

MODELNA PREISKAVA ARMIRANE ZEMLJINE MODEL TEST OF A REINFORCED SOIL STRUCTURE

BRANKO PROKOP, dipl.ing.gradb., ZRMK-Inštitut za geotehniko in ceste
DARINKA BATTELINO, Dr.Sc.Prof., UNIVERZA v Trstu, ZRMK-Inštitut za geotehniko in ceste

POVZETEK: Obnašanje podporne konstrukcije iz armirane zemljine je bilo preiskovano na modelu, izdelanem v naravnem merilu, obremenjenem s statično in dinamično (železniška prometna obtežba) obremenitvijo. Gramozni zasip je bil armiran s poliestrskimi trakovi pričvrščenimi na lesene obložne plošče. V članku so opisani načini meritev ter rezultati meritev pritiskov na obložne plošče, horizontalnih pomikov obložnih plošč in sil v armiranih trakovih modela. Karakteristični merjeni rezultati so primerjani z rezultati računske analize po metodi končnih elementov. Računalniški program AX (Rojc, 1992) upošteva elastoplastičen materialni model z Drucker-Pragerjevim kriterijem popuščanja pri velikih deformacijah. Zemljina je simulirana s pravokotnimi elementi, armirni trakovi pa s kompatibilnimi linijskimi elementi.

SUMMARY: The behaviour of a reinforced-soil retaining wall, when subjected to static and dynamic (railway - line) loadings, has been investigated experimentally on a full-scale model. The gravel fill was reinforced by means of polyester strips, which were fixed to the exterior timber panels of the model. The latter was fully instrumented in order to monitor behaviour during construction and loading. The instrumentation program and installation details are presented, together with the measured stresses and strains in the panels and the reinforcement. The most significant results of the tests (for static loading) were compared with values calculated using the Finite Element Method (AX - Rojc, 1992), assuming the Drucker-Prager yield criterion. In the calculations the soil was simulated by rectangular elements, and the reinforcement by compatible linear elements.

UVOD

Od "iznajdbe" armirane zemljine (Vidal, 1966), v zgodnjih šestdesetih letih, je bilo do danes izvedenih veliko modelnih preiskav in merenj na podpornih konstrukcijah iz armirane zemljine obremenjenih s statično obtežbo. Rezultati vseh teh meritev so pokazali, da je obnašanje konstrukciji zelo odvisno od dolžine in gostote armatur, spreminjanja dolžine armature po višini konstrukcije, od vrste in zgoščenosti zasipne zemljine ter seveda tehnologije gradnje. Z izredno hitrim razvojem industrije geotekstilov pa se je v zadnjih letih zelo spremenil način gradnje in razširila uporaba armirane zemljine. Ves ta razvoj je nujno zahteval nove preiskave in nove metode dimenzioniranja konstrukcij iz armirane zemljine. Konvencionalne izračune, (FR. norme, 1979), (UK. norme, 1987), (Battelino, 1981) nadomeščajo postopki z uporabo končnih elementov.

V članku je opisana in analizirana modelna preiskava podporne konstrukcije iz armirane zemljine. Model, izdelan v naravnem merilu, je bil obremenjevan s statično in dinamično obremenitvijo. Dinamična obremenitev modela (železniška prometna obtežba) je bila simulirana s sinusno funkcijo frekvence $4,44 \text{ sek}^{-1}$ preko računalniško krmiljenih hidravličnih batov.

Rezultati meritev napetosti in deformacij so na nekaj karakterističnih merskih točkah (za statično obremenitev) primerjani tudi z rezultati izračunanimi po metodi končnih elementov s programom AX (Rojc, 1992).

Zemljina, je obravnavana kot idealno elastoplastičen material (Drucker-Pragerjev model lezenja, velike deformacije), je simulirana z 8 vozličnimi izoparametričnimi elementi, armatura je upoštevana kot idealno elastičen material in simulirana s kompatibilnimi linijskimi elementi.

MODELNA PREISKAVA

MODEL

Model podporne konstrukcije iz armirane zemljine, merilo 1:1, je bil izdelan iz lesenih obložnih plošč, armiranih trakov iz poliestrskega laminata ter nekoherentne zasipne zemljine (Slika 1).

Namen modelne preiskave je bil analizirati obnašanje podporne konstrukcije ter določiti napetosti v armiranih trakovih pri statični in dinamični obremenitvi.



Slika 1. Pogled na podporno konstrukcijo iz armirane zemljine med gradnjo modela.

Odziv modela pri dinamičnem obremenjevanju je bil merjen zaradi možnosti uporabe armirane zemljine za železniške nasipe ter določiti vplivno območje takšne obremenitve in razporeditve napetosti v armiranih trakovih. Na sliki 2 se vidijo železniški pragovi, tirnici in greda za prenos statične in dinamične obremenitve na model.

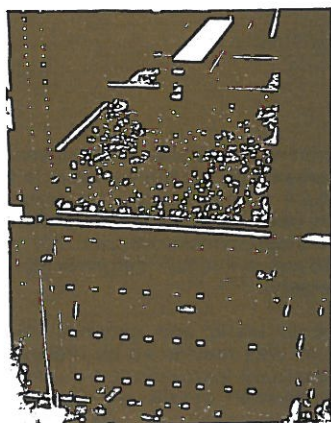
Oblika in dimenzije analiziranega modela so prikazane na sliki 3. Vidi se, da je bila armirana zemljina izdelana do višine 2,0 m.

Obložne plošče so, pri vseh do sedaj zgrajenih objektih iz armirane zemljine v Sloveniji, iz armiranega betona.

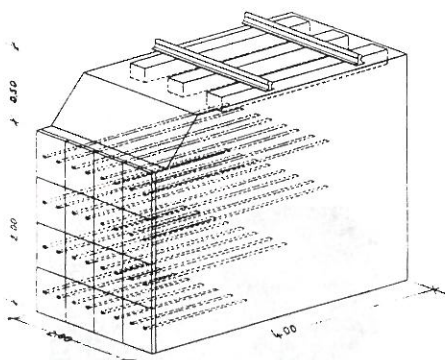
Za izdelavo modela so bile uporabljene plošče iz večplastnega lepljenega lesa tako, da je njihova upogibna trdnost in s tem deformabilnost primerljiva z obnašanjem armirano betonskih plošč.

Širina modela je 2,0 m (slika 1, 2, 3). Bočni strani modela sta bili obloženi s togimi ploščami, vpetimi v jeklene nosilce (preprečene horizontalne deformacije v bočno

smer) ter na notranji strani obloženi z debelo, nepropustno plastično folijo (slika 8), kar je omogočalo relativno neovirane pomike v vertikalni smeri. Zadnja stena modela je bila izvedena enako kakor bočni.



Slika 2. Podporna konstrukcija z železniškimi pragovi ter tirnicama.



Slika 3. Shema modela.

Obložne plošče so bile v zaledje sidrane z armirnimi trakovi. Lega in dolžina armirnih trakov je prikazana na slikah 1 in 3. Vrsta armirnih trakov, razmak med njimi ter način pričvrstitve je bil enak kot pri vseh do sedaj zgrajenimi konstrukcijami v Sloveniji (Battelino, 1990).

Razlika med izvedbo prave konstrukcije in modela je bila le v tem, da so bile pri gradnji modela obložne plošče, med komprimacijo posameznega sloja zemljine, podprte. Za zasipni material se je uporabil savski prod. Način vgrajevanja oziroma izdelave modela je bil popolnoma identičen kot je gradnja podporne konstrukcije iz armirane zemljine na terenu. Vsaka plast zasipne zemljine je bila skrbno komprimirana. Po komprimaciji vsake posamezne plasti je bila izvedena kontrola kvalitete vgrajevanja. Ko je bila konstrukcija iz armirane zemljine zgrajena do višine 2,0 m, je bil izdelan 0,5 m visok nasip iz lomljenca. Na nasip so bili položeni trije železniški pragovi in tirnici (slika 2). Izvedba in pričvrstitev proge je bila izdelana po predpisih in navodilih za gradnjo železnic.

Model je bil postavljen neposredno na betonska tla laboratorija kar pomeni, na popolno nepodajno podlago.

Podatki o zasipni zemljini

Zasipni material je savski prod. Rezultati laboratorijskih preiskav za zasipno zemljino (Petkovšek, 1990), katere je bilo možno izvesti, so prikazani v preglednici 1 ter na sliki 4.

Preiskave materialov in kakovost vgradnje materialov v model armirane zemljine, so bile zasnovane tako, da so določeni vsi glavni parametri.

Preglednica 1. Rezultati laboratorijskih preiskav.

PARAMETER	VREDNOST
1. mineraloško petrografska sestava	zrna so pretežno iz svetlosivega apnenca, trdna, gosta, brez razpok, dobro zaobljena slabih zrn in grud gline v agregatu ni
2. naravna vlažnost w_0	2,0 - 2,5 %
3. zrnavost	GW
4. humoznost	ne vsebuje škodljivih humusnih snovi
5. SSP I. SNV kalup, $v = 9817 \text{ cm}^3$	
w_{opt}	4,90 % $w_{kor} = 3,96 \%$
ρ_{max}	2,336 t/m^3
	$\rho_{kor} = 2,356 \text{ t/m}^3$
SSP I. SNV kalup, $v = 2291 \text{ cm}^3$	
w_{opt}	5,76 % $w_{kor} = 3,99 \%$
ρ_{max}	2,284 t/m^3
	$\rho_{kor} = 2,333 \text{ t/m}^3$

Karakteristike vgrajenega materiala

Nekaj rezultatov preiskav na modelu je prikazanih v preglednici 2, kjer so podane trdnostne karakteristike, ter v preglednici 3, kjer so podane deformacijske karakteristike vgrajenega materiala. Za določitev elastičnega modula zemljine je bila izvedena preiskava s presiometrom (slika 4).

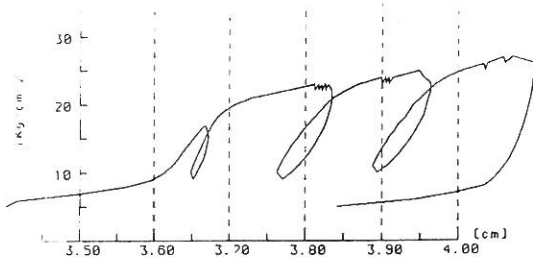
Preglednica 2. Rezultati meritev na modelu.

PARAMETER	VREDNOST
1 suh teža: γ_s	γ_s
relat.zbitost: γ_s/γ_{max}	γ_s/γ_{max}
1. plast	21,9 93
2. plast	23,2 98
3. plast	22,6 97
4. plast	23,3 99
5. plast	22,4 96
6. plast	22,7 97
7. plast	22,7 97
8. plast	23,1 99
2 CBR_1	%
globina	
-1,0 m	49,5; 57,3; 60,0 (slika. 26)
-2,0 m	49,5; 53,3; 60,0
3 relativna gostota (dinam.penetr.pr.)	strižni kot
globina (m):	
-0,10	7 (rahlo)
-0,20	18(sr.gosto) = > $\varphi = 33^\circ-36^\circ$
-0,30	20(sr.gosto) = > $\varphi = 33^\circ-36^\circ$
-0,40	37(gosto) = > $\varphi = 36^\circ-40^\circ$
-0,50	41(gosto) = > $\varphi = 36^\circ-40^\circ$
-0,60	61(zelo gosto) = > ... $\varphi > 40^\circ$
-0,70	60(zelo gosto) = > ... $\varphi > 40^\circ$

Preglednica 3. Rezultati meritev na modelu.

PARAMETER	VREDNOST		
1 modul stitljivosti M_s za ($p = 0,15-0,25$ MPa) plast -1,0 m 132,1; -2,0 m 157,9;			
	MPa		
		103,4	134,5
2 deformac.moduli E_{v1}, E_{v2} plast -1,0 m 80,3 241,9 -2,0 m (slika 28) 97,5 288,5 (MPa) -2,0 m 107,8 321,4	E_{v1}	E_{v2}	
3 modul reakcije tal K_s^* plast -1,0 m 188 -2,0 m 226	MN/m ³		
4 modul elastičnosti -presiometer (sl. 27)	MPa		
	$E = 126,00$		
5 hitrost logitudinalnih valov v_p	625 m/sec		

* Merjeno s ploščo 300 mm, redukcija za standardno ploščo 762 mm: $Ks1/Ks2 = d2/d1$.



Slika 4. Preizkus s presiometrom ($h = 1,5$ m).

Določiti je možno še: začetni tangetni modul (E_{it}), sekantni modul (E_{sec}), in tangentni modul (E_t) oziroma s pomočjo znanih izrazov (Attewell, 1976) je možno iz hitrosti valovanja izračunati še: strižni modul (G), Youngov modul (E) in kompresijski modul (K). Vendar bi bilo potrebno za določitev teh parametrov ponoviti geofizikalne meritve na večjem modelu, ker so bile, na obravnavanem modelu obložne plošče, stranski in zadnji stena preblizu in rezultati meritev niso dovolj natančni.

Armirni trakovi

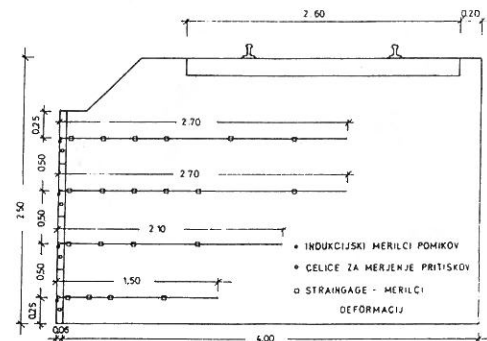
Z natezno preiskavo armirnega traku, uporabljenega v modelni preiskavi, je bil določen odnos med natezno silo in specifično deformacijo.

Meritve

Program opazovanja modela je bil naslednji:

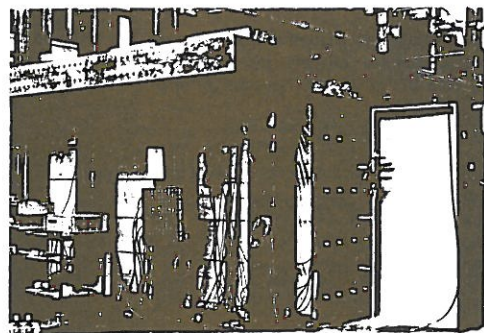
- horizontalni pomiki obložnih plošč konstrukcije;
 - pritiski na obložne plošče oziroma interakcija obložnih plošč in armirane zemljine;
 - napetosti v armirnih trakovih.
- Odziv konstrukcije na obremenitev je bil spremljan oziroma merjen z elektronskimi merilci, katerih lega in raspored je prikazan na sliki 5:
- horizontalni premiki modela so bili merjeni z indukcijskimi merilci pomikov ter geodetsko s teodolitom (slika 6);
 - pritiski na obložne plošče so bili spremljani s posebnimi, na inštitutu izdelanimi merskimi celicami (sliki 1 in 5);

napetosti-deformacije v trakovih so bile merjene s strainageji (sliki 5, 8).

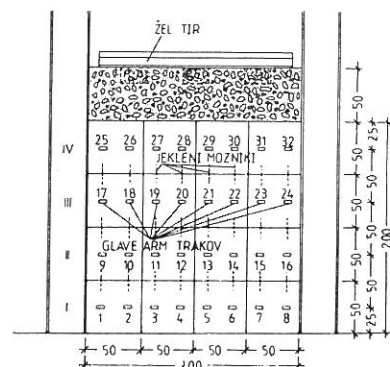


Slika 5. Shema lege merskih enot.

Lega in dolžina armirnih trakov je prikazana na sliki 3 in 5. Vidimo, da je bilo v model vgrajenih 32 armirnih trakov in sicer po 8 trakov v eni horizontali.



Slika 6. Pogled na indukcijske merilce pomikov ter registracijo elektronskih meritev.



Slika 7. Skica oznak armirnih trakov.

Na sliki 7 so podane oznake posameznih trakov. Skupno je bilo na trakove pričvrščenih 50 merskih lističev. Merski lističi so bili razporejeni tako, da je bil en merski listič pritrjen ob glavi traku, zgoščeno so bili postavljeni v območju med, teoretično določeno, Rankinovo porušnico in obložni ploščami, po en merski listič pa je bil v bližini konca armirnega traku.

Na sliki 8 je pogled na merske lističe prilepljene na trakovih 10, 12, 13 in 15.



Slika 8. Pogled na pričvrščene merske lističe.

Obremenitev

Obtežba je bila razdeljena v dve fazi:

- statična obremenitev,
- dinamična obremenitev.

Statična obremenitev

Vertikalna statična obremenitev

Za prenos vertikalnih obremenitev je bila na tiri položena jeklena gred, preko katere se je podporna konstrukcija obremenjevala s hidravličnimi stiskalnicami do 2000 kN.

Horizontalna statična obremenitev

Horizontalna obremenitev na tiri je sestavljena iz dveh komponent:

- bočni sunek zaradi neregularnosti tira je: $B = 100 \text{ kN}$, prijemališče koncentrirane sile B je v višini gornjega roba tirnice (GRT),
- v krivini nastopi sila $C = 150 \text{ kN}$, s prijemališčem 1,8 m nad GRT.

Dinamična obremenitev

Dinamična - železniška obremenitev P_{din} je bila določena po predpisih za hitrost vlaka 80 km/h (frekvenca $f = 4,44 \text{ Hz}$) od 200 kN do 500 kN.

Potek preiskave

Potek preiskave lahko razdelimo v tri faze: (a) gradnjo modela, (b) obremenjevanje modela s statično in dinamično obremenitvijo ter (c) obremenjevanje modela s statično in dinamično obremenitvijo po odstranitvi obložnih plošč.

(a) Gradnja modela je potekala po plasteh višine 0,25 m, obložne plošče so bile med komprimacijo posamezne plasti podprte, pri komprimaciji naslednje plasti, se je spodnjo podporo sprostilo. Merjeni so bili pritiski na obložne plošče, sile v armirnih trakovih in po odstranitvi podpor tudi pomiki - vse pred in po komprimaciji. Te meritve so, po vsaki gradbeni fazi, trajale 4 ure.

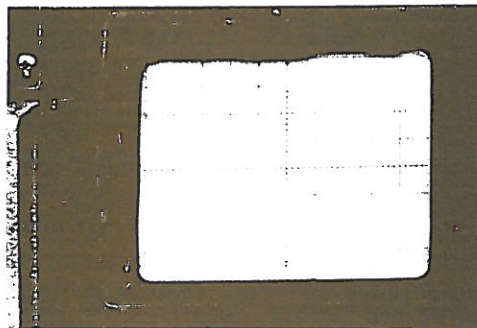
(b) Model je bil po stopnjah obremenjen do 1000 kN, razbremenjen in ponovno obremenjen. Po vsaki stopnji so bili merjeni pomiki sile v trakovih in pritiski na obložne plošče. Te meritve so trajale dve uri pri nekaterih bremenskih stopnjah pa 24 ur. Z dinamično obremenitvijo je bil model obremenjen tri dni.

Meritve na trakovih je bilo, med samo preiskavo, možno spremljati tudi "vizuelno" z osciloskopom, kar je bilo zaradi izredno majhnih sprememb napetosti v trakovih zelo pomembno. Na sliki 9 je prikazan ekran osciloskopa med dinamičnim obremenjevanjem. Zgornja krivulja ponazarja simulirano dinamično obremenitev, spodnja pa 100 kratno povečan odziv v merskem lističu na traku 29, v

predzadnjem strainageu na srednjem zgornjem armirnem traku.

Meritve na armirnih trakovih so, med dinamično obremenitvijo, pokazale pričakovano majhno globino vpliva te obremenitve. Vpliv dinamične obremenitve vlaka je bil zaznaven samo v zgornjih dveh vrstah armirnih trakov, tj. do 1,25 m pod tirnicama.

(c) Na sliki 10, kjer je prikazan model po odstranitvi plošč, je zelo lepo vidno, da se je "podsulo" samo prvih 10 do 15 cm gramoza, to je zemljine, ki je bila v območju tlačnega dela trakov. Ostali del modela je ostal popolnoma stabilen.



Slika 9. Monitor osciloskopa.



Slika 10. Pogled na model po končani dinamični in statični obremenitvi.

Po obremenitvi modela brez plošč s silo 2000 kN so se, v gramozu, pokazale prve vertikalne razpoke med trakovi in tudi deformacije v zgornjih dveh vrstah armirnih trakov so se relativno močno povečale.

ANALIZA REZULTATOV MERITEV

Pritiski na obložne plošče

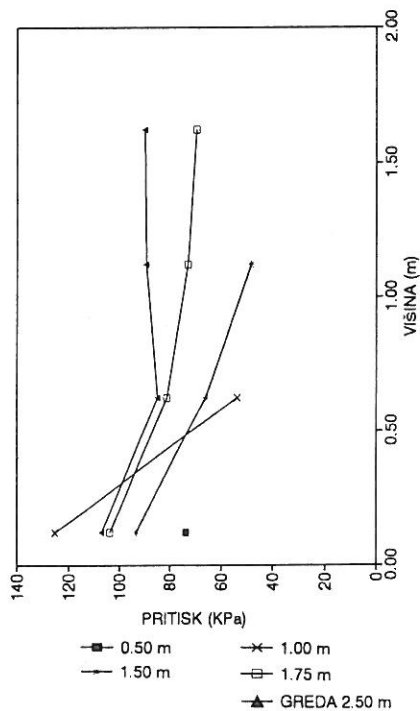
Pri opisu meritev smo navedli, da so bili horizontalni pritiski na obložne plošče merjeni s posebnimi merskimi celicami. Natančnost meritev s temi celicami je $\pm 0,001 \text{ kN/m}$ in celice so časovno stabilne.

Legra merskih celic je prikazana na slikah 1 in 5.

Izmerjene vrednosti pritiskov so, za različne faze gradnje modela, prikazane na sliki 11.

Zanimivo je, da merske celice praktično niso zaznavale spremembe pritiskov dokler ni bilo doseženih 1000 kN površinske obremenitve, pravtako niso bile izmerjene spremembe pritiskov pri razbremenitvi in ponovni

obremenitvi površja modela do te bremenske stopnje. Ta pojav kaže, da je vpliv stopnje komprimacije gramoznih plasti zelo velik in, da je pravilnost in natančnost izgradnje takšnik konstrukcij v praksi zelo pomembna.



Slika 11. Horizontalni pritiski na obložne plošče med gradnjo modela.

Prevelika je tudi vrednost napetosti v spodnjem traku pri vgrajevanju prvih 0.50 m gramoza, kjer se kaže vpliv podlage, ki je bila v našem primeru, kot je bilo že omenjeno, popolnoma toga, obložne plošče pa podprte (slika 11).

Natezne sile v armirnih trakovih

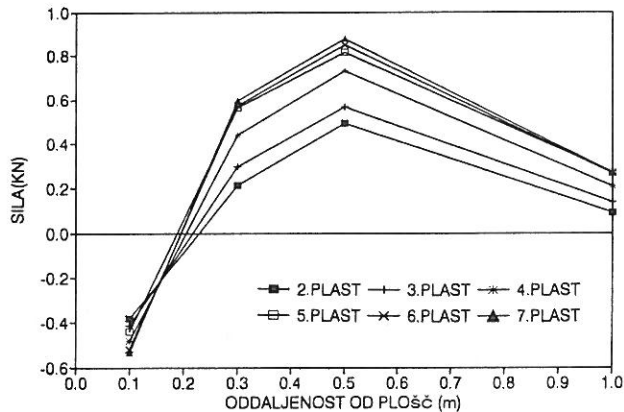
Diagrami razporeditve sil vzdolž armirnih trakov št. 4, 13, 20 in 28 so prikazani na slikah 12, 13, 14, 15, 16, 20 in 21.

Pri vseh meritvah se je pokazalo, da v območju traku blizu obložnih plošč nastopajo tlačne sile. Tlačena cona v traku nastopi zato, ker so obložne plošče med komprimacijo podprte.

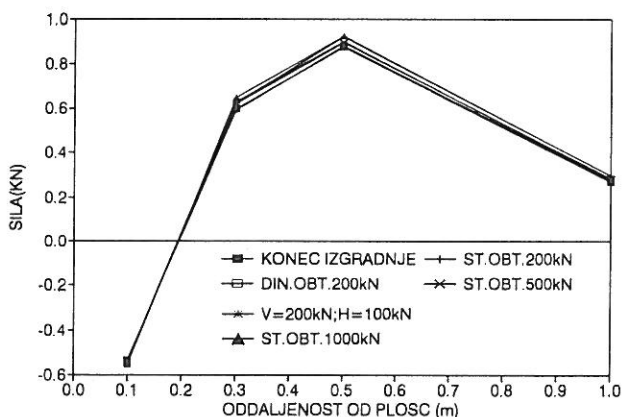
Zanimivo pa je, da se ti tlaki po komprimaciji naslednjih plasti, ko so bile podpore že odstranjene, niso izničili ali pa vsaj zmanjšali. Tudi ta pojav kaže na velik vpliv stopnje komprimacije in interakcije armirni trak- zemljina.

Primerjava maksimalnih vrednosti natezних sil, ki so v traku po končani gradnji modela s tistimi, ki se pojavijo po obremenitvi površja nam pokaže, da se vpliv obremenitve površja zazna samo v zgornjih dveh vrstah trakov (sl. 20 in 21). V spodnjih dveh vrstah trakov (sl. 13 in 14) vpliva vertikalne in horizontalne obremenitve tirnic praktično ne zaznamo več. Tudi vpliv dinamične obremenitve je zaznaven samo v prvi vrsti trakov, kar je posebno pomembno pri izbiri vrste konstrukcij za gradnjo železniških nasipov.

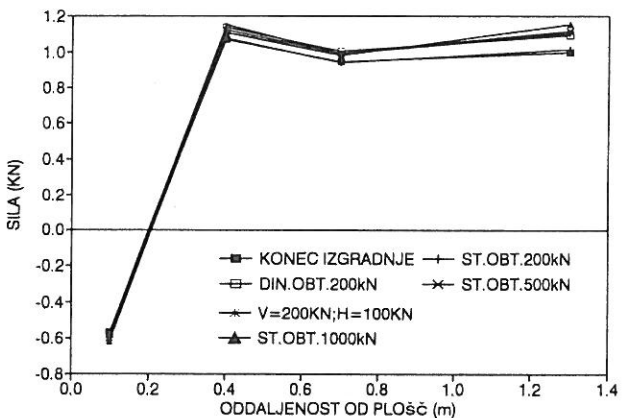
Velikost maksimalnih-izmerjenih natezних sil v trakovih je znatno manjša od vrednosti natezних sil izračunanih s konvencionalnimi metodami, ki se uporabljajo v vsakodnevni inženirski praksi.



Slika 12. Potek sil v traku št.4 med gradnjo modela.

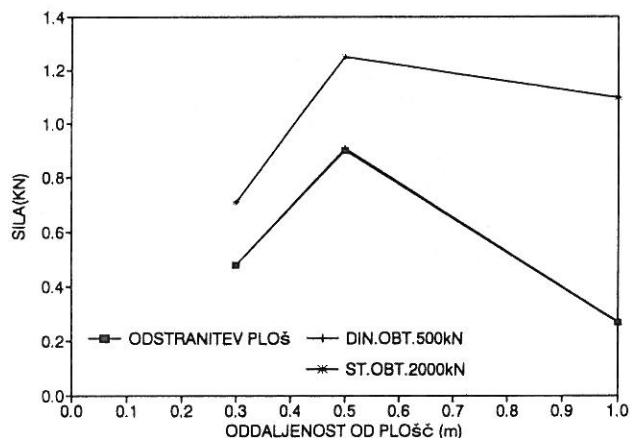


Slika 13. Sile v traku 4 med obremenjevanjem.

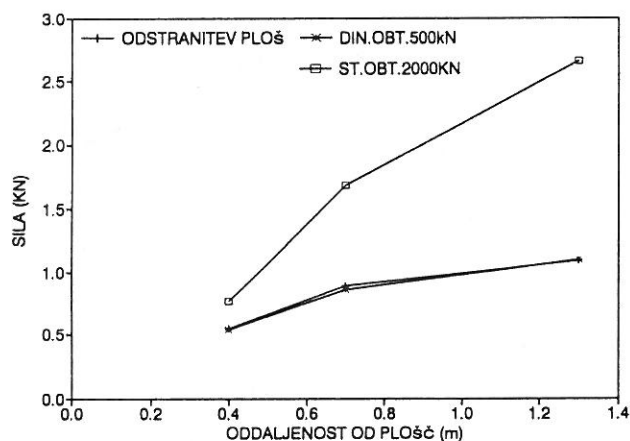


Slika 14. Sile v traku 13 med obremenjevanjem.

Zelo zanimivi so rezultati meritev sil v armirnih trakovih po odstranitvi obložnih plošč. Pri analizi izmerjenih rezultatov se meritve na prvem strainageu niso upoštevale, ker je bil preblizu gramozne plasti, ki se je odkrušila (tam kjer so bili trakovi v tlačni coni). Vpliv obremenjevanja površja "čiste" armirane zemljine je bil bistveno večji, kar je lepo vidno iz slik 15 in 16, kjer so prikazani diagrami poteka sil v spodnjih dveh trakovih.



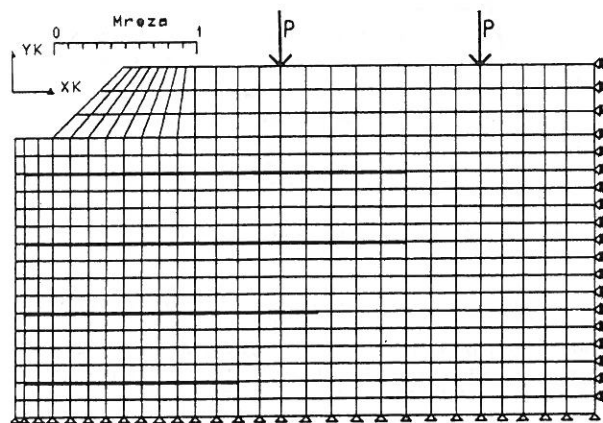
Slika 15. Sile v traku 4 po odstranitvi plošč.



Slika 16. Sile v traku 13 po odstranitvi plošč.

NUMERIČNA ANALIZA

Računska analiza laboratorijskega preizkusa je bila izvedena z računalniškim programom AX (Rojc, 1992) za reševanje osno simetričnih in ravninsko deformacijskih problemov ob upoštevanju elastoplastičnega materiala



Slika 17. Mreža končnih elementov.

(za zemljino) pri velikih deformacijah. V ta namen smo prerez zasipne zemljine, gramozne grede, lesenih pragov in obložnih plošč razdelili na končno število osem vozliščnih paraboličnih izoparametričnih elementov kot je to prikazano na sliki 17.

Armatura (poliesterski trakovi, slika 17) je v računu upoštevana z linijskimi dvovozliščnimi elementi, kompatibilnimi z elementi, ki simulirajo zemljino.

Konstitutivne enačbe in parametri materialov

Za zemljino (savski prod) smo upoštevali Drucker - Prager(jev) materialni model z asociativnim pravilom popuščenja. Ploskev popuščenja tega modela določata prva napetostna invariantsa (I_1) in druga invariantsa deviatorja napetosti (J_2)

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 - J_2^{1/2} = -k, \quad (1)$$

pri čemer je prva napetostna invariantsa

$$I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}, \quad (2)$$

druga invariantsa deviatorja napetosti

$$J_2 = (1/2)s_{ij}s_{ij}, \quad (3)$$

in deviator napetosti

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}(I_1/3), \quad (4)$$

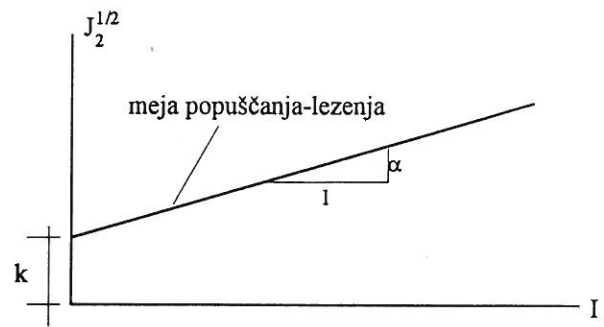
kjer je δ_{ij} Kroneckerjev delta ($\delta_{ij} = 0$ za $i \neq j$ in $\delta_{ij} = 1$ za $i = j$).

V enačbi (1) sta α in k materialna parametra, ki sta s kohezijo (c) in strižnim kotom (φ) zemljine za ravninsko deformacijsko stanje v naslednjih zvezah:

$$\alpha = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{3(3+\sin^2\varphi)^{1/2}}}, \quad (5)$$

$$k = \frac{3c\cos\varphi}{\sqrt{3(3+\sin^2\varphi)^{1/2}}}. \quad (6)$$

Enačba (1) izraža v koordinatnem sistemu ($I_1, J_2^{1/2}$) premico (slika 18).



Slika 18. Drucker-Prager(jev) model v ravnini ($I_1, J_2^{1/2}$).

Prirastek plastičnih deformacij ($d\varepsilon_{ij}^p$) je določen s pravilom plastičnega popuščenja

$$d\varepsilon_{ij}^p = \lambda \partial Q / (\partial \sigma_{ij}), \quad (7)$$

kjer je λ pozitivni sorazmernosti faktor in Q plastični

potencial - posebna funkcija komponent napetostnega tenzorja. V primeru asociativne plastičnosti, ko se funkcija popuščenja (enačba 1) in plastični potencial ujemata ($f=Q$) je prirastek plastičnih deformacij pravokoten na pogoj popuščenja. Lesene prage, lesene obložne plošče in armaturo iz poliestrskega laminata smo obravnavali kot idealno elastično izotropna materiala za katera lahko napišemo odnos med prirastkom deformacij in napetosti s standardno enačbo

$$d\epsilon_{ij}^e = D_{ijmn}^e d\sigma_{mn} \quad (8)$$

kjer je D_{ijmn}^e tenzor elastičnih konstant. Računska analiza je bila izvedena z upoštevanjem materialnih karakteristik katere so bile izmerjene v laboratoriju in na modelu. Ker za gramoz ni bilo možno izdelati triaksialnih preiskav so nekatere v računu uporabljene karakteristike ocenjene. Izmerjene karakteristike za gramoz so:

- prostorninska teža $\gamma = 22,7 \text{ kN/m}^3$
- modul elastičnosti $E_z = 1,26 \times 10^5 \text{ kPa}$
- strižni kot $\gamma = 40^\circ$
- kohezijo $c = 0,0 \text{ kPa}$

Privzeti parametri strižne trdnosti za gramoz so glede na izkušnje (prosti izkopi, sanacije umetno zgrajenih nasipov) nerealno nizki. Številni podatki iz literature, ki so bili dobljeni na osnovi terenskih, laboratorijskih in modelnih raziskav potrjuje dejstvo, da nastopijo pri gosto zbitih gramozih relativno visoka "navidezna" kohezija (od 5 kPa do 30 kPa) ter strižni koti, ki so od konvencionalno določenih vrednosti povečani za faktor 1,2 do 1,5 in več, če je ta gramoz del kompozita armirane zemljine (E.Balzer et al., 1990), (C.G.Jenner, 1990).

Za Poissonovo število smo privzeli vrednost $\nu = 0,23$. Z nateznim preizkusom armature je bil določen modul elastičnosti $E_s = 0,645 \times 10^7 \text{ kPa}$. Privzeta vrednost modula elastičnosti za lesene elemente znaša $E_{les} = 1,00 \times 10^7 \text{ kPa}$.

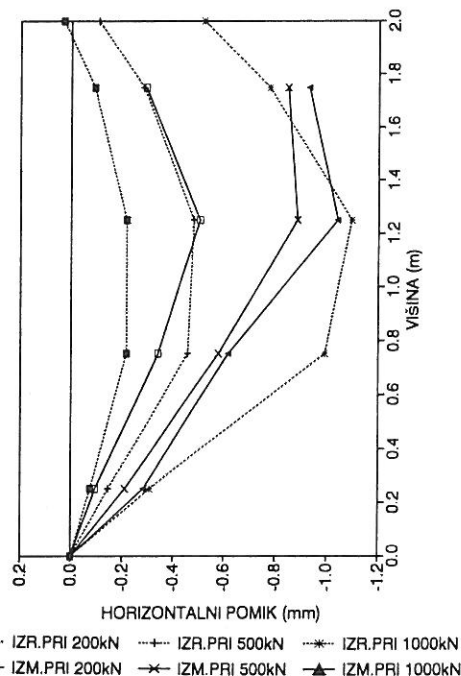
Številni izvedeni računski primeri so pokazali pričakovani, bistveni vpliv ocenjenih materialnih parametrov: Poissonovega števila (ν), kohezije (c) in strižnega kota (φ) na rezultate deformacij in napetosti. Pri čemer zadnja dva parametra posredno določata obliko in velikost ploskve popuščenja (enačbe 1, 5, 6). Prvi rezultati, dobljeni z ocenjenimi parametri za gramoz so bili nelogični. Zato je bilo potrebno te parametre v skladu z omenjenimi našimi in tujimi izkušnjami določiti tako, da smo se približali izmerjenim pomikom obložne stene modela.

V vseh, v članku podanih računskih analizah so bili upoštevanji naslednji materialni parametri:

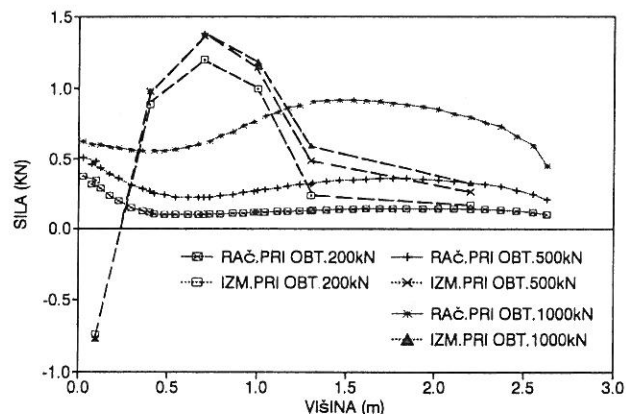
- strižni kot $\varphi = 60^\circ$
- kohezija $c = 22,4 \text{ kPa}$
- Poissonovo število za zemljino $\nu = 0,23$,
- elastični modul zemljine $E_z = 1,26 \times 10^5 \text{ kPa}$
- elastični modul armature $E_s = 1,29 \times 10^7 \text{ kPa}$
- elastični modul lesa $E_{les} = 1,00 \times 10^7 \text{ kPa}$

Primerjava računskih in merjenih rezultatov

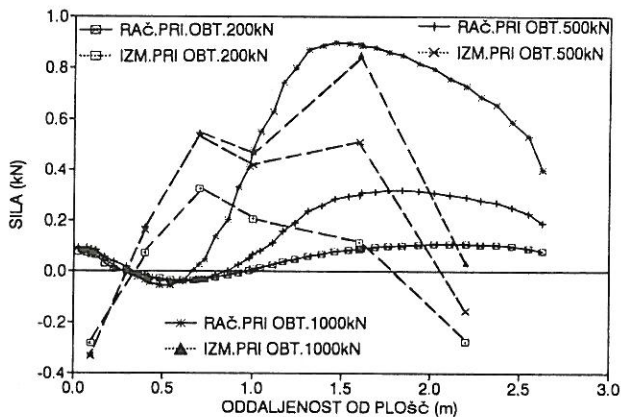
Na slikah 20 in 21 so prikazani diagrami razporeditve sil vzdolž armirnih trakov 20 in 28. Na diagramih so prikazane izmerjene vrednosti sil ter rezultati računskih analiz. Vidimo, da je velikostni red enak, vrhovi - lega maksimalnih vrednosti pa je malo premaknjena. Nastale razlike so logične glede na predhodno prikazan nastop tlačne cone v armirnih trakovih kot posledica komprimacije pri podprtih obložnih ploščah. Pomiki obložnih plošč so bili, kot je bilo v poglavju Numerična analiza omenjeno, izhodišče za določitev materialnih parametrov, ki so v računu uporabljeni. Izmerjene in izračunane vrednosti pomikov, pri različni vertikalni statični obremenitvi, so podane na sliki 19. Odstopanja izmerjenih in računskih vrednosti pri



Slika 19. Izračunani in izmerjeni pomiki plošč.



Slika 20. Izračunane in izmerjene sile v traku 20.



Slika 21. Izračunane in izmerjene sile v traku 28.

obremenitvah 200 kN in 500 kN ter relativno dobro ujemanje pri 1000 kN lahko pojasnimo s tem, da je z računskim modelom nemogoče simulirati vpliv komprimacije zemljine.

ZAKLJUČKI

Na osnovi izvedene modelne preiskave, opazovanj izvedenih konstrukcij ter rezultatov podanih v tuji literaturi lahko zaključimo naslednje:

- armirana zemljina - kompozit armature in zemljine je nek nov material z mnogo večjimi vrednostmi parametrov strižne odpornosti kot ga ima zemljina (Schlosser, 1972), zato je uvedena nova karakteristika zemljine - navidezna kohezija ("equivalent cohesion" in "apparent cohesion");
- armatura, vgrajena v zemljino, se obnaša popolnoma drugače kakor nevgrajena;
- na velikost sil v armaturi ter na velikost pritiskov na obložne plosčice odločilno vpliva stopnja komprimacije ter način gradnje konstrukcije (znan je že vpliv gostote in dolžine armature);
- vpliv dinamične obremenitve se z oddaljenostjo od izvora zelo hitro manjša;
- velikosti osnih sil v armaturi so bistveno manjše od izračunanih po konvencionalnih metodah;
- zelo pomembna je podlaga konstrukcije.

Za končno oceno pomembnosti posameznih, zgoraj navedenih vplivnih parametrov ter za oceno uspešnosti uporabljene računske metode z izbranim matematičnim modelom za zemljino pa bi bilo potrebno še:

- izdelati model v naravnem merilu, ki bi ga lahko porušili (obravnavani model je bil za nam dostopno laboratorijsko opremo prestabilen);
- točno določiti vse mehanske lastnosti zemljine;
- na mikro modelih preiskati in analizirati vpliv interakcije zemljina - armatura ter s tem tudi vpliv vkleščenja armature;
- analizirati vpliv trenja ob bočnih stenah modela;
- ponoviti primerjalne računske analize z novimi parametri.

ITERATURA

- Attewell, P.B., Farmer, I.W.(1976). Principles of engineering geology. University of Durham, London.
- Balzer, E. et al.(1990). Geotextile reinforced abutment full scale test and theory. Performance of reinforced soil structures. British Geotechnical Society, Glasgow.
- Battelino, D.(1990). 10 let podprnih konstrukcij iz armirane zemljine v Sloveniji. Gradbeni vestnik št. 11, Ljubljana.
- Battelino, D., et al.(1981). Armiranje zemljin. Ljubljana.
- Battelino, D.(1983). Some experience in reinforced cohesive earth. Proceedings, European Conference on Soil Mechanics, Helsinki.
- Jenner, C.G.(1990). A study of the influence of soil on the reinforcement load in polymer grid reinforced soil structures. Performance of reinforced soil structures. British Geotechnical Society, Glasgow.
- Petkovšek, A.(1990). Interno poročilo o preiskavah materiala in kakovosti vgradnje materiala v modelu armirane zemljine, ZRMK, Ljubljana.
- Prokop, B., Battelino, D.(1990). Študija metod sanacijsko rekonstrukcijskih osnov dotrajanih objektov spodnjega ustroja v železniškem omrežju. Raziskovalni projekt: 062685-88, Ljubljana.
- Prokop, B.(1993). Modelna preiskava podporne konstrukcije iz armirane zemljine. Magistrska naloga v fazi oddaje FAGG, Ljubljana.
- Rojc, T., Battelino, D.(1993). Analysis of elasto-plastic problems in soil mechanics assuming a Drucker-Prager failure surface at finite strains. International symposium on limit state design in geotechnical engineering, Copenhagen.

Rojc, T.(1992). Navodila za uporabo programa AX. Ljubljana

Schlosser, F.,Long, N.T.(1972). Comportement de la Terre Armée dans les ouvrages de soutènement. Proc. 5th E.C.S.M.F.E., Vol. 1, Madrid.

Vidal, H.(1966). La Terre Armée un matériau nouveau pur les travaux publics. Annales de l' I.T.B.P., No. 2231224, Paris.

FRENCH MINISTRY OF TRANSPORTS (1979). Recommendations and rules of the Art for Reinforced Earth Structures, Paris.

DEPARTEMENT OF TRANSPORT (1987). Reinforced Earth Retaining Walls and Bridge Abutments for Embankements. Technical Memorandum (Bridges) BE 3/78, HMSO,UK.