

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA
Katedra geotechniky

Ing. Matúš KOLEŇÁK

Autoreferát dizertačnej práce

**VYUŽITIE NETRADIČNÝCH NÁSYPOVÝCH
A VÝSTUŽNÝCH MATERIÁLOV VO VYSTUŽENÝCH
ZEMNÝCH KONŠTRUKCIÁCH**

na získanie akademického titulu philosophiae doctor, PhD.

v doktorandskom študijnom programe: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore: stavebníctvo

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

Miesto a dátum: Bratislava, máj 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej prezenčnej forme doktorandského štúdia na Katedre geotechniky Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Matúš KOLEŇÁK
Stavebná fakulta STU, Katedra geotechniky – externý doktorand
Hlavná 21/145, 919 09 Bohdanovce nad Trnavou

Školiteľ: doc. Ing. Ivan SLÁVIK, PhD.
Stavebná fakulta STU, Katedra geotechniky
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa.....o.....hod v
..... Stavebnej fakulty Slovenskej technickej
univerzity v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav UNČÍK, PhD.
dekan Stavebnej fakulty STU v Bratislave

OBSAH

1. ÚVOD	3
2. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	4
3. METODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA	5
3.1 Násypové materiály použité pre experimentálne merania	6
3.2 Výstužné materiály použité pre experimentálne merania	7
3.3 Laboratórne zariadenie použité pre experimentálne testovanie	8
3.4 Fyzikálny model použitý pre experimentálne testovanie	8
3.5 Laboratórny experimentálny testovací program	9
3.6 Experimentálny testovací program na fyzikálnom modeli	10
4. VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNYCH MERANÍ A ICH DISKUSIA	12
4.1 Efekt mikrovystuženia netradičných násypových materiálov netradičnými výstužnými prvkami – krabicové šmykové skúšky	12
4.2 Efekt mikrovystuženia netradičných násypových materiálov netradičnými výstužnými prvkami – fyzikálne modelovanie	14
4.3 Efekt makrovystuženia netradičných násypových materiálov tradičnými výstužnými prvkami – fyzikálne modelovanie	16
5. ZÁVER	21
5.1 Prínosy dizertačnej práce	22
5.2 Ďalšie smerovanie výskumu	22
6. ABSTRACT	23
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	24
PUBLIKÁCIE AUTORA	26

1. ÚVOD

V kontexte súčasnej environmentálnej a ekonomickej situácie je dôležité zdôrazniť koncept trvalo udržateľného rozvoja, ktorý by mal byť neodmysliteľnou súčasťou každého nového inžinierskeho návrhu. Tento koncept by nás mal viesť k premyslenej a zodpovednej produkcii a využívaniu materiálových zdrojov. Významný potenciál predstavuje využitie, ktoré môžu byť vďaka inovatívnym spracovateľským technikám transformované na hodnotné stavebné prvky. Táto práca sa preto zameriava na analýzu možnosti využitia recyklovaných a odpadových materiálov v geotechnických konštrukciách a hľadá ako tieto sekundárne suroviny efektívne integrovať do procesu výstavby s cieľom znížiť ekologickú stopu a súčasne zachovať alebo dokonca zvýšiť kvalitu a bezpečnosť geotechnických konštrukcií.

Hlavnou ideou tejto práce je skúmanie možnosti využitia netradičných násypových materiálov, resp. netradičných výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách formou experimentov. Netradičné násypové materiály boli pre experimentálne overovanie charakterizované odpadmi z energetických výrobní, resp. odpadmi z banskej činnosti a netradičné výstužné materiály boli pre experimentálne overovanie charakterizované PET odpadmi.

2. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

V súčasnosti je kladený čoraz väčší dôraz na využitie z odpadu recyklovaných a antropogénnych materiálov s cieľom minimalizovať negatívne vplyvy na životné prostredie. Priemyselné odpady a antropogénne materiály ukladané na skládky a odkaliská tvoria potencionálnu surovinovú základňu nielen z pohľadu ďalšieho priemyselného spracovania, ale aj ako materiály, ktoré by bolo možné využiť v násypových telesách geotechnických konštrukcií. Využitie týchto materiálov s vylepšenými vlastnosťami či už tradičnými alebo netradičnými výstužnými prvkami v geotechnických konštrukciách by zvýraznilo ekonomicko-environmentálny efekt v kontexte trvalo udržateľného rozvoja. Je preto nevyhnutné skúmať možnosti využitia niektorých druhov antropogénnych materiálov a ich vzájomnú interakciu s geosyntetickými materiálmi pri budovaní geotechnických konštrukcií, ako aj analyzovať možnosti nahradenia geosyntetických materiálov neštandardnými recyklovanými odpadovými materiálmi v takýchto konštrukciách. Návrh geotechnických konštrukcií budovaných z neštandardných materiálov by mal vychádzať z poznania vlastností materiálu a z definovania interakčných väzieb medzi recyklovaným odpadovým, antropogénnym a geosyntetickým materiálom.

Hlavným cieľom dizertačnej práce boli experimentálne štúdie zamerané na:

- analýzu interakčných vzťahov tradičných geosyntetických výstužných materiálov a netradičných násypových materiálov vo vystužených geotechnických konštrukciách;
- analýzu interakčných vzťahov netradičných výstužných materiálov a netradičných násypových materiálov vo vystužených geotechnických konštrukciách.

Skupinu tradičných výstužných materiálov v experimentálnych meraniach tvorili bežne komerčne dostupné výstužné geosyntetické prvky. Ako netradičné výstužné prvky boli použité výstuhy pripravené z plastových odpadov (PET fliaš). Ako netradičný násypový materiál bol použitý popol charakterizujúci odpad vzniknutý spaľovaním uhlia a piesok charakterizujúci odpad vzniknutý banskou činnosťou.

Pre naplnenie cieľov dizertačnej práce boli zvolené:

- laboratórne experimentálne merania;
- experimentálne overovania formou fyzikálneho modelovania.

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

Cieľom laboratórnych experimentálnych meraní bola analýza vplyvu mikrovystuženia netradičných násypových materiálov (popolov a pieskov) netradičnými výstužnými prvkami (ústrižkami z PET fliaš) na pevnostné a deformačné vlastnosti týchto násypových materiálov.

Cieľom fyzikálneho experimentálneho modelovania bolo overenie správania sa dvoch typov vystužených geotechnických konštrukcií (vystuženého svahu násypu a vystuženého oporného múru). V prípade vystuženého svahu násypu bol analyzovaný vplyv mikrovystuženia netradičných násypových materiálov (popolov a pieskov) netradičnými výstužnými prvkami (ústrižkami z PET fliaš) na jeho deformáciu vplyvom pôsobiaceho zaťaženia. V prípade vystuženého oporného múru bol analyzovaný vplyv makrovystuženia netradičných násypových materiálov (popolov a pieskov), tradičnými geosyntetickými výstužnými prvkami na jeho deformáciu vplyvom pôsobiaceho zaťaženia.

3. METODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA

Metodika spracovania dizertačnej práce bola podmienená stanovenými cieľmi, a z tohto dôvodu boli metódy skúmania zamerané na laboratórne experimentálne merania, resp. na experimentálne merania využívajúce fyzikálne modelovanie analyzovaných vplyvov.

Laboratórne experimentálne merania boli realizované pre analýzu vplyvu vystuženia netradičných násypových materiálov netradičnými výstužnými prvkami. Analyzovaný bol efekt mikrovystuženia popolov a pieskov ústrižkami z použitých PET fliaš na ich pevnostné a deformačné parametre. Laboratórne experimentálne merania boli realizované formou krabicových šmykových skúšok vo veľkorozmerovom krabicovom šmykovom prístroji.

Fyzikálne modelovanie bolo realizované pre analýzu nielen efektu mikrovystuženia netradičných násypových materiálov (popolov a pieskov) netradičnými výstužnými prvkami (ústrižkami z použitých PET fliaš), ale aj pre analýzu efektu makrovystuženia netradičných násypových materiálov tradičnými komerčne dostupnými geosyntetickými výstužnými prvkami. Pre komparáciu vplyvu vystuženia netradičných násypových materiálov tradične používanými geosyntetickými výstužnými prvkami boli vo fyzikálnom modeli realizované aj experimentálne merania tradičného násypového materiálu (štrkodrvy) vystuženého tradičnými geosyntetickými výstužnými prvkami. Pre fyzikálne modelovanie bol skonštruovaný skúšobný box, v ktorom bol vplyv mikrovystužovania netradičných násypových materiálov netradičnými výstužnými prvkami skúmaný na umelo vytvorenom svahu a vplyv makrovystuženia netradičných násypových materiálov tradičnými geosyntetickými výstužnými prvkami na vystuženej pažiacej konštrukcii.

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

3.1 Násypové materiály použité pre experimentálne merania

V laboratórnych experimentálnych meraniach a aj vo fyzikálnom modelovaní bol ako netradičný násypový materiál použitý popol charakterizujúci odpad vzniknutý spaľovaním uhlia a piesok charakterizujúci odpad vzniknutý banskou činnosťou. Pre porovnanie bol vo fyzikálnom modelovaní ako tradičný násypový materiál použitý drvený štrk (štrkodrava).

Popol ako produkt pri spaľovaní uhlia v tepelnej elektrárni SE a.s. Elektrárne Nováky bol pre experimentálne merania odobratý náhodným odberom z akumuláčného priestoru Definitívneho odkaliska v Zemianskych Kostolnoch. Zrnitostne bol popol zatriedený ako piesok s prímiesou jemnozrnnej zeminy (symbol S-F – trieda S3) obr. 2.

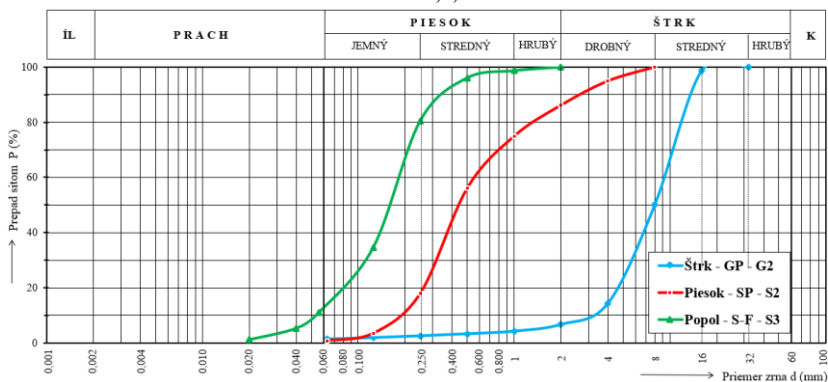
Piesok bol pre experimentálne merania odobratý v komerčnej štrkopieskovni, do ktorej je importovaný z kameňolomu pri obci Trstín nachádzajúcej sa v oblasti Malých Karpát. Jedná sa o dolomitický piesok. Podmienkou pri výbere piesku bolo zrnitostné zloženie odpovedajúce priemernej zrnitostnej skladbe odpadov úpravni rúd ukladaných do odkalísk. Zrnitostne bol piesok zatriedený ako piesok zle zmený (symbol SP – trieda S2) obr. 2.

Štrk bol obdobne ako piesok odobratý v tej istej komerčnej štrkopieskovni. Podmienkami pri výbere štrku použitého v experimentálnych meraniach bolo zrnitostné zloženie tradične sa používajúce pre geosyntetické výstupy a skutočnosť, že pôjde o drvený materiál. Zrnitostne bol štrk zatriedený ako štrk zle zmený (symbol GP – trieda G2) obr. 2.

Reálne snímky násypových materiálov použitých pre experimentálne merania sú na obr. 1a,b,c.



Obr. 1a,b,c



Obr. 2

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

3.2 Výstužné materiály použité pre experimentálne merania

V laboratórnych experimentálnych meraniach a aj vo fyzikálnom modelovaní bol ako mikrovýstužný materiál použitý plastový odpad z PET fliaš. Vo fyzikálnom modelovaní boli okrem toho ako makrovýstužný materiál použité tradičné komerčne dostupné geosyntetické výstužné prvky.

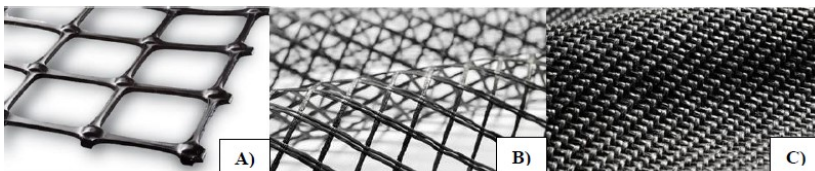
Ústrižky z PET fliaš boli získané z použitých plastových fliaš s objemom 330 a 500 ml, ktoré sú bežným odpadovým produktom po konzumácii balenej vody, narezaním na plastové prúžky šírky 10 mm uzatvoreného kruhového tvaru s priemerom do 60 mm obr. 3. Celkovo bolo pre experimentálne merania nastrihaných 6 702 ks prúžkov o celkovej hmotnosti 2 104 g.



Obr. 3

Tradičné geosyntetické výstuhy použité v experimentálnych meraniach boli vybrané tak, aby boli zastúpené tuhé aj mäkké výstuhy ale aj výstuhy s otvormi, resp. plné výstuhy:

- tuhá polypropylénová výstuha Thrace TG 4040 S (Obr. 4A);
- mäkká tkaná výstuha Tencate Miragrid GX 55/30 (Obr. 4B);
- plná tkaná výstuha Thrace WG 80 (Obr. 4C).



Obr. 4A),B),C)

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

3.3 Laboratórne zariadenie použité pre experimentálne merania

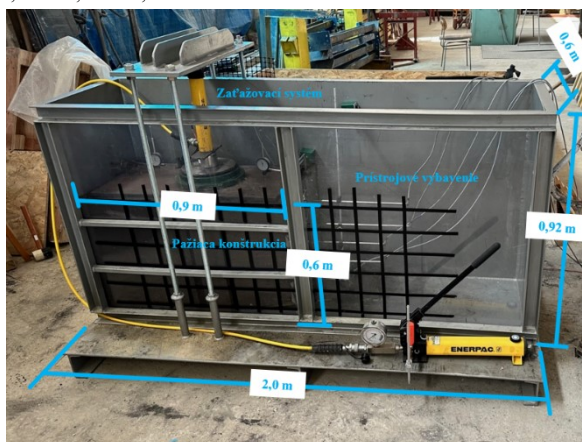
Šmykový prístroj SHEARMATIC 300 s rozmermi krabice 300 x 300 mm bol použitý pre testovanie vplyvu mikrovystuženia netradičných násypových materiálov (popolov a pieskov) odpadovými PET ústričkami obr. 5. Použitím veľkorozmerového krabicového šmykového prístroja je možné získať reprezentatívnejšiu indikáciu šmykových parametrov.



Obr. 5

3.4 Fyzikálny model použitý pre experimentálne testovanie

Fyzikálny model a jeho výstavba bola jedným z najpodstatnejších krokov pre zrealenie výsledkov experimentálneho testovania. Fyzikálny model tvorí box obdĺžnikového tvaru s rozmermi 2,0 m / 0,6 m / 0,92 m obr. 6. Priestor určený na testovanie vzoriek zeminy mal rozmery 0,9 m / 0,5 m / 0,6 m.



Obr. 6

3.5 Laboratórny experimentálny testovací program

Laboratórny experimentálny testovací program bol zameraný na efekt mikrovystuženia popolov a pieskov ústrižkami z použitých PET fliaš na ich pevnostné a deformačné parametre. Laboratórne experimentálne merania boli realizované formou krabicových šmykových skúšok vo veľkorozmerovom krabicovom šmykovom prístroji podľa normy STN EN ISO 17892-10: Laboratórne metódy stanovenia šmykovej pevnosti zemín krabicovým prístrojom.

Pre experimentálne overovanie mikrovystuženia boli realizované nasledovné kombinácie krabicových šmykových testov:

- piesok s vystužením pomocou PET ústrižkov 0,00 % ; 0,25 % ; 0,50 % ; 1,00 % k jeho suchej objemovej hmotnosti;
- popol s vystužením pomocou PET ústrižkov 0,00 % ; 0,50 % ; 1,00 % ; 1,50 % k jeho suchej objemovej hmotnosti.

Šmyková pevnosť a stlačiteľnosť nevystuženého piesku a popola (vystuženie 0,00 %) bola overovaná pre porovnanie efektu mikrovystuženia týchto materiálov PET ústrižkami.

Rozmer skúšobných vzoriek v krabicovom šmykovom prístroji bol 300/300/150 mm. Vzorky boli pripravované postupným nasypávaním násypového a výstužného materiálu po vrstvách s následným hutnením každej vrstvy až po konečnú výšku vzorky. Postup prípravy vzoriek je prezentovaný v prílohe č. 1. V prvom kroku prebiehala konsolidácia vzoriek. Aplikované boli nominálne normálové napätia 25, 50 a 100 kPa. Skutočné hodnoty normálového napätia sa však mierne líšili. Záznamy meraní ukázali, že tieto hodnoty oscilovali približne okolo 17, 42 a 92 kPa. Takéto napätia boli udržiavané aj následne pri šmykových skúškach, ktoré prebiehali v druhom kroku testovania. Vo vyhodnotení skúšok boli použité už reálne zaznamenané hodnoty normálových napätí, ktorým zodpovedali aj namerané šmykové napätia. Rýchlosť nanašania šmykového napätia na skúšobné vzorky bola 0,25 mm.min⁻¹. Maximálna horizontálna deformácia vzoriek počas skúšok bola 60 mm, čo odpovedá pomernej horizontálnej deformácii vzoriek 20 %. V priebehu konsolidačnej fázy sa sledovali aj vertikálne deformácie vzoriek vplyvom pôsobiaceho zvislého napätia, a tak bol krabicový šmykový prístroj využitý aj ako oedometer pre vyjadrenie deformačných parametrov testovaných materiálov.

Z výsledkov krabicových šmykových skúšok boli vyjadrené vplyvy vystuženia piesku a popola PET ústrižkami na ich:

- efektívne pevnostné parametre – uhol vnútorného trenia φ_{ef} a súdržnosť c_{ef} ;
- deformačné parametre – oedometrický modul deformácie E_{oed} .

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

3.6 Experimentálny testovací program na fyzikálnom modeli

Testovacím programom na fyzikálnom modeli bol experimentálne overovaný efekt:

- mikrovystuženia popolov a pieskov ústrižkami z použitých PET fliaš na horizontálne deformácie násypového svahu vplyvom jeho zaťaženia;
- makrovystuženia popolov a pieskov tradičnými geosyntetickými výstužnými prvkami na horizontálne deformácie vystuženej pažiacej konštrukcie vplyvom jej zaťaženia.

Pre experimentálne overovanie mikrovystuženia vo fyzikálnom modeli boli na násypovom svahu realizované nasledovné kombinácie testov:

- násyp z piesku s vystužením pomocou PET ústrižkov 0,00 % ; 0,25 % k jeho suchej objemovej hmotnosti;
- násyp z popola s vystužením pomocou PET ústrižkov 0,00 % ; 0,25 %; k jeho suchej objemovej hmotnosti.

Horizontálna deformácia nevystuženého násypového svahu z piesku a popola (vystuženie 0,00 %) bola overovaná pre porovnanie efektu mikrovystuženia týchto materiálov PET ústrižkami. Parametre násypového svahu vo fyzikálnom modeli sú prezentované na obr. 7.

Svah bol pripravený postupným nasypávaním násypového a výstužného materiálu po vrstvách s následným hutnením každej vrstvy až po konečnú výšku $H = 0,6$ m. Aby bol dodržaný požadovaný sklon násypového svahu 1:1,5, bolo počas nasypávania a hutnenia použité drevené debnenie. Po nasypaní svahu bola na jeho korunu osadená oceľová zaťažovacia platňa dĺžky $b = 0,3$ m a na svah boli inštalované snímače horizontálnych deformácií v rovnomerne rozdelených 5-tich výškových úrovniach. Postup prípravy násypového svahu do boxu fyzikálneho modelu je prezentovaný v prílohe č.3.

Počas zaťažovania svahu bol sledovaný vplyv mikrovystuženia násypového svahu z piesku a popola PET ústrižkami na:

- horizontálne deformácie násypového svahu Δx v jednotlivých výškových úrovniach a maximálnu horizontálnu deformáciu Δx_{max} ;
- vertikálnu deformáciu prednej hrany zaťažovacej dosky Δy_1 a nerovnomernú deformáciu zaťažovacej dosky $(\Delta y_1 - \Delta y_2) / b$.

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

Experimentálne overovania makrovystuženia vo fyzikálnom modeli boli realizované na pažiacej konštrukcii tvorenej oceľovou platňou výšky $H = 0,6$ m zabezpečujúcou násyp vystužený geosyntetickými výstuhami dĺžky $L = 0,7$ a $1,0$ H s vertikálnymi rozstupmi $s = 1/6$ a $1/3$ H. Násyp za pažiacou konštrukciou bol budovaný postupným nasýpaním, hutnením materiálu, vkladáním výstužných prvkov a ich upevňovaním ku pažiacej konštrukcii. Na povrch násypu bola osadená oceľová zaťažovacia platňa dĺžky $b = 0,8$ m. K čelu pažiacej konštrukcie boli v rovnomerne rozdelených 5-tich výškových úrovniach osadené snímače horizontálnej deformácie pre záznam deformácie pažiacej konštrukcie.

Pre experimentálne overovanie makrovystuženia vo fyzikálnom modeli boli na pažiacej konštrukcii realizované nasledovné kombinácie testov:

- piesok vystužený tuhou, mäkkou a plnou výstuhou dĺžky $1,0$ a $0,7$ H pri vertikálnej vzdialenosti $s = 1/6$ a $1/3$ H;
- popol vystužený tuhou, mäkkou a plnou výstuhou dĺžky $0,7$ H pri vertikálnej vzdialenosti $s = 1/6$ a $1/3$ H;
- štrk vystužený tuhou výstuhou dĺžky $0,7$ H pri vertikálnej vzdialenosti $s = 1/6$ a $1/3$ H a vystužený plnou výstuhou dĺžky $0,7$ H pri vertikálnej vzdialenosti $s = 1/6$ H.

Štrk ako tradičný násypový materiál v násypovom telese za pažiacou konštrukciou bol použitý vo fyzikálnom modeli z dôvodu porovnania vplyvu makrovystuženia netradičných násypových materiálov (piesku a popola) tradičnými geosyntetickými výstužnými prvkami.

Počas zaťažovania násypu bol sledovaný vplyv makrovystuženia násypu z piesku, popola a štrku zabezpečeného pažiacou konštrukciou na:

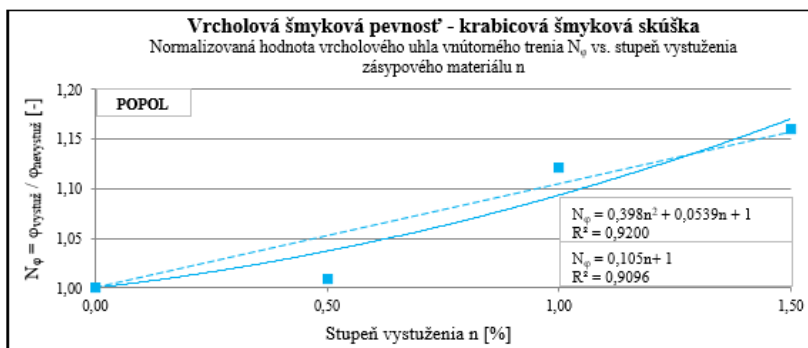
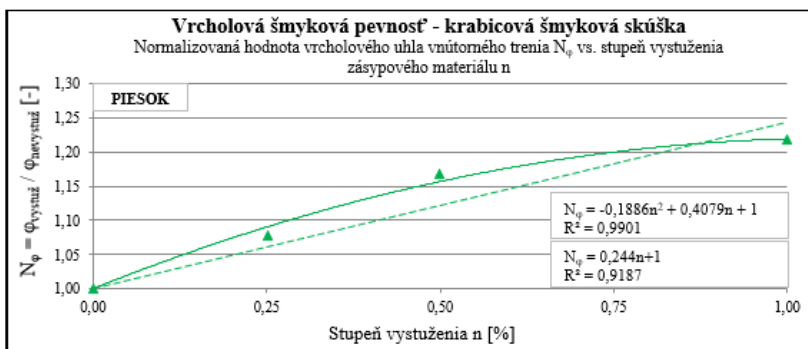
- horizontálne deformácie pažiacej konštrukcie Δx v jednotlivých výškových úrovniach a maximálnu horizontálnu deformáciu Δx_{\max} ;
- vertikálnu deformáciu prednej hrany zaťažovacej dosky Δy_1 a nerovnomernú deformáciu zaťažovacej dosky $(\Delta y_1 - \Delta y_2) / b$.

4. VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNYCH MERANÍ A ICH DISKUSIA

4.1 Efekt mikrovystuženia netradičných násypových materiálov netradičnými výstužnými prvkami – krabicové šmykové skúšky

Pozornosť pri vyhodnotení krabicových šmykových skúšok bola predovšetkým zameraná na vyjadrenie vplyvu meniaceho sa stupňa vystuženia piesku a popola PET ústrižkami na šmykovú pevnosť.

Z čiar šmykových pevností boli vyjadrené aj vrcholové efektívne parametre šmykovej pevnosti – uhly vnútorného trenia φ_{ef} [°] a súdržnosti c_{ef} [kPa]. Vplyv vystuženia na nameranú hodnotu súdržnosti c [kPa] bol zanedbateľný u oboch testovaných materiálov. Pozornosť bola zameraná predovšetkým na vyjadrenie vplyvu vystuženia na vrcholový uhol vnútorného trenia φ [°], ktorý bol vyjadrený normalizovanou hodnotou N_φ [-] ako pomer hodnoty uhla vnútorného trenia vystuženého φ^V [°] a nevystuženého materiálu φ^N [°]. Závislosť zmeny normalizovanej hodnoty uhla vnútorného trenia N_φ [-] na stupni vystuženia n [%] PET ústrižkami v piesku a v popole na obr. 7a,b.

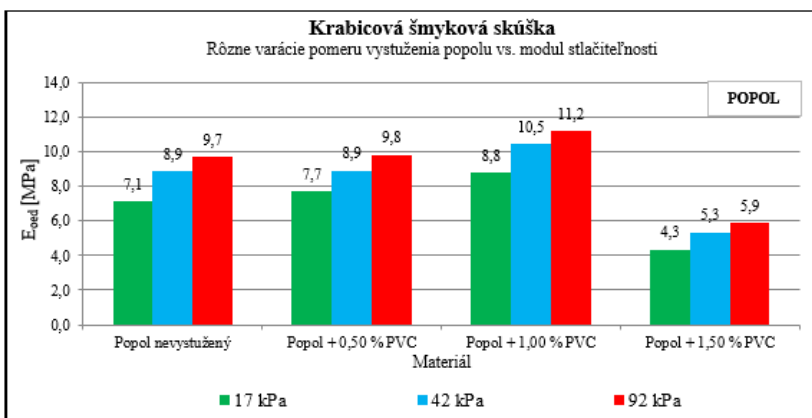
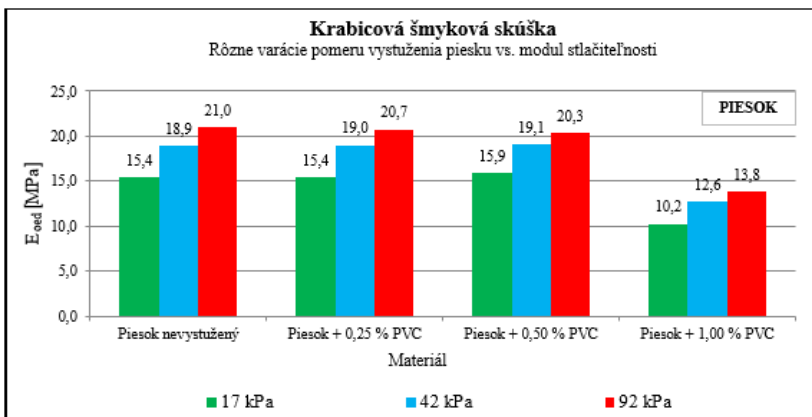


Obr. 7a,b

Využitie netradičných náস্যových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

Z výsledkov je zrejímý nárast hodnoty uhla vnútorného trenia piesku až o 22 % a popola o 16 % vplyvom ich vystuženia PET ústričkami. Závislosť medzi stupňom vystuženia n [%] a normalizovanou hodnotou uhla vnútorného trenia N_{ϕ} [-] bola pre piesok aj popol vyjadrená regresnými funkciami (kvadratickou a lineárnou). Hodnoty koeficientov determinácie v rozpätí 0,91 – 0,99 naznačujú veľmi vysokú tesnosť korelácie ($R^2 \geq 0,80$).

Prvá fáza krabicovej šmykovej skúšky (konsolidácia normálovým napätím σ [kPa]), počas ktorej boli sledované vertikálne deformácie testovanej vzorky piesku a popola, bola využitá pre vyjadrenie ich oedometrického modulu deformácie E_{oed} [MPa]. Hodnoty oedometrických modulov deformácie E_{oed} [MPa] pre jednotlivé konsolidačné napätia σ [kPa] a stupne vystuženia n [%] PET ústričkami s porovnaním hodnôt oedometrických modulov deformácie E_{oed} [MPa] vystužených a nevystužených testovaných materiálov sú na obr. 8a,b.



Obr. 8a,b

Zo vzájomného porovnania hodnôt oedometrických modulov deformácie E_{oed} [MPa] nevystuženého a vystuženého piesku vyplýva, že do stupňa vystuženia $n = 0,50$ % nemá jeho vystuženie PET ústrižkami žiadny vplyv na hodnotu deformačného modulu. V prípade vystuženia popola možno pozorovať do stupňa vystuženia $n = 1,00$ % mierny nárast hodnôt deformačných modulov. Negatívny vplyv má efekt vystuženia PET ústrižkami v piesku od stupňa vystuženia $n = 1,00$ % (pokles hodnôt deformačných modulov vystužených pieskov na 65 % hodnôt modulov pieskov nevystužených) a v popole od stupňa vystuženia $n = 1,50$ % (pokles hodnôt deformačných modulov vystužených popolov na 60 % hodnôt modulov popolov nevystužených). Pokles oedometrického modulu deformácie E_{oed} [MPa] pri vyšších stupňoch vystuženia možno pripísať vysokému obsahu stlačiteľných PET ústrižkov, ktoré svojím objemom neumožňujú dostatočné zhutnenie násypu. Tieto výsledky naznačujú, že návrh geotechnických konštrukcií z takto vystužených materiálov je nevyhnuté optimalizovať nielen z hľadiska pevnostných parametrov, ale aj z hľadiska parametrov deformačných.

4.2 Efekt mikrovystuženia netradičných násypových materiálov netradičnými výstužnými prvkami – fyzikálne modelovanie

Vplyv mikrovystuženia netradičných násypových materiálov – piesku a popola netradičnými výstužnými prvkami – PET ústrižkami bol experimentálne overený nielen krabicovými šmykovými testami, ale aj experimentálnym fyzikálnym modelovaním na modelovom násypovom svahu. Modelový svah, v prvom kroku z nevystuženého a v druhom kroku z vystuženého piesku resp. popola (stupeň vystuženia $n = 0,25$ %), bol na korune zaťažovaný na obmedzenej ploche vertikálnym napätím až do jeho porušenia. Fyzikálny model násypového svahu z piesku a popola inštrumentovaný meracími LVDT snímačmi horizontálnej deformácie v 5-tich úrovniach, indikátorovými hodinkami pre snímanie vertikálnej deformácie zaťažovacej dosky a terčami v priereze svahu pripravený na experimentálne meranie je na obr. 9a,b.

Modelový svah z piesku resp. popola bol zaťažovaný stupňovite vertikálnym napätím až do jeho porušenia. Každý nasledujúci zaťažovací stupeň bol aplikovaný až po ustálení horizontálnych resp. vertikálnych deformácií zaznamenávaných snímačmi. Maximálne napätie spôsobujúce porušenie svahu σ_{max} [kPa] bolo stanovené zo zaťažovacieho stupňa, po aplikácii ktorého došlo ku výraznému nárastu deformácií spojeného s poklesom aplikovaného zaťaženia zaznamenávaného silomerom. Maximálne napätie spôsobujúce porušenie svahu bolo v prípade:

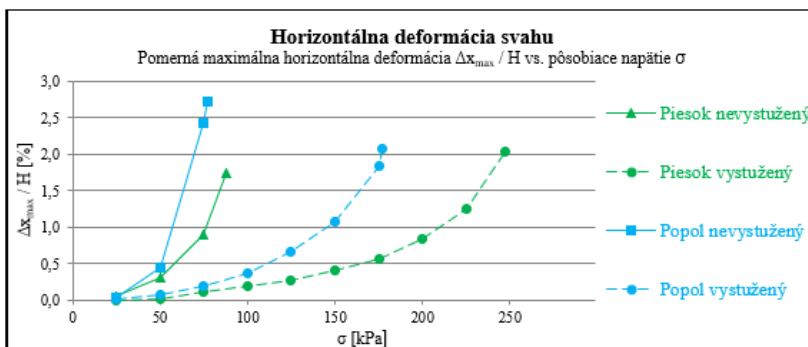
- | | |
|------------------------|------------------------------------|
| ▪ nevystuženého piesku | $\sigma_{\text{max}} = 87,8$ kPa; |
| ▪ vystuženého piesku | $\sigma_{\text{max}} = 247,0$ kPa; |
| ▪ nevystuženého popola | $\sigma_{\text{max}} = 77,3$ kPa; |
| ▪ vystuženého popola | $\sigma_{\text{max}} = 176,8$ kPa. |

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách



Obr. 9a,b

Maximálne Δx_{\max} horizontálne deformácie zaťažovaného modelového svahu boli sledované po jeho výške $H = 0,6$ m v jednotlivých výškových úrovniach $h = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ a $0,5$ m od jeho päty. Vplyv vystuženia svahu PET ústričkami bol analyzovaný komparáciou pomerných maximálnych horizontálnych deformácií $\Delta x_{\max}/H$ [%] vystuženého a nevystuženého svahu ku jeho pomernej výške h/H [-]. Porovnanie vývoja maximálnych pomerných horizontálnych deformácií modelového svahu pred jeho porušením $\Delta x_{\max}/H$ [%] na zmene pôsobiaceho vertikálneho napätia σ [kPa] dáva obr. 10.

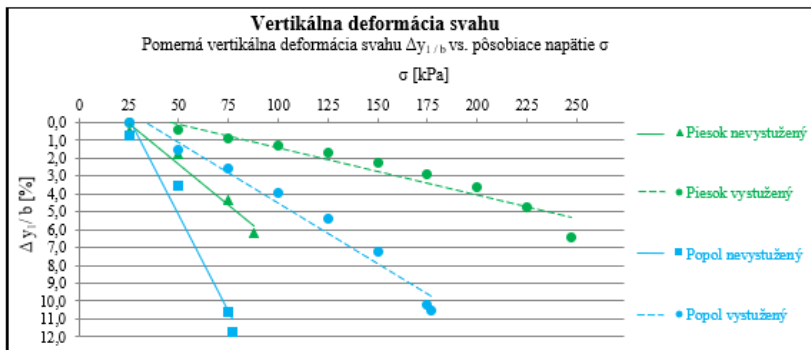


Obr. 10

Mikrovystuženie modelového svahu PET ústričkami má vplyv na redukciu horizontálnych deformácií svahu v dôsledku pôsobiaceho zaťaženia. Pozitívny vplyv mikrovystuženia pieskového resp. popolového svahu PET ústričkami je zrejmy z porovnania pomerných horizontálnych deformácií modelového svahu pred jeho porušením na obr. 10. Napriek skutočnosti väčších horizontálnych deformácií popolového nevystuženého svahu v porovnaní s nevystuženým pieskovým svahom sa vplyvom vystuženia horizontálne deformácie popolového svahu približujú horizontálnym deformáciám vystuženého pieskového svahu.

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

Vplyv vystuženia svahu PET ústričkami bol sledovaný aj prostredníctvom vyhodnotenia vertikálnych deformácií prednej hrany zaťažovacej, cez ktorú bolo na korunu svahu aplikované vertikálne zaťaženie. Pre nevystužený a vystužený svah z piesku resp. z popola je zmena pomernej vertikálnej deformácie v mieste prednej hrany zaťažovacej dosky $\Delta y_1/b$ vplyvom pôsobiaceho vertikálneho zaťaženia σ prezentovaná na obr. 11.



Obr. 11

Obdobný efekt mikrovystuženia svahu z piesku a popola PET ústričkami pozorovaný prostredníctvom horizontálnych deformácií svahu pri jeho zaťažení bol zaznamenaný aj z vyhodnotenia vertikálnych deformácií svahu pri jeho zaťažení. Vertikálne deformácie svahu pri pôsobení maximálneho vertikálneho zaťaženia jeho koruny σ_{max} prezentované cez pomernej vertikálnej deformácie svahu v mieste prednej hrany zaťažovacej dosky $\Delta y_1/b$ pod zaťažovacou doskou ilustruje obr. 11.

Maximálne hodnoty pomernej vertikálnej deformácie svahu v mieste prednej hrany zaťažovacej dosky $\Delta y_1/b$ pre vystužený svah z piesku resp. popola sú na úrovni maximálnych hodnôt nevystuženého svahu, avšak pri 2,8 násobne väčšom zaťažení koruny vystuženého pieskového svahu resp. 2,3 násobne väčšom zaťažení koruny vystuženého popolového svahu.

4.3 Efekt makrovystuženia netradičných násypových materiálov tradičnými výstužnými prvkami – fyzikálne modelovanie

Vplyv makrovystuženia netradičných násypových materiálov – piesku a popola tradičnými výstužnými prvkami – geosyntetickými geomrežami a georožou bol experimentálne overený experimentálnym fyzikálnym modelovaním na modelovej vystuženej pažiacej konštrukcii. Okrem piesku a popola bol vo fyzikálnom modeli pažiacej konštrukcie ako násypový materiál použitý aj tradičný násypový materiál – drvený štrk z dôvodu

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

komparácie vplyvu vystuženia netradičných násypových materiálov tradičnými výstužnými prvkami. Modelová pažiacia konštrukcia vo fyzikálnom modeli simulovaná oceľovou platňou, ku ktorej boli uchytené tradičné výstužné prvky, bola na povrchu násypu zaťažovaná na obmedzenej ploche vertikálnym napätím. Počas zaťažovania boli sledované horizontálne deformácie pažiackej konštrukcie v 5-tich úrovniach rovnomerne rozdelených po jej výške a vertikálne deformácie povrchu násypu pod zaťažovanou plochou. Fyzikálny model pažiackej konštrukcie inštrumentovaný meracími LVDT snímačmi horizontálnej deformácie v 5-tich úrovniach, indikátorovými hodinkami pre snímanie vertikálnej deformácie zaťažovacej dosky pripravený na experimentálne meranie je na obr. 12.

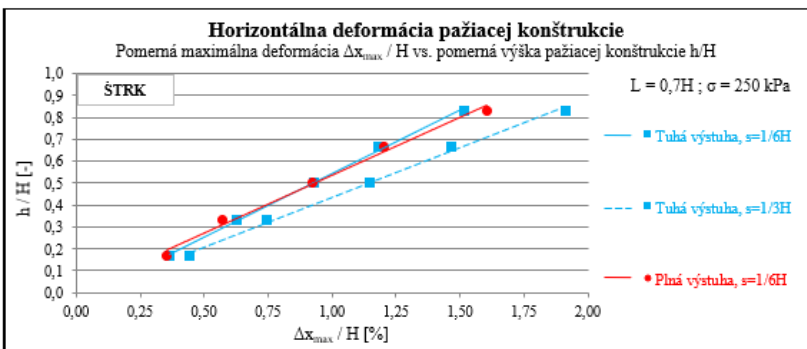
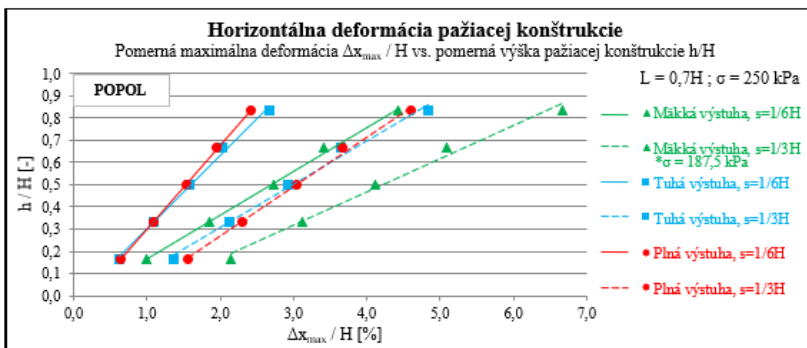
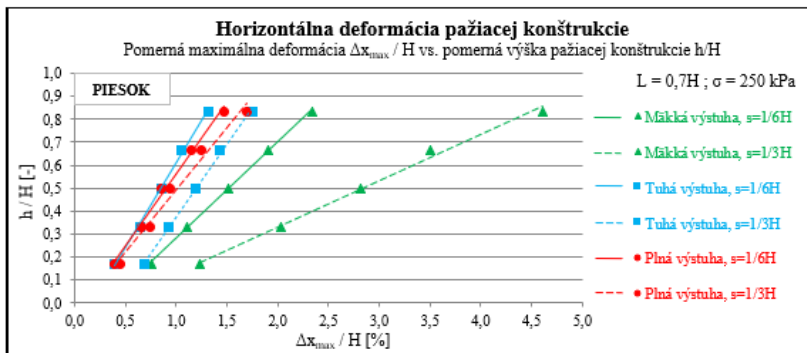


Obr. 12

Povrch násypu za modelovou pažiacou konštrukciou bol zaťažovaný stupňovite vertikálnym napätím až do maximálnej hodnoty $\sigma_{\max} = 250$ kPa okrem násypu z popola, kedy pri vertikálnej vzdialenosti výstuh $s = 1/3H$ došlo pri prekročení napätia $\sigma_{\max} = 187,5$ kPa ku havárii modelu. Každý nasledujúci zaťažovací stupeň bol aplikovaný až po ustálení horizontálnych, resp. vertikálnych deformácií zaznamenaných snímačmi. Zaťažením povrchu násypu za modelovou pažiacou konštrukciou vertikálnym napätím $\sigma = 0 - 250$ kPa bol sledovaný vplyv pomernej dĺžky výstuh $L/H = 0,7 - 1,0$, vzájomnej pomernej vertikálnej vzdialenosti výstuh $s/H = 1/3, 1/6$ na horizontálne deformácie pažiackej konštrukcie $\Delta x, \Delta x_{\max}$ resp. na vertikálne deformácie povrchu násypu za pažiacou konštrukciou $\Delta y_1, (\Delta y_1 - \Delta y_2) / b$.

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

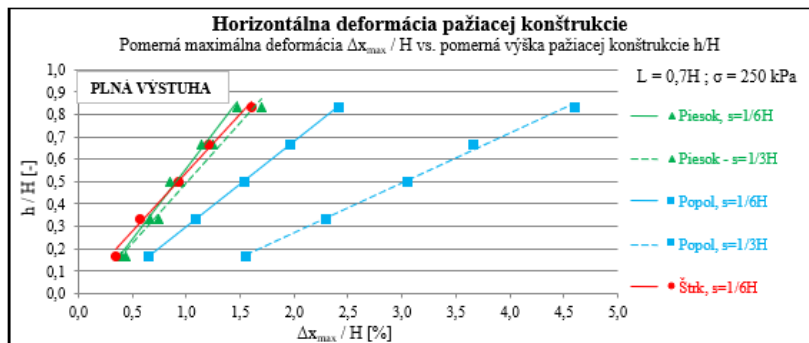
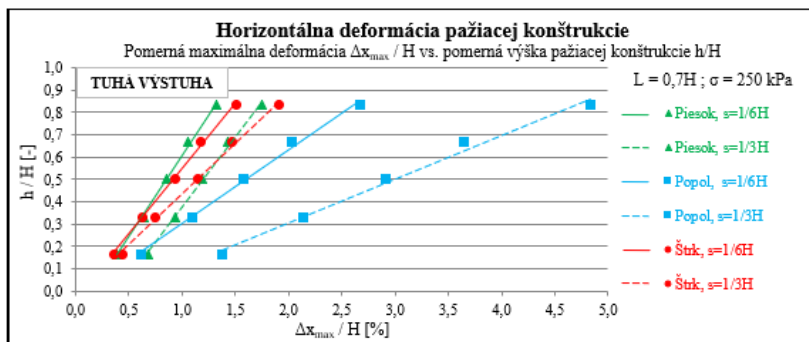
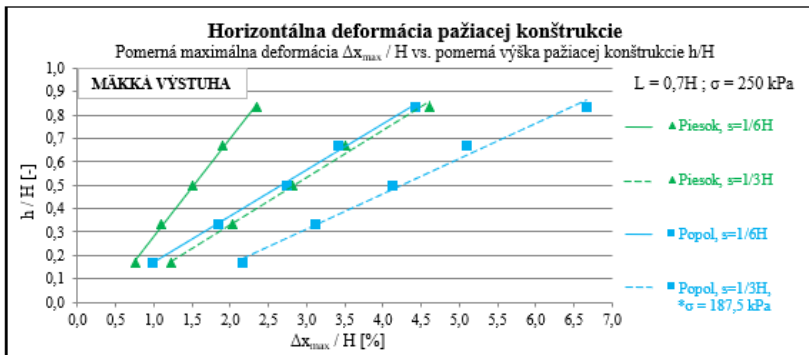
Vplyv typu výstuh (tuhej, mäkkej, plnej) a ich vertikálnej vzdialenosti ($s = 1/3 H$ a $1/6H$) na maximálne pomerné horizontálne deformácie pažiackej konštrukcie $\Delta x_{\max} / H$ zaťaženej maximálnym vertikálnym napätím σ_{\max} sú pre násyp z piesku, popola a zo štrku na obr. 13.



Obr. 13

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

Vplyv druhu násypového materiálu (piesku, popola, štrku) na maximálne pomerné horizontálne deformácie pažiackej konštrukcie $\Delta x_{\max} / H$ zaťaženej maximálnym vertikálnym napätím σ_{\max} pri vertikálnej vzdialenosti výstuh ($s = 1/3 H$ a $1/6 H$) sú pre použité mäkké, tuhé a plné výstuhy na obr. 14.



Obr. 14

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

Z vyhodnotenia zmien pomerných maximálnych horizontálnych deformácií $\Delta x_{\max}/H$ po výške pažiacej konštrukcie na obr. 13 a obr. 14 vyplynuli pre vertikálne vzdialenosti výstuh, násypové materiály a výstupy nasledovné skutočnosti:

1) Vertikálne vzdialenosti výstuh – 1/3H ; 1/6H

- Zmenšením vertikálnej vzdialenosti výstuh z 1/3H na 1/6H poklesli pomerné horizontálne deformácie pažiacej konštrukcie $\Delta x_{\max}/H$ u všetkých typov výstuh a násypových materiálov.
- Maximálny pokles $\Delta x_{\max}/H$ bol zaznamenaný pre mäkkú výstuhu v piesku – pokles $\Delta x_{\max}/H$ pri vertikálnej vzdialenosti 1/6H na 51 % $\Delta x_{\max}/H$ pri vertikálnej vzdialenosti 1/3H.
- Minimálny pokles $\Delta x_{\max}/H$ bol zaznamenaný pre plnú výstuhu v piesku – pokles $\Delta x_{\max}/H$ pri vertikálnej vzdialenosti 1/6H na 87 % $\Delta x_{\max}/H$ pri vertikálnej vzdialenosti 1/3H.
- Pri štandardnom násypovom materiáli štrku bol zaznamenaný pokles $\Delta x_{\max}/H$ pre tuhú výstuhu pri vertikálnej vzdialenosti 1/6H na 80 % $\Delta x_{\max}/H$ pri vertikálnej vzdialenosti 1/3 H.
- Pri porovnaní poklesu maximálnej pomernej horizontálnej deformácie $\Delta x_{\max}/H$ vplyvom zmeny vertikálnej vzdialenosti z 1/3H na 1/6H v štandardnom násypovom materiáli štrku vystuženom tuhou výstuhou je pokles maximálnej pomernej horizontálnej deformácie v piesku vystuženom tuhou výstuhou 1,10 násobne väčší a v popole vystuženom tuhou výstuhou 5,54 násobne väčší.

2) Násypové materiály – piesok ; popol ; štrk

- Z porovnania násypových materiálov vyplýva, že maximálne pomerné horizontálne deformácie pažiacej konštrukcie boli zaznamenané pri popole $\Delta x_{\max}/H = 6,67$ % (pri $\sigma = 187,5$ kPa) pri vertikálnej vzdialenosti mäkkých výstuh 1/3H a $\Delta x_{\max}/H = 4,43$ % pri vertikálnej vzdialenosti mäkkých výstuh 1/6H
- Minimálne pomerné horizontálne deformácie pažiacej konštrukcie boli zaznamenané pri piesku $\Delta x_{\max}/H = 1,32$ % pri vertikálnej vzdialenosti tuhých výstuh 1/6H a $\Delta x_{\max}/H = 1,75$ % pri vertikálnej vzdialenosti tuhých výstuh 1/3H.
- Pri štandardnom násypovom materiáli štrku boli zaznamenané pomerné horizontálne deformácie $\Delta x_{\max}/H = 1,52$ % pri vertikálnej vzdialenosti tuhých výstuh 1/6H a $\Delta x_{\max}/H = 1,91$ % pri vertikálnej vzdialenosti 1/3 H.

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

- Pri porovnaní maximálnej pomernej horizontálnej deformácie $\Delta x_{\max}/H$ v štandardnom násypovom materiáli štrku vystuženom tuhou výstuhou je maximálna pomerná horizontálna deformácia v piesku vystuženom tuhou výstuhou 0,87 násobne menšia pri vertikálnej vzdialenosti výstuh 1/3H a 0,92 násobne menšia pri vertikálnej vzdialenosti výstuh 1/6H a v popole vystuženom tuhou výstuhou 1,76 násobne väčšia pri vertikálnej vzdialenosti výstuh 1/3H a 2,53 násobne väčšia pri vertikálnej vzdialenosti výstuh 1/6H.

3) Výstupy – mäkká ; tuhá ; plná

- Minimálne hodnoty pomerných horizontálnych deformácií pažiacej konštrukcie boli v prípade násypového telesa z piesku a štrku zaznamenané pri použití tuhých výstuh
- Minimálne hodnoty pomerných horizontálnych deformácií pažiacej konštrukcie boli v prípade násypového telesa z popola zaznamenané pri použití plných výstuh
- V prípade násypového telesa z piesku vystuženého tuhými výstuhami korešpondujú s minimálnymi hodnotami pomerných horizontálnych deformácií pažiacej konštrukcie aj hodnoty pomerných horizontálnych deformácií pri použití plných výstuh.

Obdobným spôsobom sú v dizertačnej práci analyzované aj vertikálne deformácie pažiacej konštrukcie Δy_1 a nerovnomerné vertikálne deformácie pažiacej konštrukcie $(\Delta y_1 - \Delta y_2) / b$.

5. ZÁVER

Dizertačná práca bola zameraná na analýzu interakčných vzťahov tradičných resp. netradičných geosyntetických výstužných materiálov a netradičných násypových materiálov vo vystužených geotechnických konštrukciách. Pozornosť pri spracovaní práce bola zameraná na:

- vplyv mikrovystuženia neštandardných násypových materiálov – pieskov a popolov neštandardnými výstužnými prvkami – ústričkami z PET fliaš;
- vplyv makrovystuženia neštandardných násypových materiálov – pieskov a popolov štandardnými výstužnými prvkami – komerčne dostupnými geosyntetickými výstuhami.

Pre naplnenie uvedených zámerov boli realizované:

- laboratórne experimentálne merania zmeny šmykovej pevnosti neštandardných násypových materiálov – popolov a pieskov vplyvom vystuženia neštandardnými výstužnými prvkami – ústričkami z PET fliaš vo veľkorozmerovom šmykovom prístroji;
- experimentálne overovania vplyvu vystuženia neštandardných násypových materiálov – popolov a pieskov neštandardnými výstužnými prvkami – ústričkami z PET fliaš a štandardnými výstužnými komerčne dostupnými geosyntetickými výstužnými prvkami vo fyzikálnom modeli násypového svahu resp. pažiacej konštrukcie.

5.1 Prínosy dizertačnej práce

- Preukázanie vplyvu mikrovystuženia PET odpadmi na šmykovú pevnosť a stlačiteľnosť netradičných násypových materiálov (pieskov a popolov);
- Overenie účinnosti makrovystuženia tradičnými výstužnými geosyntetickými materiálmi v tradičnom násypovom materiáli (drvenom štrku) a netradičných násypových materiálov (pieskov a popolov);
- Overenie efektívnej dĺžky makrovystuženia tradičnými výstužnými geosyntetickými materiálmi v netradičnom násypovom materiáli (piesku);
- Odporúčenie typovej vhodnosti tradičných výstužných geosyntetických materiálov v tradičnom násypovom materiáli (drvenom štrku) a netradičných násypových materiálov (piesku a popole);
- Význam prínosom v koncepte trvalo udržateľného rozvoja je poukázanie na možnosť využitia odpadov ako násypových materiálov (banských pieskov a popolov) resp. ako výstužných materiálov (PET odpadov) v geotechnických konštrukciách.

5.2 Ďalšie smerovanie výskumu

- Laboratórne experimentálne merania, testy vo veľkorozmerovom krabicovom šmykovom prístroji, naznačili možnosť overovania vplyvu najmä mikrovystuženia nielen štandardných, ale aj neštandardných násypových materiálov neštandardnými výstužnými prvkami v geotechnických konštrukciách. Testami boli overené vplyvy mikrovystuženia neštandardných násypových materiálov – pieskov a popolov neštandardnými výstužnými prvkami – ústrižkami z PET fliaš. Fyzikálne experimentálne modelovanie overilo možnosť testovania vplyvov nielen mikrovystuženia, ale aj makrovystuženia neštandardných násypových materiálov neštandardnými a štandardnými výstužnými prvkami. Ďalšie výskumné laboratórne experimentálne testovania resp. fyzikálne modelovania tohto druhu by mohli byť zamerané na overovanie vplyvov mikro a makro vystuženia ďalších možných kombinácií tradične a netradične používaných násypových materiálov – zemín, antropogénnych materiálov tradičnými a netradičnými výstužnými prvkami – komerčnými geovýstuhami, ústrižkami z odpadových materiálov (textilu, iných druhov PET odpadov a pod.) resp. z prírodných vlákien.
- Výsledky fyzikálneho modelovania vystuženej geotechnickej konštrukcie (vystuženého násypového svahu, vystuženej pažiacej konštrukcie a pod.) by bolo vhodné podrobiť numerickej analýze pre kalibráciu numerického modelu. Kalibrovaný numerický model fyzikálneho modelu geotechnickej konštrukcie by bolo následne možné extrapolovať do numerickej analýzy reálnej geotechnickej konštrukcie.

6. ABSTRACT

In the context of the current environmental and economic situation, it is crucial to emphasize the concept of sustainable development, which should be an integral part of every new engineering design. This concept should guide us not only towards thoughtful and responsible production but also towards the use of material resources. Exploring the possibility of utilizing wastes as non-standard fill materials or non-standard reinforcement materials in reinforced earth structures through experimental verification is thus the main idea of this work. Non-standard fill materials were characterized by wastes from energy production and mining activities (ash and sand), and non-standard reinforcement materials were characterized by PET waste for experimental verification. Laboratory experimental measurements tested the effects of micro-reinforcement of non-standard fill materials – sands and ashes with non-standard reinforcement elements – PET bottle cuttings on their strength and deformation properties. The laboratory experimental results of micro-reinforcement of sands and ashes with PET cuttings confirmed an increase in shear strength of these non-standard fill materials. The effect of micro-reinforcement of sand and ash with PET bottle cuttings was also verified by a physical model of a slope made of sand or ash progressively loaded until failure. Micro-reinforcement of the slope from sand or ash led to a significant increase in the stress causing failure of the model slope and to the reduction of horizontal and vertical deformations of the slope due to the applied load. Physical experimental modeling of the retaining structure verified the possibility of macro-reinforcement of non-traditional fill materials – sand and ash with commercially available geosynthetic elements – soft and rigid geogrids and full geotextiles. For comparison, the influence of reinforcing sand and ash with traditional geosynthetic reinforcement elements, gravel was used as a traditional fill material behind the retaining structure in the physical model. Tests of the physical model of the retaining structure with fill from sand, ash, and gravel reinforced with traditional reinforcement elements confirmed the influence of the length, vertical distance, and material composition of the geosynthetic elements on the horizontal deformations of the retaining structure and vertical deformations of the reinforced fill behind the retaining structure due to the loading of its surface.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- ARCADIS – GEOTECHNIKA. 2011.** *Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílku a popelů. Technické podmínky.* Praha: Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, 2011. 32 s.
- BABU, G., L., S. – CHOUKSEY, S., K. 2011.** Stress-strain response of plastic waste mixed soil. In: *Waste Management*, 2011, č. 31, s. 481 – 488.
- BENSON, C., H. – KHIRE, M., U. 1994.** Reinforcing Sand with Strips of Reclaimed High-Density Polyethylene. In: *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, č. 121, s. 838 – 855.
- BUENO, B., S. 1997.** The Mechanical Response of Reinforced Soils Using Short Randomly Distributed Plastic Strips. Rotterdam: *Proceedings of Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*, 1997, s. 401 – 407.
- DRUSA, M., VLČEK, J., HOLÍČKOVÁ, M., KAIS, L.:** Analytical and Numerical Evaluation of Limit States of MSE Wall Structure. Civil and Environmental Engineering, Vol. 12, Iss. 2, 2016.
- DUTTA, R. K. – VENKATAPPA RAO, G. 2004.** Engineering Properties of Sand Reinforced with Strips from Waste Plastic. Sharjah (UAE): *Proceedings of International Conference on Geotechnical Engineering*, 2004, s. 186 – 193.
- DUTTA, R. K. – VENKATAPPA RAO, G. 2007.** Regression Models for Predicting the Behavior of Sand Reinforced with Waste Plastic. In: *Turkish Journal of Engineering Env. Sci.*, 2007, č. 31, s. 119 – 126.
- Ferreira, F.B., Vieira, C.S., Lopes, M.L. 2020** Pullout behavior of different geosynthetics – influence of soil density and moisture content, *Frontiers in Built Environment* 2020, doi: 10.3389/fbuil.2020.00012
- HULLA, J. – TURČEK, P. 2004.** *Zakladanie stavieb.* Bratislava: Jaga Group, 2004. 350 s. ISBN 80-8890-599-0.
- CHUNG, W. – CASCANTE, G. 2007.** Experimental and numerical study of soil-reinforcement effects on the low-strain stiffness and bearing capacity of shallow foundations. In: *Geotechnical and Geological Engineering*, 2007, roč. 25, s. 265 – 281. ISSN 0960-3182.
- JADHAO, P., D. – NAGARNAIK, P., B. 2008.** Influence of polypropylene fibres on engineering behavior of soil-fly ash mixtures for road construction. In: *Electron Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, č. 13, s. 1 – 11.
- Jiang, H., Cai, Y., Liu, J. 2010** Engineering Properties of Soils Reinforced by Short Discrete Polypropylene Fiber. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING ASCE / 12/2010 / p. 1315-1322*, DOI: 10.1061/ASCEMT.1943-5533.0000129
- KANIRAJ, S., R. – GAYATHRI, V. 2003.** Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fibre inclusion. In: *Geotextiles and Geomembranes*, 2003, č. 21, s. 123 – 149.
- Khan B., J. Ahmad M., Sabri M., Ahmad I., Zaim B., Niekurzak M. 2022** Experimental and Numerical Evaluation of Mechanically Stabilized Earth Wall with Deformed Steel Bars Embedded in Tire Shred-Sand Mixture, *Buildings* 2022, 12, 548.
- KRLIČKOVÁ, E. 1998.** Možnosti využitia teplárenských popolčiekov v cestnom stavitelstve. In: *Acta Montanistica Slovaca*, 1998, roč. 3, č. 3, s. 314 – 317. ISSN 1339-3103.

- KUMAR, A., B. – WALIA, S. – MOHAN, J. 2006.** Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay. In: *Construction and Building Materials*, 2006, roč. 20, č. 10, s. 1063 – 1068. ISSN 0950-0618.
- KUMAR, P. et al. 2005.** Effect of randomly distributed fibres on fly ash embankments. In: *Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division*, 2005, č. 86, s. 113 – 118.
- Lal, B.R.R., Mandal, J.N. 2013** Effect of Reinforcement Coverage Ratio on Cellular Reinforced Fly Ash Walls, Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III, American Society of Civil Engineers, p. 72-81
- LIAUSU, P. – JURAN, I. 1995.** Texsol: Material Properties and Engineering Performance. In: *Transportation Research Record*, 1995, s. 3 – 12.
- LIU, C.N., HO, Y.H., HUANG, J.W.:** Large scale direct shear tests of soil/pet-yarn geogrid interfaces. *Geo-text. Geomembr.*, 27 (1), 19 – 30, 2009
- MEZENECVOVÁ, A. 2003.** Možnosti zužitkovania energetických popolčiekov. In: *Acta Montanistica Slovaca*, 2003, roč. 8, č. 2-3, s. 146 – 151. ISSN 1339-3103.
- MICHALOWSKI, R., L. – ČERMÁK, J. 2003.** Triaxial Compression of sand reinforced with fibres. In: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, roč. 12i, č. 2, s. 125 – 136.
- MILLIGAN, G., W. E. et al. 1989.** A new approach to the design of unpaved rous. Part 1. In: *Ground Engineering*, 1989, roč. 22, č. 3, s. 25 – 29.
- MIRZABABEL, M. et al. 2017.** Shear strength of a fibre-reinforced clay at large shear displacement when subject to different stress histories. In: *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, č. 45, s. 422 – 429.
- MÍČA, L. 2011.** Vyztužování podloží geosyntetiky. In: *Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. Edice Habilitační a inaugurační spisy*, 2011, č. 403. 33 s. ISSN1213-418X.
- MÍČA, L. 2007.** Zemní konstrukce, VUT Brno, 2007, 175 s.
- MOHIUDDIN, A. (2003).** Analysis of Laboratory and Field Pull-Out Tests of Geosynthetics in Clayey Soils (master's thesis). Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, United States.
- MUNTOHAR, A., S. 2009.** Influence of Plastic Waste Fibers on the Strength of Lime-Rice Husk Ash Stabilized Clay Soil. In: *Civil Engineering Dimension*, 2009, roč. 11, č. 1, s. 32 – 40. ISSN 1410-9530.
- Nadaf, M. B., Mandal, J.N. 2017** Behavior of Reinforced Fly Ash Slopes with Cellular Mattress and Strips under Strip Loading, *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste* Volume 21, Issue 4, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000376](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000376)
- PASHAZADEH, A. – GHAZAVI, M. – CHEKANIAZAR, M. 2011.** Experimental study of the effect of polyethylene fibres with random distribution on the engineering behavior of the mixture of flimsy sand with clay soils. In: *Journal of American Science*, 2011, roč. 7, č. 6, s. 1184 – 1188. ISSN 1545-1003.
- PERKINS, S. W. 2007.** The material properties of geosynthetics. IN SARSBY, R. W. (ed.). 2007. *Geosynthetics in Civil Engineering*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2007, s. 19 – 35. ISBN 978-1-85573-607-8.

Využitie netradičných násypových a výstužných materiálov vo vystužených zemných konštrukciách

SARAN, S. 2017. *Reinforced Soil and its Engineering Applications*. 3. vydanie. New Delhi: I.K. International Publishing House, 2017. 440 s. ISBN 978-9-380590-972-6.

SHUKLA, S. K. 2016. *An Introduction to geosynthetic engineering*. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. 449 s. ISBN 978-1-4987-7809-1.

ŠŤAHNÍČAN, J. 2011. Geosyntetické výrobky a ich použitie. In: *Inžinierske stavby*, 2011, č. 4, s. 30 – 31.

SOKOL, P. 2012. *Vedlejší energetické produkty a jejich využití*. Interní materiál – přednáška. Praha: ASVEP, 2012.

STACHO, J. et al. 2020 Determining the Shear Strength Properties of a Soil-geogrid Interface Using a Large-scale Direct Shear Test Apparatus, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(4), pp. 989–998, 2020, <https://doi.org/10.3311/PPci.15766>

SÚLOVSKÁ, Monika - STACHO, Jakub - SLÁVIK, Ivan. Meranie šmykovej pevnosti zeminy vystuženej tuhou geomrežou. In *Buildustry* [elektronický zdroj]. Roč. 3, č. 1 (2019), CD-ROM, s. 18-21. ISSN 2454-0382

VANÍČEK, I. 2011. *Sustainable Construction*. Praha: ČVUT, 2011. 163 s. ISBN 978-0-10148-73-3.

Vieira, C. S., Pereira, P. M., Ferreira, F, Lopes, M. L. (2020). Pullout Behavior of Geogrids Embedded in a Recycled Construction and Demolition Material.

Effects of Specimen Size and Displacement Rate. *Sustainability* 2020, 12, 3825; doi:10.3390/su12093825

Xiangqi Hu, Mingliang Chen, Bo Hu, Guangzhen Du and Kaihui Li 2023. Experimental Study on the Mechanical Behavior of Sandy Soil Reinforced by Disposable Face Mask Chips under Different Stress Paths, *Sustainability* 2023, 15, 4059. <https://doi.org/10.3390/su15054059>

Zlatinská, L. 2015 USE OF TAILINGS ASHES IN ROAD EMBANKMENT STRUCTURES, *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, Vol. No.4, Special Issue No. (02), 2015, ISSN 2319-8354, 31 -39 p.

ZORNBERG, J., G. 2002. Discrete Framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. In: *Geotechnique*, 2002, č. 52, s. 593 – 604.

PUBLIKÁCIE AUTORA

KOLEŇÁK, Matúš; SLÁVIK, Ivan. Numerická analýza deformácií opornej konštrukcie vystuženej geosyntetikou. In: DRUSA, Marián; GAGO, Filip; VLČEK, Jozef. *Geosyntetika 2023*. Žilina: Vydavateľstvo EDIS, 2023, s. 29–40. ISBN 978-80-554-1951-0.

KOLEŇÁK, Matúš; SLÁVIK, Ivan. Retaining wall - parametric study of the method of reinforcement. *Civil and environmental engineering*, 19. s. 380–390.

SÚLOVSKÁ, Monika; STACHO, Jakub; KOLEŇÁK, Matúš. The fundamental geotechnical characteristics of recycled concrete aggregates of various fraction. (v recenznom konaní *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 11.)