

Boštjan PULKO

asist.mag., dipl.grad.inž., Univerza v Ljubljani, FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

VPLIV GRUŠČNATIH KOLOV NA POSEDKE IN STRIŽNO TRDNOST TEMELJNIH TAL POD CESTNIM NASIPOM

POVZETEK: Raba gruščnatih kolov je učinkovit način za poboljšanje deformabilnostnih in strižnih karakteristik temeljnih tal pod cestnimi nasipi na malo nosilnih tleh. Ker je v stabilnostnih analizah nasipov praktično nemogoče upoštevati vsak posamezen sloj, je prikazan tudi postopek določitve nadomestne strižne trdnosti kompozita zemljine in grušča v dreniranih in nedreniranih pogojih. Izboljšane strižne karakteristike stabilizirane zemljine se lahko direktno uporabijo v stabilnostnih analizah. Projektne izračuni cestnega nasipa na malo nosilnih tleh so prikazani kot prikaz prednosti omenjenega postopka.

INFLUENCE OF GRAVEL COLUMNS ON SETTLEMENTS AND SHEAR STRENGTH OF SUBSOIL BENEATH ROAD EMBANKMENT

SUMMARY: Use of gravel columns beneath road embankments is an effective method to reduce deformations and to increase shear resistance of the soft subsoil. It's practically impossible to take into account each individual gravel column in the stability analysis of earth embankments, so the method for determination of the equivalent shear strength of the soil-gravel mixture in the undrained and in the drained conditions is presented. Improved shear characteristics of the soil-gravel mixture can be directly used in the stability calculations. The design calculations of the road embankment on soft subsoil is presented as an example of benefits of this method.

SPLOŠNO

Pri gradnji cestnih nasipov na slabo prepustnih malo nosilnih temeljnih tleh se uporabljajo številne metode za pospešitev procesa konsolidacije in za izboljšanje nosilnosti temeljnih tal in stabilnostnih razmer. Za pospeševanje konsolidacije smo pri nas uspešno uporabljali vtisnjene stenjske vertikalne drenaže, pri manjših globinah slabih tal pa pogosto poleg vgradnje kamnitih pet uporabljamo vzdolžna ali prečna rebra iz kvalitetnega kamnitega materiala. V kolikor je debelina in struktura slabo nosilnih tal takšna, da tehnične rešitve, ki jih običajno uporabljamo za sanacijo temeljnih tal niso izvedljive ali pa ekonomsko niso upravičene, je vgradnja gruščnatih kolov v malo nosilna tla pod cestnimi nasipi skoraj najboljša rešitev. Efekt vgradnje gruščnatih kolov se kaže predvsem v nadomestitvi slabo nosilnih in deformabilnih zemljin z materialom večje trdnosti in majhne deformabilnosti. Ker je grušč zelo prepusten, tak slop istočasno deluje tudi kot vertikalna drenaža in bistveno pospeši konsolidacijo temeljnih tal.

Če se omejimo samo na funkcijo vertikalne drenaže, je prednost gruščnatih kolov proti stenjskim drenažam predvsem v tem, da je gruščnate kole možno izvajati tudi v pogojih, ko izvedba stenjskih drenaž ni mogoča zaradi posameznih plasti trših nosilnejših zemljin. Gruščnati kol ima tudi neprimerno večjo sposobnost dreniranja. Uporaba gruščnatih kolov je upravičena predvsem tam, kjer so globine slabo nosilnih tal takšne, da ustrezni izkopi za pete ali rebra niso izvedljivi, ker bi pri tem ogrozili globalno stabilnost področja. Prednost je tudi v tem, da pri uporabi ustrezne tehnologije vgrajevanja gruščnatih kolov ne nastopajo viški za vgradnjo v nasipe neustreznih zemeljskih materialov, ki bi jih bilo potrebno transportirati in trajno deponirati.

Ne glede na številne metode in tehnike vgrajevanja je moč trditi, da ob ustrezni opremljenosti in izkušnjah izvajalca geotehničnih del izvedba gruščnatih kolov ni problematična. Precej bolj težavna je vloga geoteknika pri vrednotenju vpliva gruščnatih kolov na pospešitev konsolidacije, na deformacije temeljnih tal in povečanje strižne trdnosti, saj gre za izrazit interakcijski problem obnašanja malo nosilnih slabo prepustnih temeljnih tal, gruščča v kolih in zemeljskega nasipa.

TEORETIČNE OSNOVE

Analiza obnašanja temeljnih tal izboljšanih s gruščnatimi koli je izjemno zahteven geotehnični problem. Obstajajo načini izračuna s katerimi je mogoče narediti dobro oceno brez zapletenih numeričnih analiz. Račun vpliva gruščnatih kolov na pospešitev konsolidacije je mogoče rešiti z dobro znano teorijo radialne konsolidacije. V nadaljevanju je predstavljena ena izmed novejših in v svetu že uveljavljenih metod za oceno deformacijskega obnašanja (Van Impe, 1992), ki je bila v slovenski geotehnični praksi uporabljena šele nedavno v okviru načrtovanja oziroma izgradnje avtocestnega programa.

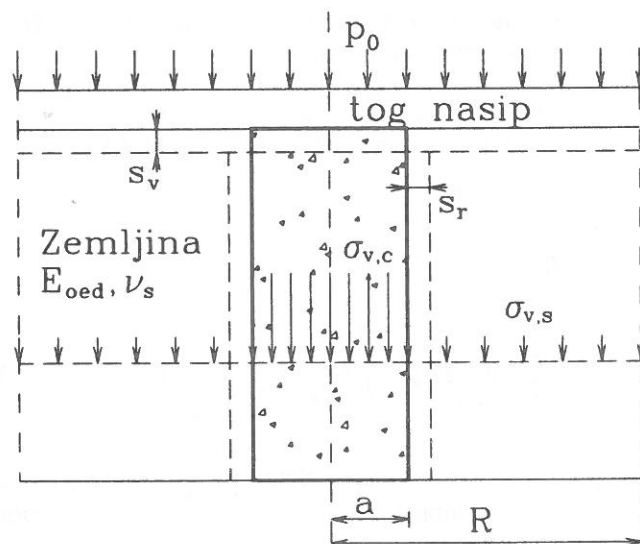
Problem deformacijskega obnašanja gruščnatega kola in okolne zemljine se obravnava kot valj v osno simetričnih pogojih. Vpliv kola na okolno zemljino je odvisen od gostote in razporeditve kolov, pri čemer se v analizah zemljina upošteva kot debel cilindar, katerega vplivni radij znaša:

$$R = \frac{CL}{2} \quad (1)$$

Z L označimo medsebojno razdaljo med koli. Konstanta C je enaka vrednosti 1.05, 1.13 oziroma 1.29 za trikotno, kvadratno in šesterokotno mrežo gruščnatih kolov.

Valj, ki ga sestavlja gruščnat kol in cilindar zemljine z vplivnim radijem R , je obremenjen z nasipom, ki se upošteva kot relativno tog sistem in deluje na valj z vertikalno obtežbo p_0 . Obtežba povzroči vertikalni premik celotnega valja s_v in radialni premik na stiku gruščnatega kola in zemljine, ki ga označimo s s_r (slika 1). Zaradi relativne togosti nasipa je pričakovati enako vertikalno deformacijo zemljine in gruščnatega kola. Zaradi različne togosti kola in zemljine se ob praktično enaki vertikalni deformaciji pojavijo v gruščnatem kolu bistveno večje vertikalne napetosti kot v temeljnih tleh. Velikost vertikalne napetosti v gruščnatem kolu je neposredno odvisna od radialnega - bočnega

odpora, ki ga prevzame zemljina. Metoda upošteva, da se v zgoščenem gruščnatem kolu vzpostavi porušno napetostno stanje, pri katerem se mobilizira vsa razpoložljiva strižna odpornost gramoza.



Slika 1. Napetosti in deformacije v gruščnatem kolu in zemljini

Pri striženju v zgoščenih gramozih in peskih nastopi negativna volumska deformacija $\varepsilon_{v,c}$, medtem ko okolna zemljina ostane v elastičnem stanju. Prostornino kola po deformaciji lahko izrazimo s premiki po enačbi (2):

$$\pi a^2 H (1 + \varepsilon_{v,c}) = \pi (a + s_r) (H - s_v) \quad (2)$$

H je dolžina in a radij gruščnatega kola. Vertikalno in radialno napetost v gruščnatem kolu označimo s $\sigma_{v,c}$ in σ_r . V primeru, da se v grušču s strižnim kotom φ' mobilizira vsa strižna odpornost lahko zapišemo:

$$\sigma_{v,c} = \sigma_r \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} \right) \quad (3)$$

Ob upoštevanju ustreznih robnih pogojev na vrhu in dnu valja ter na notranjem in zunanjem obodu cilindra, ki ga predstavlja okolna zemljina, lahko ob upoštevanju znanih enačb (Poulos in Davis, 1975, Charles in Watts, 1983) izrazimo vertikalni premik s_v in radialni premik s_r na robu gruščnatega kola:

$$s_s = \frac{H}{E_{oed}} \left\{ \frac{C_2 \sigma_{v,s} - C_1 \sigma_r}{C_3} \right\} \quad (4)$$

$$s_r = \frac{a}{E_{oed}} \left\{ \frac{\sigma_r - K_{0,s} \sigma_{v,s}}{C_3} \right\} \quad (5)$$

S $\sigma_{v,s}$ je označen vertikalni tlak v zemljini, konstante v enačbah pa izrazimo z enačbami:

$$K_{0,s} = \frac{\nu_s}{1 - \nu_s}; \quad A_r = \left(\frac{a}{R} \right)^2 \quad (6)$$

$$C_1 = \frac{2K_{0,s}A_r}{(1-A_r)}; \quad C_2 = \frac{(1-2\nu_s + A_r)}{(1-A_r)(1-\nu_s)}; \quad C_3 = (C_2 - K_{0,s}C_1) \quad (7)$$

Modul stisljivosti E_{oed} in Poissonovo število ν_s zemljine sta poleg strižnega kota grušča edini materialni karakteristiki, ki ju potrebujemo za izračun.

Če zapišemo še enačbo, ki predstavlja vertikalno ravnotežje sistema, dobimo enačbo (8), ki jo ob upoštevanju zgornjih enačb, lahko prevedemo na nelinearno enačbo z eno neznako (9), ki jo predstavlja radialna deformacija $\varepsilon_r = s_r/a$:

$$p_0 R^2 = \sigma_{v,c}(\alpha + s_r)^2 + \sigma_{v,s} \left[R^2 - (\alpha + s_r)^2 \right] \quad (8)$$

$$p_0 = E_{oed} \varepsilon_r \left[A_r \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} \right) (1 + \varepsilon_r)^2 (C_2 + K_{0,s} \alpha) + \left\{ 1 - A_r (1 + \varepsilon_r)^2 \right\} (\alpha + C_1) \right] \quad (9)$$

Enačbo (9) je z upoštevanjem izbrane volumske deformacije kola $\varepsilon_{v,c}$ in ob upoštevanju znanih materialnih in geometrijskih podatkov, obtežbe in izraza $\alpha = \varepsilon_{v,c} / \varepsilon_r$ mogoče rešiti z Newtonovo metodo. Ko je znana radialna deformacija ε_r , je preprosto izračunati še ostale neznane količine, kot so vertikalna napetost v kolu $\sigma_{v,c}$ in v zemljini $\sigma_{v,s}$, radialna napetost na stiku grušča in zemljine σ_r in vertikalni premik in horizontalni premik s_v in s_r .

Vrednotenje računskih rezultatov

Najpomembnejši količini, ki ponazarjata vpliv gruščnatih kolov na deformacijsko obnašanje stabiliziranih temeljnih tal, sta količnik redukcije posedka β in količnik koncentracije napetosti v gruščnatem kolu η . Vertikalni premik nestabiliziranih intaktnih tal izračunamo po znani enačbi:

$$s_{v,0} = \frac{p_0 H}{E_{oed}} \quad (10)$$

Količnik redukcije posedka je definiran kot razmerje vertikalnega pomika stabiliziranih in intaktnih temeljnih tal:

$$\beta = \frac{s_v}{s_{v,0}} \quad (11)$$

Količnik koncentracije napetosti v gruščnatem kolu η je definiran kot razmerje vertikalnih napetosti v gruščnatem kolu in okolni zemljini:

$$\eta = \frac{\sigma_{v,c}}{\sigma_{v,s}} \quad (12)$$

Podobno lahko definiramo tudi brezdimenzijska količnika η_c in η_s , ki predstavljata dejanske vertikalne napetosti v kolu in zemljini, normirane z obtežbo temeljnih tal p_0 :

$$\eta_c = \frac{\sigma_{v,c}}{p_0}; \quad \eta_s = \frac{\sigma_{v,s}}{p_0} \quad (13)$$

Vpliv povečanja strižne trdnosti

Grušchnati koli poleg pospešitve konsolidacije, ki prispeva k izboljšanju strižne odpornosti malo nosilnih zemljin, dodatno izboljšajo strižno trdnost zemljine tako v začetnih, nedreniranih pogojih, kot tudi po končani konsolidaciji. Pri izvedbi stabilnostnih analiz je skoraj nemogoče upoštevati vsak posamezen kol, zato je primerneje poiskati nadomestne strižne karakteristike in nadomestno prostominsko težo stabilizirane zemljine, ki jo izračunamo po enačbi:

$$\bar{\gamma} = (1 - A_r)\gamma_s + A_r\gamma_c \quad (14)$$

Količnik med prostominsko težo gruščca in nadomestno prostominsko težo označimo z $n_c = \gamma_c / \bar{\gamma}$, analogno definiramo tudi količnik $n_s = \gamma_s / \bar{\gamma}$

Nadomestni strižni karakteristiki v začetnih, nedreniranih pogojih

V primeru, da so tla slabo prepustna, čas gradnje nasipa pa kratek, običajno izvedemo stabilnostno analizo po postopku $\varphi' = 0^\circ$ z nedrenirano strižno trdnostjo zemljine c_u . Nadomestno strižno trdnost je v poljubni globini mogoče izračunati po enačbi:

$$\bar{\tau} = (1 - A_r)c_u + A_r(\sigma_{v,c} + \gamma_c z) \tan \varphi' \quad (14)$$

V enačbi pomeni:

- c_u nedrenirana strižna trdnost zemljine,
- γ_c prostominska teža gruščca.

Tako izračunane nadomestne strižne trdnosti ni mogoče neposredno uporabiti v računalniških programih za analizo stabilnosti, zato zgomji izraz preoblikujemo v znano enačbo (15), ki bo zagotavljala pravilno delovanje programa:

$$\bar{\tau} = c_{nad} + \sigma'_v \tan \varphi'_{nad} \quad (15)$$

Nadomestni strižni karakteristiki izračunamo po izrazu (16) in (17) in ju poleg nadomestne prostominske teže uporabimo kot materialni karakteristiki stabilizirane zemljine:

$$c_{nad} = (1 - A_r)c_u + A_r p_0 (\eta_c - n_c) \tan \varphi' \quad (16)$$

$$\tan \varphi'_{nad} = A_r n_c \tan \varphi' \quad (17)$$

Nadomestni strižni karakteristiki po končani konsolidaciji

Z znanim napetostnim stanjem v kolu in zemljini in z efektivnimi strižnimi karakteristikami zemljine c_s in φ'_s lahko izračunamo nadomestno strižno trdnost po enačbi:

$$\bar{\tau} = (1 - A_r)c_s + (1 - A_r)(\sigma_{v,s} + \gamma_s z) \tan \varphi'_s + A_r(\sigma_{v,c} + \gamma_c z) \tan \varphi' \quad (18)$$

Če enačbo preoblikujemo v obliko (15), dobimo enačbi za račun nadomestnih strižnih karakteristik:

$$c_{nad} = (1 - A_r)c_s + (1 - A_r)p_0 (\eta_s - n_s) \tan \varphi'_s + A_r p_0 (\eta_c - n_c) \tan \varphi' \quad (19)$$

$$\tan \varphi'_{nad} = (1 - A_r)n_s \tan \varphi'_s + A_r n_c \tan \varphi' \quad (20)$$

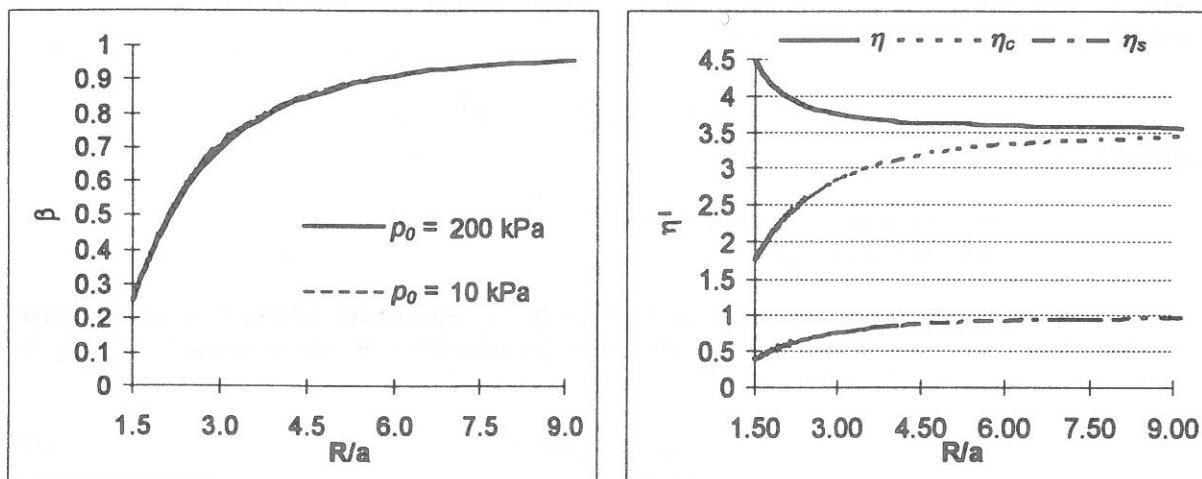
PRIKAZ UPORABE METODE PRI NAČRTOVANJU CESTNEGA NASIPA

Kot primer uporabe opisane metode in vpliva posameznih parametrov prikazujemo izračun količnika redukcije posedka in nadomestnih strižnih karakteristik z gruščnatimi koli izboljšanih slabo nosilnih glinastih temeljnih tal obremenjenih s cestnim nasipom, ki v osi povzroči dodatno vertikalno napetost 200 kPa. Materialni podatki, ki so potrebni za izračun po tej metodi, se nahajajo v preglednici 1:

Preglednica 1. Materialni podatki

Zemljina	γ (kN/m ³)	E_{osd} (kPa)	ν	c_u (kPa)	c' (kPa)	φ' (°)
glina	18	3000	0.40	30	7	20
grušč	24	-	-	-	0	38

Osnovni predpostavki izračuna sta poleg materialnih podatkov še ocenjena vrednost negativne volumnske deformacije $\varepsilon_{v,c}$ gruščnatega kola in raster kolov oziroma količnik R/a . Obe količini bistveno vplivata na faktor redukcije posedka in faktorje koncentracije napetosti. V analizah smo upoštevali nično volumnsko deformacijo, ki da najnižje faktorje redukcije posedka in napetosti.

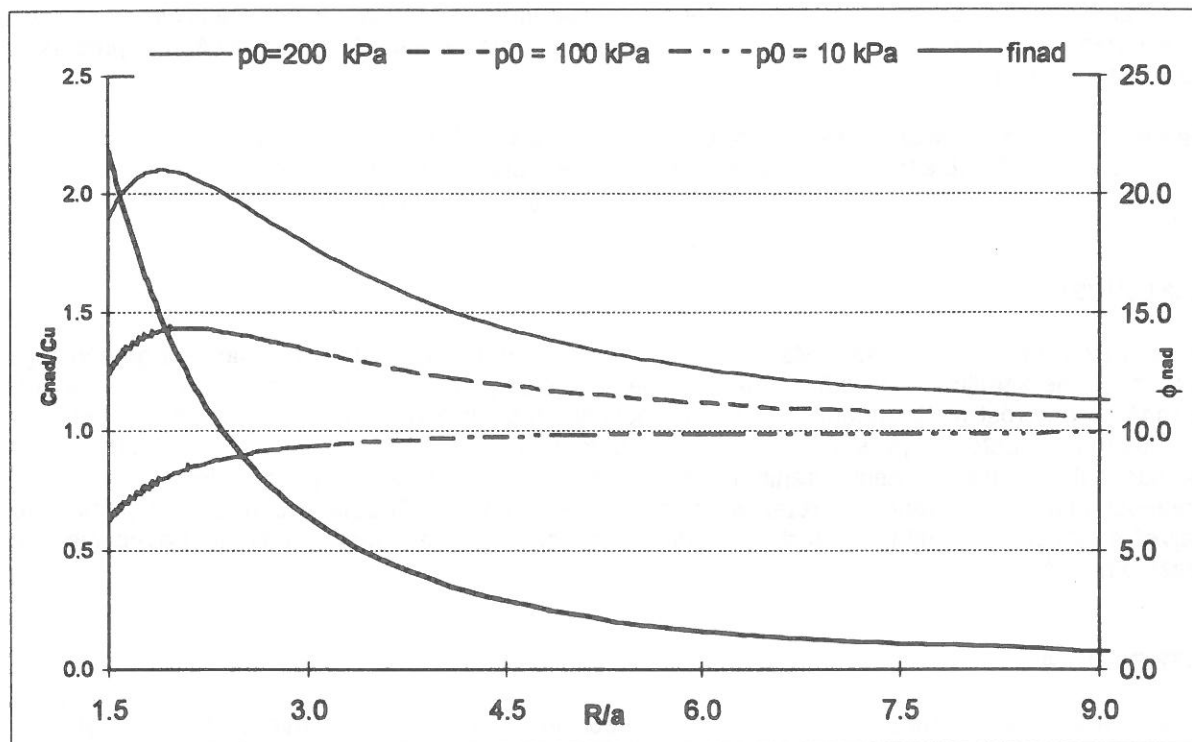


Slika 2. Prikaz količnika redukcije β in faktorjev koncentracije napetosti η , η_c in η_s

Na sliki 2 je prikazan faktor redukcije posedka β in količniki koncentracije napetosti η , η_c in η_s za različne obremenitve temeljnih tal za različnih razmerjih R/a . Pri danih podatkih je vpliv velikosti vertikalne obtežbe p_0 na količnik redukcije β in na koncentracijo napetosti zanemarljiv. Z inštalacijo gruščnatih kolov v razmerju R/a od 3 do 4 lahko prvotne posedke zmanjšamo od 35 do 20%.

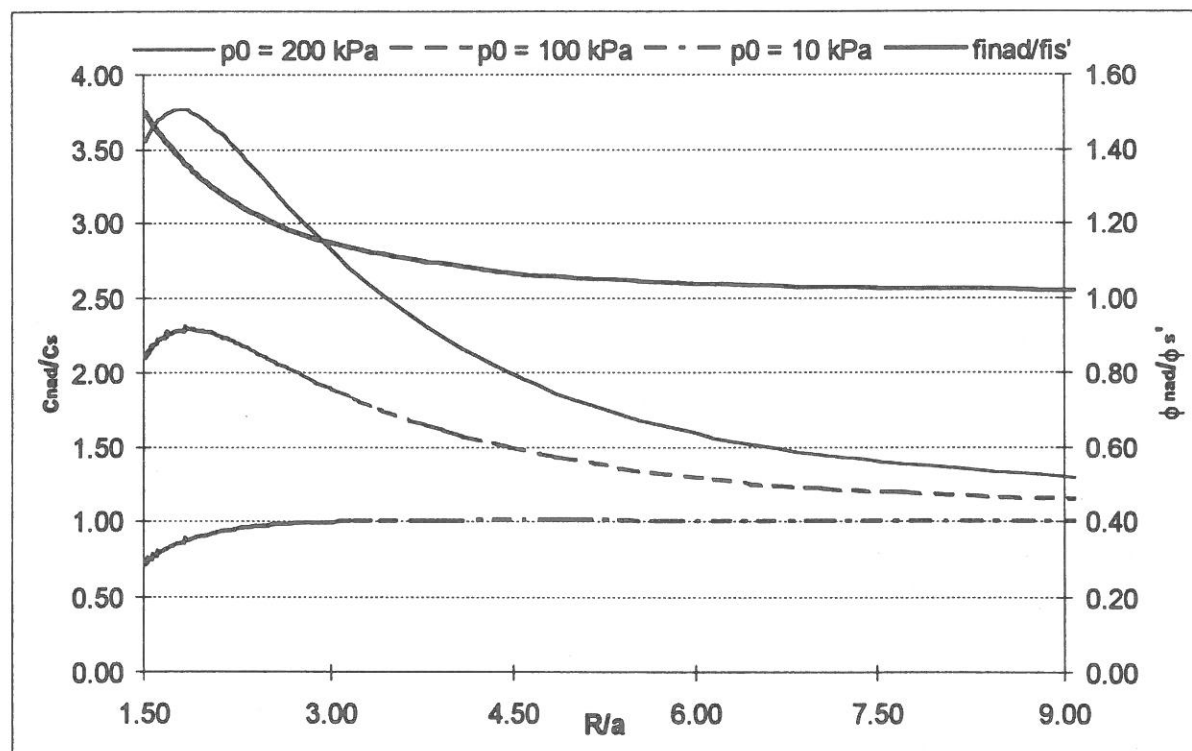
Z izračunanimi količniki redukcije in koncentracijami napetosti ni težko izračunati nadomestne strižne karakteristike. Za stanje takoj po izgradnji v nedreniranih pogojih so za različna razmerja R/a nadomestne strižne karakteristike prikazane na sliki 3. Nadomestni strižni kot je skoraj neodvisen od vertikalne napetosti p_0 , medtem ko je vrednost nadomestne kohezije zelo odvisna od jakosti obtežbe p_0 .

Na splošno lahko ugotovimo, da je pri ekonomsko še sprejemljivih razdaljah med koli pričakovati precejšnje povečanje strižne trdnosti predvsem v področju največje obremenitve temeljnih tal oziroma v sredini nasipa. Pod brežino, kjer se vrednost obtežbe p_0 zmanjšuje, se proporcionalno z obtežbo zmanjša tudi delež strižne trdnosti. Nadomestne karakteristike v začetnih, nedreniranih pogojih predstavljajo spodnjo mejo strižne odpornosti z gruščnatimi koli izboljšanih tal.



Slika 3. Nadomestne strižne karakteristike v odvisnosti od razmerja R/a - začetno stanje

Zaradi pospešenega poteka konsolidacije lahko pričakujemo porast strižne trdnosti na račun disipacije presežnih pomih tlakov v zemljini. Normirane nadomestne strižne karakteristike za stanje po konsolidaciji so prikazane na sliki 4.



Slika 4. Nadomestne strižne karakteristike v odvisnosti od razmerja R/a - končno stanje.

Povečanje efektivnega strižnega kota znaša pri še ekonomskem razmerju vplivnega radija proti radiju gruščnatega kola do 20%, pri tem pa lahko glede na vertikalno obtežbo dosežemo precejšnje povečanje kohezije.

Nadomestne strižne karakteristike, ki jih lahko uporabimo v stabilnostnih analizah, moramo vrednotiti glede na obstoječo obtežbo na terenu. Konkretno to pomeni, da temeljna tla pod nasipom razdelimo na vertikalne lamele in jim pripišemo nadomestno kohezijo v odvisnosti od obtežbe temeljnih tal p_0 .

ZAKLJUČEK

Metoda (Van Impe, 1992) omogoča oceno deformacijskega in napetostnega obnašanja gruščnatega kola in okolne zemljine. Na podlagi osnovnih geotehničnih parametrov zemljine in gruščnatega kola je moč na preprost način ovrednotiti vpliv na posedke temeljnih tal stabiliziranih z gruščnatimi koli. Poznavanje napetostnega stanja v kolih je pomembno zlasti za račun nadomestnih strižnih karakteristik v začetnih nedreniranih pogojih in po končani konsolidaciji. Izračuni kažejo, da je vrednost nadomestne kohezije pretežno odvisna od vertikalne obtežbe na terenu, zato je pričakovati največje povečanje strižne trdnosti v sredini zemeljskih nasipov, medtem ko je povečanje pod brežino manjše.

LITERATURA

1. Van Impe, W.F. (1989). Soil Improvement techniques and their improvement, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
2. Van Impe, W.F., Madhav, M.R. (1992). Expected developments in soil improvement techniques, Proc 11th ARCMFE, Cairo, Vol. 1, 85-142.