

RAVNINSKA STABILNOSTNA ANALIZA POBOČIJ

PLANE STABILITY ANALYSIS OF SLOPES

BORUT MACUH, dipl.inž.grad., Tehniška fakulteta Univerze v Mariboru

LUDVIK TRAUNER, prof.dr., dipl.inž.grad., Tehniška fakulteta Univerze v Mariboru

POVZETEK: V prispevku je predstavljen računalniški program "RASTA" za ravninsko stabilnostno analizo pobočij po metodi mejnega ravnotežja. Izdelan je na osnovi teoretične formulacije, ki sta jo podala Baker in Garber (1978) in jo je dopolnil z numeričnim postopkom Leshchinsky (1990). Teorija bazira na variacijski analizi mejnega ravnotežja. Ni potrebnih zatekanj k statičnim predpostavkam. Kritična drsna površina, pobočje in sloji pobočij so aproksimirani s serijami ravnih linij. Meja med dvema slojema je lahko tudi del kritične drsne ploskve. Program je uporaben za splošne nehomogene, neizotropne zemljine s poljubno razporeditvijo pritiska porne vode in točkovnih obtežb.

SUMMARY: A computer programme called "RASTA" for limit equilibrium analysis of slope stability has been developed. It is based on the theory formulated by Baker and Garber (1978) and with the numerical procedure completed by Leshchinsky (1990). The theory bases on variational limit equilibrium analysis. The critical slip surface, as well as the slope and layers, are approximated with the polygon line set. Statical assumptions are not necessary. In some cases, the boundary between layers may be a part of the critical slip surface. The computer programme is valid for generally non-homogeneous, non-isotropic soils with an arbitrary distribution of pore water pressure and concentrated loads.

UVOD

Teorija, po kateri je izdelan računalniški program (Baker, Garber (1978) in Leshchinsky (1990)), formulira problem mejnega ravnotežja pobočja v ravnini z variacijskim računom, in sicer tako, da je analiza izpeljana brez kakršnekoli vnaprejšne predpostavke z ozirom na obliko drsne ploskve ali razporeditve normalne napetosti po njej. Na ta način je na osnovi samo formalne definicije konceptov mejnega ravnotežja in faktorja varnosti glede na trdnost dokazano, da se mora minimalni faktor varnosti pojaviti na drsnih ploskvah s posebno geometrijsko lastnostjo. Ta geometrijska lastnost zagotavlja, da rezultanta infinitezimalnih normalnih in strižnih (trenjskih) sil gre skozi skupno točko ali pa so paralelni skupni smeri. Pokazalo se je, da je kot rezultat te geometrijske lastnosti minimalni faktor varnosti, ki je neodvisen od razporeditve normalne napetosti vzdolž kritične drsne ploskve. Vsi dobljeni rezultati so veljavni za splošne nehomogene, neizotropne zemljine s poljubno razporeditvijo pritiska porne vode in zunanjih sil.

Dobro je znano, da zahteva izračun faktorja varnosti informacijo o dveh funkcijah. Prva je enačba potencialne porušne ploskve, druga pa predstavlja razporeditev normalne napetosti vzdolž te ploskve ali pa nekatere lastnosti sil, ki delujejo na vertikalne ploskve (medlamelne sile). Prvo funkcijo imenujemo kinematična, drugo pa napetostna funkcija.

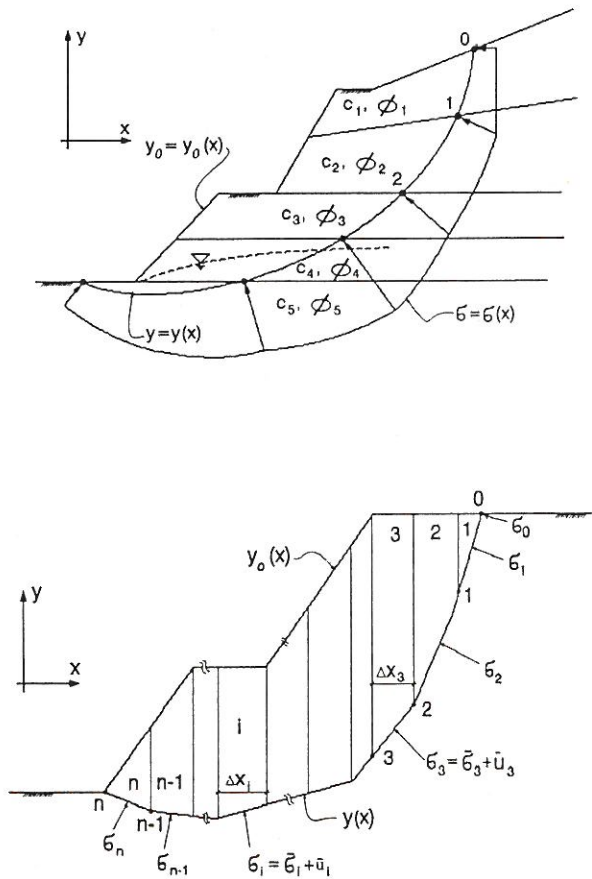
Ker je problem stabilnosti pobočij statično nedoločen, so pri sestavljanju enačb mejnega ravnotežja potrebne določene predpostavke, katerih dopustljivost je lahko odločena na osnovi rezultirajoče medlamelne sile (njene velikosti, položaja in smeri).

Pokazalo se je, da je glavni problem dvodimenzionalne analize mejnega ravnotežja stabilnosti pobočij statični in ne kinematični. Teorija, po kateri je izdelan računalniški program, je v skladu z metodo mejnega ravnotežja stroga (eksaktna) in poskuša rešiti statično nedoločenost s koristno uporabo variacijskega računa za doseg ekstreminih rezultatov. Razporeditev normalne napetosti po katerikoli opisani drsini je določena matematično tako, da vodi do minimalnega faktorja varnosti. Poznavanje te razporeditve napetosti daje statično določen problem in tako omogoča inženirju, da presodi o dopustnosti rezultirajočih medlamelnih sil.

TEORIJA IN NUMERIČNI POSTOPEK

Slika (1a) prikazuje nalogo, ki bo razložena. Znani so: kohezija $c_j = c_j(x,y,y')$ in strižni kot trenja ϕ_j (efektivni strižni koeficient $\psi_j = \tan[\phi_j(x,y,y')]$) za vsak sloj j ($j = 1,2,\dots,m$), kot tudi razporeditev porne vode $u = u(x,y)$. Odvisnost c , ψ , u in γ od položaja (x,y) kaže na možno nehomogenost, medtem, ko odvisnost c in ψ od y' kaže na možno anizotropijo. Trdnostni parametri zemljine lahko

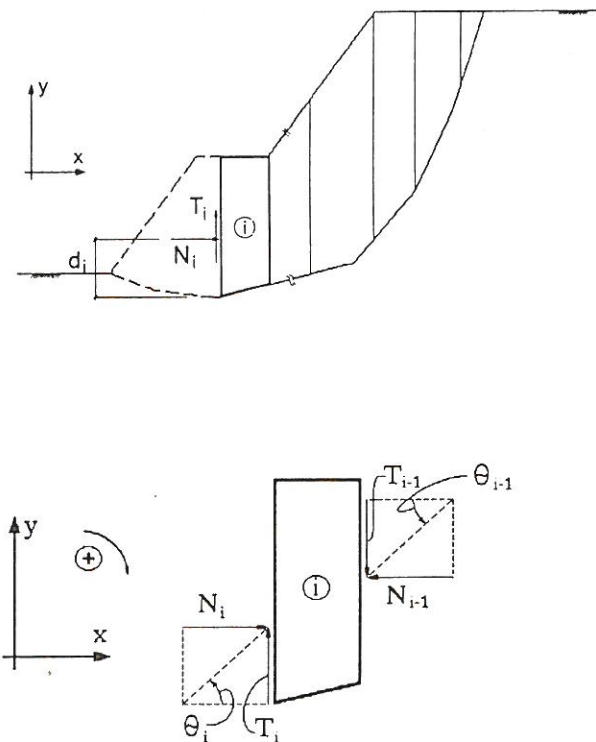
ustrezajo različnim pogojem dreniranja, zavisi, kakšno stabilnostno analizo želimo.



Slika 1: (a) Označevanje pobočja pri stabilnostni analizi pobočij; (b) numerična diskretizacija; označba in dogovor o oznakah

Mehanični učinek vode v porah je upoštevan s pornimi pritiski, učinkujočimi pravokotno na mejne ploskve lamel, ki jih obravnavamo, v kombinaciji s totalnimi gravitacijskimi silami, v katerih je teža vode vključena (Šuklje (1984)). Masa zemljine, za katero mora biti določen varnostni faktor proti zdrsu, je med znanim pobočjem $y_0(x)$ in potencialno drsino $y(x)$. Drsina je izpostavljena razporeditvi totalnih normalnih napetosti $\sigma(x)$. Obe funkciji $y(x)$ in $\sigma(x)$ sta neznan in sta po predpostavki kontinuirani, vendar ni potrebno, da sta pri prehodu iz enega sloja v drugi sloj gladki. Privzeto je, da sta odvoda $y' = dy/dx$ in $\sigma' = d\sigma/dx$ kontinuirana (t.j., $y(x)$ in $\sigma(x)$ sta gladki funkciji) znotraj vsakega sloja.

Za poljubno izbrano drsino je masa med funkcijama $y_0(x)$ in $y(x)$ razdeljena v n lamel (slika (1b)). Drsna ploskev je diskretizirana na n ravnih segmentov, ki določajo osnovne ploskve lamel. Predpostavljeno je, da σ_i deluje v sredini osnovne ploskve lamele i in njegova vrednost predstavlja (prikazuje) razporeditev σ napetosti po lamelni osnovni ploskvi, tako da je $\sigma_i \Delta X_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \sigma dx$, pri čemer je ΔX_i širina lamele i . Podobno deluje tudi pritisk porne vode u_i na sredini ploskve lamele. Z večanjem števila lamel izginejo nenatančnosti zaradi te predpostavke.



Slika 2: (a) Vertikalni prerez skozi drseče telo za določitev strižnih (T) in normalnih (N) medlamelnih sil; (b) dogovor o predznakih

Nadalje je pomembna preiskava, kakšna je zadovoljivost rešitev in zahteva po razporeditvi medlamelnih sil, t.j. njihova velikost, njihov položaj (linija prijemašič medlamelnih rezultantnih sil) in njihov naklon. Ko enkrat določimo $\sigma(x)$, postane stabilnostni problem pobočij določen in lahko izračunamo razporeditev notranjih sil, ki ni bila eksplicitno vpeljana v formulacijo. Slika (2) kaže vertikalni prerez skozi drseče telo in dogovor o

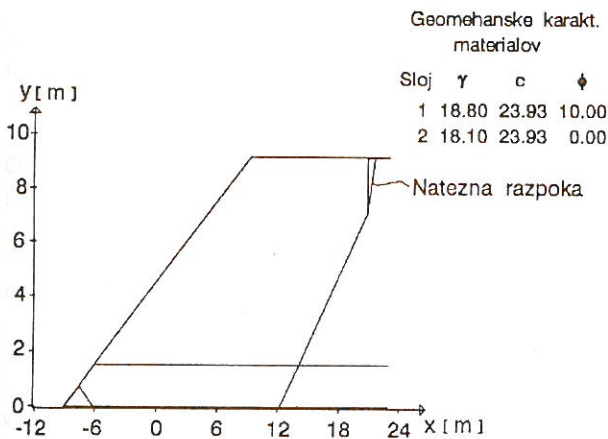
predznakih, uporabljenih pri izračunu medlamelnih sil.

REZULTATI

V nadaljevanju bomo predstavili primer, ki obravnava nehomogeno pobočje. Ta primer je povzet po članku Leshchinsky (1990) zaradi primerjave rezultatov. Ker so v tem članku podani geometrijski podatki le na sliki, je obravnavan primer v predstavljenem računalniškem programu z majhno napako pri vhodnih podatkih tako, da se rezultati ne ujemajo popolnoma z rezultati v omenjenem članku. Razlika je tudi v tem, da računalniški program vsebuje izračun povprečne prostorninske teže v lameli, v članku Leshchinsky (1990) pa so uporabljene približne povprečne vrednosti. Kakorkoli že, navedene drsine niso nujno kritične za predstavljeno metodo.

Primer

Pobočje z nekrožno potencialno drsino je prikazan na sliki 3. Analiziramo drsino s tremi klini z uporabo pristopa totalnih napetosti. Na vrhu je predpostavljena 2.0 m globoka natezna razpoka. Analizirana drsina ni nujno kritična.

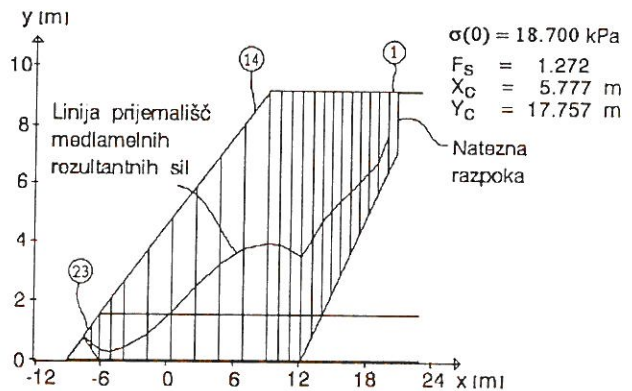


Slika 3: Geometrija zemeljskega profila

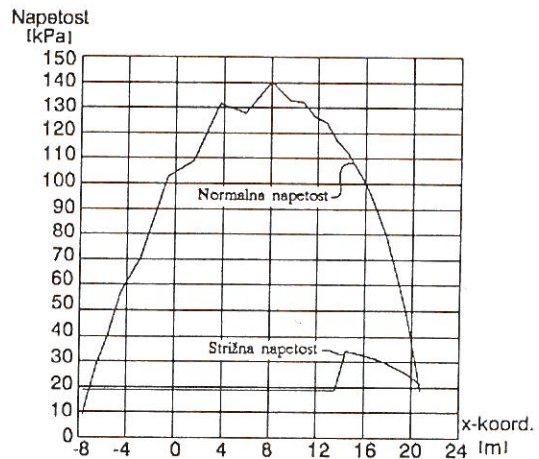
Analiza drsine je dala pri izbrani vrednosti drugega kontrolnega parametra $\sigma_0 = 18.7$ kPa končno vrednost faktorja varnosti enako 1.272. Pri tej vrednosti je bila linija pritiskov najbolj sprejemljiva. Potrebno je tudi navesti, da sta bili specifični teži za zemljini mulj in glina 18.8 oziroma 18.1 kN/m³, medtem, ko je bila v članku Leshchinsky (1990)

uporabljena povprečna vrednost 18.8 kN/m³. V članku je bil izračunan faktor varnosti enak 1.263. Spreminjanje povprečne specifične teže do vrednosti 18.5 kN/m³ pa je dalo rezultat $F_s = 1.282$.

Če opazujemo linijo prijemališč medlamelnih rezultantnih sil (slika 4), se zdi, da bi nekateri odseki bili bolj upravičeni, če bi bile njihove lokacije nižje. To dosežemo, če poleg variranja σ_0 spreminjamo še globino in položaj natezne razpoke.



Slika 4: Linija prijemališč medlamelnih rezultantnih sil



Slika 5: Razporeditev normalne in strižne napetosti

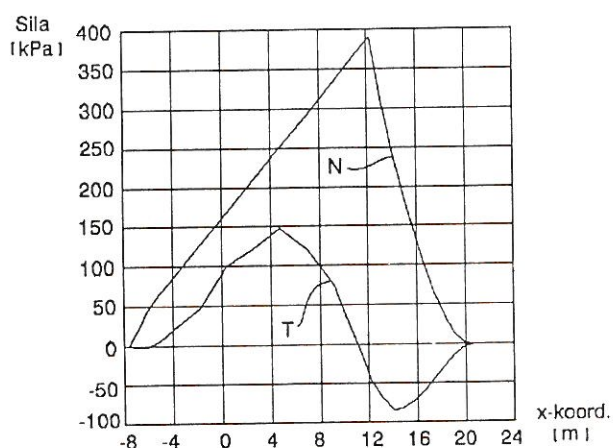
Slika (5) prikazuje razporeditev normalne in strižne napetosti po drsni ploskvi. Paziti je potrebno na diskontinuiteto strižne napetosti, kjer drsina preide iz enega v drugi sloj.

Slika (6) ponazarja razporeditev medlamelne normalne sile (N) in strižne sile (T) (glej sliko 2; definicija in dogovor predznakov). Preverimo lahko,

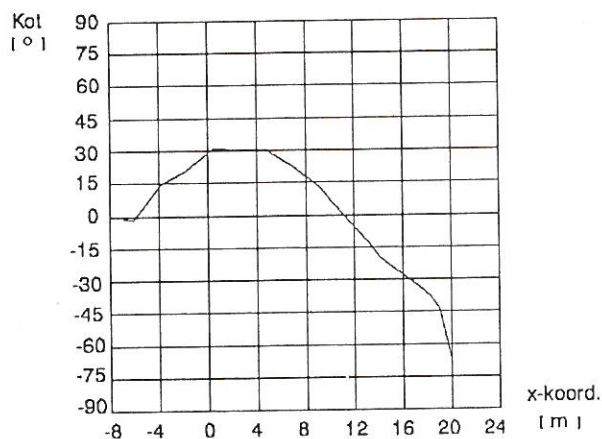
da T ne presega trdnosti zemljine, ki se mobilizira na katerikoli strani lamele.

Slika (7) prikazuje spremembo naklonskega kota θ po dolžini drseče mase.

Ker je F_s v metodi določen s pomočjo rešitve sistema nelinearnih enačb, moramo najprej uganiti korene. Iz prejšnjega je očitno, da je takšno ugibanje vedno težje, ko se povečuje število lamel (t.j., število neznank, ki jih je potrebno uganiti, je enako $(2n+3)$). Kot je to pogost primer v numeričnih rešitvah, je bilo spoznano kot primerno začeti z majhnim številom lamel in tako doseči hitro in z relativno lahkoto razumno začetno vrednost rešitve, ki je uporabljena pri večjem številu lamel.



Slika 6: Razporeditev normalne in strižne komponente medlamelne sile



Slika 7: Razporeditev naklona medlamelnih sil

ZAKLJUČEK

Izdelan je računalniški program za stabilnostno analizo pobočij, na osnovi splošne teorije, ki bazira na variacijski analizi mejnega ravnotežja Baker in Garber (1978).

Faktor varnosti F_s , kot tudi diskretizirana normalna napetost σ_0 po drsni ploskvi so dobljeni kot koreni sistema $(2n+3)$ nelinearnih simultanih enačb.

Kot pri ostalih splošnih metodah je uporabnost napovedi analize možno ocenjevati s pomočjo določitve medlamelnih sil. Če je položaj, naklon in velikost teh sil presojen kot upravičen, potem je ocenjen faktor varnosti smatran kot dopusten. Drugače lahko s spreminjanjem parametrov (napetost σ_0 in globina natezne razpoke), ki kontrolirata velikost normalne napetosti, izboljšamo situacijo.

LITERATURA

- Baker, R., Garber, M. (1978). "Theoretical analysis of the stability of slopes", *Geotechnique*, 28(4), London, 391-411.
- Bohte, Z. (1987). Numerične metode, Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije, Ljubljana, 64-74.
- Leshchinsky, D. (1990). "Slope stability analysis: generalized approach", *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(5), 851-867.
- Mladenović, N., Spasić, V., Jovanović, M. (1986). Numerički metodi za mikroračunare, NIRO "Tehnička knjiga", Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 162-163, 171-177.
- Šuklje, L. (1984). *Mehanika tal*, 3. izpopolnjena izdaja, Univerza v Ljubljani, FAGG, Ljubljana.
- Vidav, I., Križanič, F. (1991). Navadne in parcialne diferencialne enačbe ter variacijski račun, Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije, Ljubljana, 95-114.