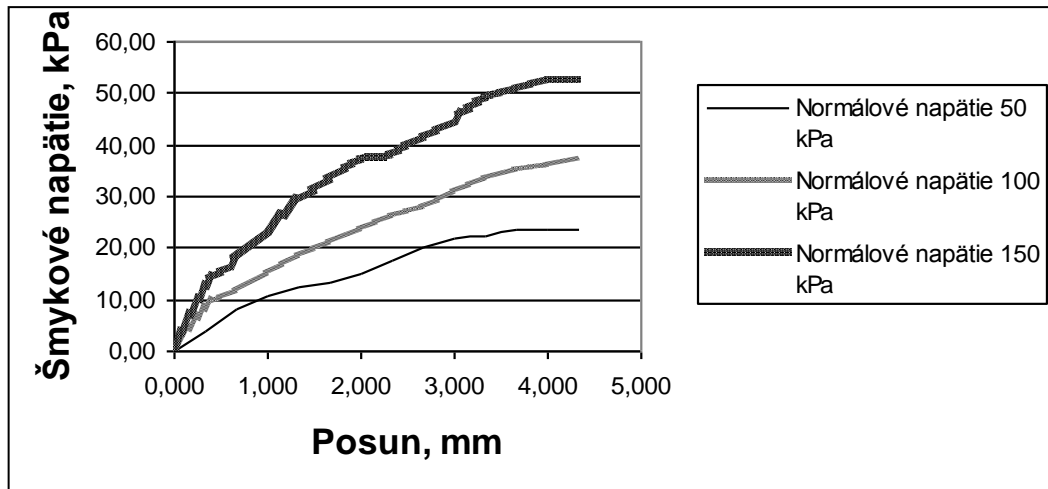
Keďže išlo o overenú skúšobnú metódu, vykonalo sa len jedno meranie s každým normálovým napätím. Hodnota použitého zaťaženia sa volila tak, aby výsledky napätia boli približne rovnakého rozsahu ako pri meraní vo vrtuľkovom prístroji s medzikružím. Výsledok skúšky s použitím tohto druhu záťaží je znázornený do grafu na obrázku 34.



Obrázok 33

Priebeh merania krabicovým prístrojom s použitím neštandardných závaží

Z grafu na obrázku 34 je zrejmé, že výsledné hodnoty z krabicovej skúšky s použitím neštandardných závaží sú nepoužiteľné. Hodnoty dosiahnuté pri nižšom normálovom napätí $\sigma = 13,08$ kPa vykazujú vyššie hodnoty maximálneho šmykového napätia $\tau = 13,33$ kPa, než pri výsledných hodnotách normálového napätia $\sigma = 21,83$ kPa, $\tau = 12,5$ kPa. Preto nie je možné zostrojiť Coulombovu priamku na porovnanie krabicového šmykového prístroja s vrtulkovým prístrojom. Z výsledkov krabicovej skúšky bolo zistené, že použitý prístroj nemôže v žiadnom prípade pracovať s takýmito nízkymi hodnotami napätí. Dôvodom toho sú následne veľmi nízke rozdielne hodnoty tangenciálnej sily a tiež šmykové napätia od nej odvodené. Z dôvodu merania s požadovanou presnosťou výsledkov, nasledovalo meranie s vyššími hodnotami normálového napätia, ktoré sú pre tento prístroj štandardné. Po takomto meraní však už nie je možné porovnanie veľkostí šmykových napätí. Novým parametrom pre porovnanie je vnútorný uhol trenia zeminy, vyplývajúci z Coulombovej priamky. Tento priebeh krabicovej skúšky so štandardnými závažiami je znázornený na nasledujúcom obrázku, ktorého parametre popisuje tabuľka 7.



Obrázok 34

Priebeh merania krabicovým šmykovým prístrojom

Tabuľka 7

Údaje namerané krabicovým prístrojom

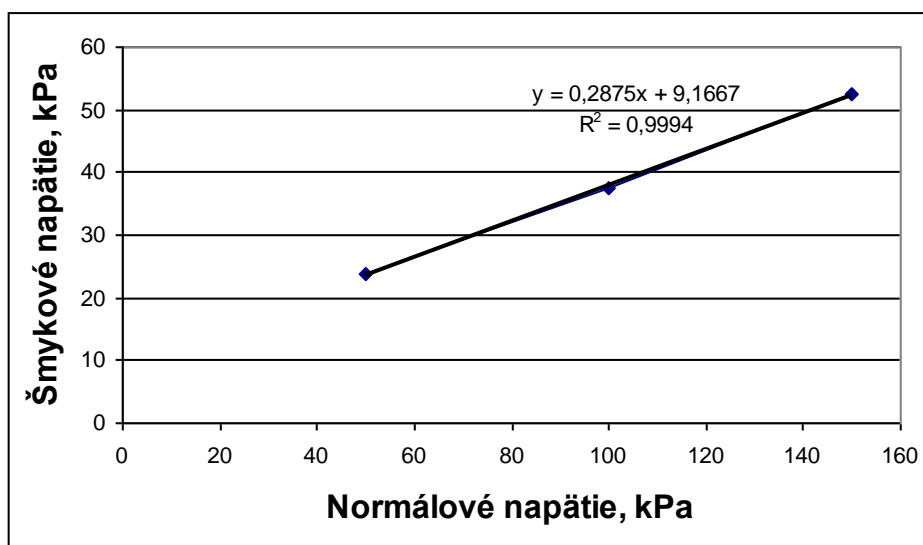
Posuv, mm	Normálové napätie, kPa					
	50		100		150	
	Deformácia, mm	Šmykové napätie, kPa	Deformácia, mm	Šmykové napätie, kPa	Deformácia, mm	Šmykové napätie, kPa
0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00
0,333	0,045	3,75	0,100	8,333	0,150	12,50
0,667	0,100	8,33	0,140	11,667	0,210	17,50
1,000	0,130	10,83	0,180	15,000	0,280	23,33
1,333	0,150	12,50	0,220	18,333	0,350	29,17
1,667	0,160	13,33	0,250	20,833	0,400	33,33
2,000	1,80	15,00	0,285	23,750	0,445	37,08
2,333	0,210	17,50	0,315	26,250	0,460	28,33
2,667	0,240	20,00	0,335	27,917	0,500	41,67
3,000	0,260	21,67	0,370	30,833	0,535	44,58
3,333	0,270	22,50	0,400	33,333	0,590	49,17
3,667	0,285	23,75	0,420	35,000	0,610	50,83
4,000	0,285	23,75	0,430	35,833	0,630	52,50
4,333	0,285	23,75	0,450	37,500	0,630	52,50

Z výsledkov uvedených v tabuľke 7 sú už zrejmé rozdiely v nameraných hodnotách šmykových napätí. Preto tiež bolo možné aj vytvoriť tabuľku s maximálnymi hodnotami šmykových napätí a následne tak zostrojiť priebeh Coulombovej priamky.

Tabuľka 8

Výsledky skúšky v krabicovom šmykovom prístroji

Normálové napätie, kPa	Maximálne šmykové napätie, kPa	Vnútorý uhol trenia, deg	Kohézia, kPa
50	23,75	16,03	9,16
100	37,5		
150	52,5		



Obrázok 35

Coulombova priamka zo skúšky krabicovým šmykovým prístrojom

5 Diskusia

V prehľade literatúry boli uvedené základné normy pre stanovenie šmykovej pevnosti pôdy ako základné dokumenty pri postupe meraní. Podobné normatívne dokumenty sa používajú aj v iných krajinách – DIN 18137-3, ASTM D3080, BS 1377, prEN ISO 17892-10 a iné. Šmyková pevnosť je vážnym parametrom pôdy, ovplyvňujúcim pevnostno-deformačné vlastnosti rôznych technických riešení pojazdov v styku s pôdou, alebo náradia, spracúvajúceho pôdu. Predbežná slovenská technická norma STN P ENV 1997-3 Eurokód 7: Navrhovanie geotechnických konštrukcií. Časť 3: Navrhovanie pomocou poľných skúšok (73 0014) bola síce zrušená k 31.12.2009 preto, že na základe ENV bol pripravený súbor noriem EN Eurokódy, ktoré nahradia predbežné európske normy. Účelom predbežnej normy bolo zabezpečenie dostatočnej kvality pri vykonávaní poľných skúšok a ich interpretácii, nenahrádzala normy pre prístroje a vykonávanie rôznych skúšobných metód, ale uvádzala základné požiadavky pre takéto normy. Tým, že bola vydaná táto norma ako predbežná európska norma, je zdôraznený jej význam pri rýchlom a orientačnom stanovení šmykovej pevnosti. Výber metódy merania a prístrojové zabezpečenie nie je predpisované, čo vytvára predpoklady pre rôzne výskumné a technické riešenia.

Prístupy ku riešeniu problematiky šmykových skúšok a ich prístrojového vybavenia pre laboratórne podmienky sú rôzne. Viacerí autori sa pokúšali navrhnúť lineárne šmykové prístroje.

Pomocou maximálnej hodnoty šmykovej pevnosti pôdy boli odvodené vzťahy pre trakčné vlastnosti kolesa a trakčnú účinnosť pre viaceré podložky. Experimentálne hodnoty max. šmykovej pevnosti pôdy sa stanovujú testerom, ktorého základom je reálne koleso (pneumatika) s pohonom.

Pri porovnávaní vlastností prístrojov bola za základ hodnotenia položená hodnota šmykového napätia a uhlová rýchlosť otáčania vrtuľky, resp. posuvu vzorky. Odporučili optimálnu vlhkosť pôdy okolo 30 %, rýchlosť otáčania (posuvu) vrtuľky do 10 rad/s. Keďže lineárny šmykový prístroj sa fyzikálne najviac približuje skutočnému pohybu pojazdu (kolesa) po pôde, lineárny šmykový prístroj sa najčastejšie využíva pre stanovenie maximálnej šmykovej pevnosti pôdy, ktorú dokáže pôda preniesť pri definovanom zaťažení na stanovenej ploche.

Najčastejšie používanou metódou v laboratórnych a terénnych podmienkach je vrtuľková šmyková skúška. Slúži na rýchle a orientačné zistenie šmykovej pevnosti pôdy v definovanej hĺbke. Vo väčšine prípadov sa používajú komerčne vyrábané prístroje (napr. vreckový vrtuľkový prístroj), ktoré sú založené na mechanickom pohone a na mechanickom odčítaní hodnôt (katalog ELE a i.). Firma Wykeham Farrance komerčne vyrába okrem lineárnych prístrojov aj rotačný šmykový prístroj a robustnejší vrtuľkový tester. Výsledky dosahované týmito prístrojmi majú však len orientačný charakter. V ich produkcii sa nachádza aj presný vrtuľkový prístroj určený na meranie s medzikružím, ktorý má meranie krútiaceho momentu realizované pomocou dvojice silových snímačov. Prístroj je však určený len na laboratórne merania. Tisa a Kovári (1984) zo Švajčiarskeho federálneho technologického inštitútu v Zürichu navrhli úplne novú koncepciu šmykového prístroja, ktorého podstatou je kolmá rovina šmyku vo vzorke. Tento prístroj je určený pre presné laboratórne merania šmykovej pevnosti na odobratých vzorkách pôdy. Johnson a kol.(1987) porovnávali viac torzných a translačných prístrojov, medzi nimi aj prístroj NIAE a torzný prístroj s medzikružím, pričom ako etalón im slúžili výsledky z triaxiálneho prístroja. Problémom použitých prístrojov bolo komplikované odčítavanie parametrov skúšok a ich záznam. Navrhli zariadenie na meranie šmykovej pevnosti pôdy ako súčasť bevametrickeho zariadenia. Na meranie použili torzné medzikružie, pričom zaťažujúce sily merali pomocou tlakového snímača, umiestneného pri hydraulickom valci. Ranhenma a kol. (2003) navrhli prístroj na meranie šmykovej pevnosti pôdy. Založený je na princípe zjednodušeného triaxiálneho prístroja a pre poľné podmienky je nevhodný. Seawald a kol. (2002) použili na hodnotenie vlastností pojazdu u vozidiel laboratórne zariadenie, umožňujúce meranie šmykovej pevnosti pomocou prstenca s lopatkami. Toto zariadenie je možné po úprave použiť v poľných podmienkach.

Dosiahnuté výsledky namerané na vzorkách pôd lineárnym krabicovým prístrojom, modifikovaným torzným prístrojom a vrtuľkovým šmykovým prístrojom navrhnutým a zhotoveným na Katedre konštruovania strojov TF. Dosiahnuté výsledky sú uvedené v tabuľkách a grafických priebehoch v časti 4.

Podľa Myslivca (1970) sa pohybuje uhol vnútorného trenia pri ostrých jemných pieskoch do 34° , u pieskov s jemnými rovnorodými zrnami v rozsahu 20 až 30° . Nakyprené sypké zeminy mávajú tieto hodnoty nižšie o 5 až 10° . Podobné výsledky pri stanovení šmykovej pevnosti morénových a lesných pôd uvádza Saarilahti (2002).

Wong (2001) a niektorí ďalší výskumníci uvádzajú uhol vnútorného trenia pre piesok okolo 32°. Bobe – Hubáček (1986) uvádzajú podobné hodnoty – pre jemný piesok 25 až 30°, kohézia 0 až 1,5 kPa; pre íly uhol vnútorného trenia 10 až 23°, kohézia 1 až 10 kPa. My sme namerali uhol vnútorného trenia piesku na modifikovanom torznom prístroji 18° a na krabicovom prístroji 21°. Na obidvoch prístrojoch sa kohézia suchého piesku veľmi tesne blížila k nulovej hodnote, konkrétne na torznom prístroji 1,36 kPa a na krabicovom prístroji 1,66 kPa. Potvrdili sa teoretické závery, že maximálna hodnota šmykového napätia pri meraní vrtuľkovým prístrojom zodpovedá v hraničných prípadoch nasýtenosti vzorky súdržnosti danej vzorky a možno ju preto odporúčať pre rýchle stanovenie kohézie pôdy. Na suchom piesku sme namerali hodnotu 1,81 kPa, ktorá sa blíži k nulovej hodnote tak ako uvádzajú spomínaní autori aj naše merania. Pri ílovitej pôde sme namerali uhol vnútorného trenia torzným prístrojom 15,7° a na krabicovom prístroji 16,03°. Porovnať hodnoty súdržnosti resp. kohézie mimo hraničných prípadov nasýtenosti pôdy nebolo možné vzhľadom na rozdielne normálové napätie medzi torzným prístrojom a krabicovým prístrojom. Dôvodom bola nemožnosť merať na krabicovom prístroji s nízkymi hodnotami normálových napätí, čo sme dokázali meraniami na ílovitej pôde. Ďalším dôvodom rozdielnych výsledkov je pravdepodobne rozsah rozmerov medzikružia. Pri zvolených rozmeroch dochádza pri definovanom normálovom zaťažení ku väčším chybám v kontaktnej ploche medzi medzikružím a pôdnou vzorkou. Pri väčších rozmeroch sa tento nedostatok môže odstrániť, ale pri nutnej zmene rozsahu snímača krútiaceho momentu, čo si vyžaduje ďalšie úpravy meracieho zariadenia.

Z prehľadu vidieť, že výsledky sú do značnej miery podobné, čo nás oprávňuje k záveru, že navrhnuté prístroje merajú spoľahlivo a dávajú relevantné výsledky. Rozdiely u jednotlivých parametrov boli spôsobené predovšetkým nemožnosťou zaistenia správneho odberu vzoriek pre krabicový prístroj (porušená vzorka pôdy).

Návrh na využitie výsledkov

Vrtuľkový šmykový prístroj môže nájsť široké uplatnenie v praxi a to hlavne vďaka jednoduchosti merania bez nutnosti odberu vzorky. Je možné s ním merať v laboratórnych aj v poľných podmienkach. Uhol vnútorného trenia a súdržnosť pôdy patrí medzi hlavné parametre potrebné k zisťovaniu trakčných vlastností energetických prostriedkov používaných v poľnohospodárstve. Poznaním uhla trenia danej pôdy v jej aktuálnom stave a vlhkosti a poznaním trenia pôda – koleso je možné so súčasným matematickým aparátom určiť parametre trakcie, preklz a pod. a posúdiť tak vhodnosť nasadenia typu energetického prostriedku ako aj adekvátnej agronomickej operácie. Súdržnosť pôdy je indikátorom nadmerného uľahnutia pôdy ako aj prípadného zosuvu na násypoch a hrádzach. Pri stavbe cestných komunikácií a konštrukcií ako aj pri zakladaní stavieb je možné poznaním týchto parametrov pôdy navrhnúť potrebné spevňujúce opatrenia, či sa už jedná o zalesnenie príp. zatrávnenie, použitie špeciálnych gabiónových konštrukcií schopných odolávať aj veľkým prietokom privalových vôd alebo zmene podložia resp. zväčšenie základových konštrukcií. Šmykové parametre pôdy sú jednou z vlastností, ktoré sa sledujú v systéme presného poľnohospodárstva. S prístrojom je možné pomocou podpory systému GPS vykonávať merania priamo v teréne vzhľadom na konkrétnu polohu na pozemku. Pomocou vyhodnocovacích softvérov, ako je napr. program Surfer je možné metódou geoštatistickej interpolácie - krigingu vyhotoviť pôdnu mapu rozloženia šmykovej pevnosti pôdy na skúmanom pozemku.

Dosiahnuté výsledky prezentované v predchádzajúcich častiach ilustrujú funkčnosť vrtuľkového šmykového prístroja a použiteľnosť výsledkov vo výskumnej činnosti.

Záver

Medzi základné fyzikálne vlastnosti z hľadiska technického a technologického patrí aj šmykové napätie pôdy. Z priebehu jeho charakteristiky sa dá určiť súdržnosť (kohézia) a uhol vnútorného trenia pôdy. Tieto parametre sú dôležité pre možnosť skúmania interakcie medzi pôdou a kolesom mechanizačného prostriedku ako aj vplyvu pracovných nástrojov na pôdu. Okrem základného využitia je možné zisťovať prístrojom šmykovú pevnosť pôdy pri stavbe cestných komunikácií, merania stability povrchových vrstiev ako aj pri melioračných úpravách pozemkov. Tieto sa môžu využiť pre návrh spracovania pôdy, použitého náradia, ako aj energetického prostriedku, resp. jeho pojazdového ústrojenstva (pneumatík).

Šmykové vlastnosti pôdy je možné zisťovať viacerými spôsobmi, pričom v praxi je najviac používaný krabicový šmykový prístroj. Pred meraním je nutné odobrať pôdnu vzorku, čím dochádza aj pri citlivom odbere k jej čiastočnému porušeniu. Preto sa neustále hľadajú nové, efektívnejšie metódy, ktoré by dokázali jednoducho a rýchlo charakterizovať stav pôdy priamo v teréne, metódou in-situ.

Vrtuľkový šmykový prístroj je schopný merať šmykové napätie pôdy v laboratórnych aj poľných podmienkach. Prístroj meria veľkosť krútiaceho momentu potrebného k ušmyknutiu pôdy, pootáčaním vrtuľky vtlačenej do pôdy. Pomocou elektromotora a dvojestupňovej závitovkovej prevodovky je zaručená konštantná rotácia vrtuľky. Prístroj bol navrhnutý a zhotovený tak, aby namerané údaje boli zaznamenané do pamäti prístroja s možnosťou ich prepísania do počítača.

K prístroju bolo navrhnuté modifikované meracie teleso – medzikružie. Takto sa dosiahol prakticky rovnaký fyzikálny princíp činnosti tohto prístroja v porovnaní so štandardnou krabicovou metódou. Boli vykonané porovnávacie merania rovnakých pôd na oboch prístrojoch v laboratórnych a následne poľných podmienkach.

Po spracovaní a porovnaní výsledkov sa potvrdil predpoklad, že navrhnutý prístroj spĺňa požadované parametre presnosti merania a spôsobu vykonania merania tak, aby bolo možné dodržať platnú normu. Výsledky meraní potvrdili teoretický predpoklad, že uhol vnútorného trenia pôdy a jej súdržnosť sú závislé od druhu pôdy, resp. jej zrnitostnej štruktúry a od aktuálnej vlhkosti pôdy. Možno konštatovať, že najväčší uhol vnútorného trenia vykazujú pôdy piesočnaté, pričom majú najnižšiu súdržnosť. Najväčšiu súdržnosť resp. kohéziu majú ílovité pôdy s vysokým obsahom jemných

častíc pri vysokej relatívnej vlhkosti. Porovnávacie meranie so štandardnou metódou dokazuje, že prototyp vrtuľkového šmykového prístroja pracuje podľa teoretických predpokladov a vzhľadom na značne zhodné výsledky možno konštatovať aj jeho správnu kalibráciu. Pri ušmyknutí pôdy nedochádza pri modifikovanej metóde s medzikružím k zmene strižnej plochy, tak ako je to u krabicového prístroja. Je však nutné poznamenať, že by bolo vhodné dosiahnuté výsledky overiť na takom krabicovom prístroji, ktorý by umožňoval porovnania pri rovnakých normálových napätiach, ktoré značne ovplyvňujú súdržnosť pôdy, pričom uhol vnútorného trenia pôdy zostáva zachovaný. Pri laboratórnych meraniach nie je nutné vzorku nijak upravovať a orezávať, čo je pri meraniach na krabicovom prístroji nutnosťou.

Pre dosiahnutie presnejších výsledkov pri meraniach s medzikružím by bolo potrebné optimalizovať jeho veľkosť tak, aby kontaktná plocha medzikružie – pôda nespôsobovala vznik chýb pri prenose síl, vzhľadom na veľkosť pôdnych agregátov.

Zoznam použitej literatúry

- BAJLA, J a kol. 2004. Návrh lineárneho šmykového prístroja pre podmienky in situ. In: Acta technologica, 2004, s.81 – 83.
- BAJLA, J. 1998. Porovnanie výsledkov meraní rôznymi penetračnými prístrojmi. Acta technologica, č.1, 1998, s. 27 – 30.
- BAJLA, J. 1998. Penetrometrické merania pôdných vlastností. Monografia. VES SPU Nitra, 1998, 112 s.
- BAJLA, J. – GADUŠ, J. – MURÍN, J. 1997. Zariadenie na meranie šmykovej pevnosti pôdy. In: Zborník XXXVIII. konferencie katedier častí a mechanizmov strojov, STU Bratislava, 1997, s. 286 – 291.
- BOBE, R. – HUBÁČEK, H. 1986. Boden mechanik, 2. vyd., Verlag für bauwesen, Berlin, 1986, 271s.
- DEMETER, R. – FILO, M. 2002. *Vplyv zmeny okrajových podmienok krabicovej šmykovej skúšky na zisťované parametre šmykovej pevnosti*, VŠB- Technická univerzita Ostrava, Sborník studenských prací 2002, III. Roč.- mezinárodní kolo SVOČ stavebních fakult ČR a SR, 115 s.
- DRUSA, M. – GRÓF, V. – KRATOCHVÍL, M. 1995. Mechanika zemín, príklady. 1. vyd. VŠDS Žilina, 1995, 135s.
- ECKSCHLAGER, K. a kol. 1980. Vyhodnocování analytických výsledků a metod, 1.vyd., SNTL Praha, 1980, 223s.
- JOHNSON, C.E. a kol.1987. *Shear Measurement for Agricultural Soils – A Review*. In: Trans. of ASAE, Vol. 30, No. 4, p. 935-938.
- KRATOCHVÍL, M. 1982. Mechanika zemin, 1.vyd., Bratislava Alfa, 1970, 98 s.
- MARSHAL, M.–HOLMES, F. 1989. Soil physics. 1. vyd. Elsevier Amsterdam, 1989, 240 s.

- MAŠÍN, D., 1999. *Pevnost směsí zemin*. Bakalárska práca, Přírodovědecká fakulta UK Praha 1999, 31 s.
- MYSLIVEC, A. a kol. 1970. *Mechanika zemín*. 1. vyd. Praha: SNTL/Alfa, 1970, 278 s.
- NOSKOVIČ, J. a kol. 2005. *Ochrana a tvorba životného prostredia*, 2.vyd., Nitra 2005, 141 s.
- PAYNE, P.C.J. – FOUNTAINE, E. 1952. *A field method of measuring strength of soils*. In: *J. of Soil Science*, Vol. 3, p. 136-139.
- PLESSIS, H.M.L.- YU, T. 2006. *Modelling the traction of prototype track based on-rubber fiction and adhesion*. In: *Open UP*, August 2006, p. 1-21.
- PRIECEL, J., 1988. *Mechanika zemín a zakladanie stavieb*. 3. vyd., SPU Nitra 1988, 311 s.
- PRIECEL, J., 2000. *Mechanika zemín a zakladanie stavieb*. 4. vyd., SPU Nitra 2000, 187 s.
- RANHENMA, A. a kol. 2003. *A new simple shear apparatus for testing unsaturated soils*. In: *Iranian J. of Science /Technology. Transaction B*, Vol. 27, No. B1, p.14-22.
- SAARILAHTI, M., 2002. *Soil interaction model. Project deliverable D2. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (ECOWOOD)*, 87 s.
- SEAWALD, G. H.- LEAMY, M.- ARNAS, O. 2002. *An Undergraduate Mechanical engineering Laboratory Project for Predicting and Measuring Off-road Vehicle Mobility*. In: *Proceedings of the 2002 ASEE Zone I Conference, United States Military Academy, West Point, New York*, P. 1-24, section F.
- SHOOP, A. 1993. *Terrain Characterization for Trafficability*. In: *Crrrel report*. 1993, č. 6, 19 s.
- SOUCEK, R. – PIPPIG, G.:1990. *Maschinen und Geräte für Bodenbearbeitung*. 1-st ed., Berlin: Verlag Technik GmbH, 485 s.
- SOTÁKOVÁ, S. 1988. *Pôdoznalectvo*. 3. vyd. Bratislava: Príroda, 1988. 404 s.

- ŠIMEK, J. a kol. 1990. *Mechanika zemín*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 387 s.
- TISA, A.- KOVÁRI, K. 1984. Continuous Failure State Direct Sudar Test. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 17, p. 83-95.
- VARGIC, M – BAJLA., J. 2007. *Measurement shear stress of soil with vane test and standard shear box*. In: *Traktori i pogonske mašine*, roč. 12, 2007, č. 2, s. 47-53.
- VARGIC, M.- BAJLA, J.- TÓTH, J., 2007. Analýza a modifikácia snímača krútiaceho momentu. In: *Zborník vedeckých prác Nové trendy v konštruovaní a tvorbe technickej dokumentácie*, Nitra, máj 2007, s. 97-102.
- VARGIC, M., 2008. *Porovnávacie meranie šmykovej prístrojov v laboratórnych a poľných podmienkach*. Autoreferát dizertačnej práce, SPU v Nitre 2008, 20s.
- VOLFSON, B. P. 1984. *Determination of Some Soil properties for Vehicle Ride Simulation*. In: *Trans. of ASAE*, Vol. 27, No. 2, p. 341-347.
- WONG, J. Y. 2001. *Theory of ground vehicles*. 3. vyd., John Wiley and Sons, Inc., 2001, 528s.
- ZAVORAL, J. a i.: 1987. *Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin. I. Mechanika zemin – metodiky*. 1. vyd., Praha: ČGÚ, 186 s.
- ZAVORAL, J. a i.: 1987. *Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin. II. Mechanika zemin – komentáře k metodikám*. 1. vyd., Praha: ČGÚ, 124 s.

Katalógy

ELE International: 2003. *Civil and Environmental Engineering Test Equipment*. 19th ed. Catalogue ELE International Ltd. Eastman Way, Hertfordshire, England

Wykeham Farrance

EIJKELKAMP: Agrisearch Equipment, katalog výrobkov, 2008, s. 97, www.eijkelkamp.com

SHAMBHAVI INPEX, Vane shear apparatus, www.shambhaviimpex.com

VOMET, spol. s r. o., Vomet priemyselné sitá, katalóg vybavenie laboratórií, 2010, s. 32, www.vomet.sk

Normy

ASTM D 2573-72 Field Vane Test in Cohesive Soils

ASTM D 3080 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolida-ted Drained Conditions

BS 1377:1975 Methods of Testing Soils for Civil Engineering Purposes. Test 18. Determination of shear strenght in the field by the vane test

DIN 4096 Flügelsondierung. 1980

EN ISO 12957:1997 Geotextilies and geotextile – related product – Determination of the friction characteristics – Part 1: Direct shear test, CEN Bruxelles, 10 p. prEN ISO 17892-10

STN P ENV 1997-2 (73 0092) *Eurokód 7. Navrhovanie geotechnických konštrukcií. Časť 2: Navrhovanie pomocou laboratórnych skúšok (73 0014)*

STN 72 1010 *Stanovenie objemovej hmotnosti zemín. Laboratórne a poľné metódy. 1989*

STN 72 1012 *Laboratórne stanovenie vlhkosti zemín. 1980*

STN 72 1025 *Laboratórne stanovenie pevnosti jemnozrnných zemín v prostom tlaku. 1992*

STN 72 1026 *Laboratórne stanovenie šmykovej pevnosti zemín vrtuľkovou skúškou. 1992*

STN 72 1030 *Laboratórne metódy stanovenia šmykovej pevnosti zemín krabicovým prístrojom. 1988*

STN 72 1031 *Laboratórne metódy stanovenia šmykovej pevnosti zemín triaxiálnym prístrojom. 1987*