

Samardaković, M. (2005): Stabilnost kosina za ravnu kliznu površinu sa pravolinijskom filtracijom u seizmičkim uslovima, *Zbornik radova naučno-stručnog savetovanja „Geotehnički aspekti građevinarstva“*, SGIT SCG i DMTG SCG, Kopaonik, str.217-222.

STABILNOST KOSINA ZA RAVNU KLIZNU POVRŠINU SA PRAVOLINIJSKOM FILTRACIJOM U SEIZMIČKIM USLOVIMA

Miroljub Samardaković*

**Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, A. Medvedeva 14, Niš,
msam@EUnet.yu*

REZIME: Za analizu stabilnosti kosina sa ravnom kliznom površinom postoje jednostavna analitička rešenja dobijena metodom granične ravnoteže. U literaturi su obično prikazana rešenja za specijalne slučajeve sa stacionarnom filtracijom u vertikalnom i horizontalnom pravcu ili paralelno sa kosinom. U radu su izvedena opšta rešenja za napone i faktore sigurnosti kosina neograničene i konačne visine, sa osvrtom na hidrauličku stabilnost, za proizvoljan pravac filtracije u statičkim i seizmičkim (kvazi-statičkim) uslovima, pogodna za numeričke metode proračuna. Za kosinu neograničene visine data su i rešenja za pet specijalnih slučajeva u homogenom i dvoslojnom tlu, čestih u nasutim objektima.

KLJUČNE REČI: Stabilnost kosina, ravna klizna površina, pravolinijska filtracija, seizmički uticaji

STABILITY ANALYSIS OF SLOPES WITH TRANSLATIONAL FAILURE SURFACES AND STEADY SEEPAGE FLOW IN SEISMICAL CONDITIONS

ABSTRACT: There are simple analytical solutions for stability analysis of translation slides with failures along essentially planar surfaces via limit equilibrium methods. The solutions for special cases with flow either horizontal or parallel to the surface are usually given for the conditions of steady seepage flow. The general solutions for the stress and analysis of gravitational stability of slopes with infinite and finite height are presented in the paper, with reference to the hydraulic stability, for an arbitrary direction of filtration in static and seismic (quasi-static) conditions, convenient for numerical analysis. For the infinite slope, the solutions (analytical and chart diagrams) are given for five special cases in homogenous and two-layer soil, which is expected at earthfill dams.

KEYWORDS: Slope stability, planar slip surfaces, seepage flow, seismic conditions

UVOD

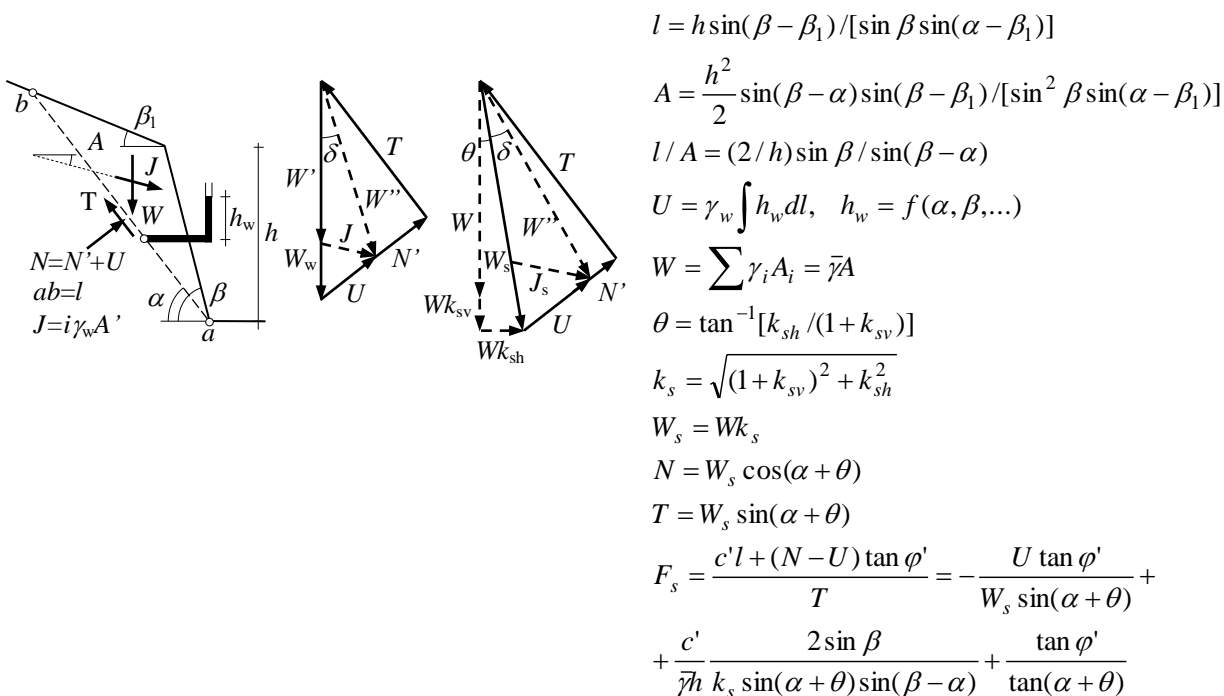
Za dvodimenzionalnu analizu gravitacione stabilnosti kosina neograničene ili konačne visine sa ravnom kliznom površinom u praksi se primenjuju jednostavna analitička rešenja izvedena metodom granične ravnoteže za krutoplastičan materijal i uslov loma Terzaghi-Mohr-Coulomb za efektivne normalne i (totalne) smučuće napone u tlu. Uticajima proceđivanja vode kroz tlo efektivni naponi (porni pritisci) i faktor sigurnosti kosine bivaju izmenjeni a rešenja postaju nešto složenija pa se i za pravolinijsku filtraciju u literaturi obično navode samo za specijalne ili kritične slučajeve.

Rešenja se izvode preko prosečnih napona u kliznoj ravni, određenih iz uslova ravnoteže celog kliznog tela [npr.1,11] ili ravnoteže elementarne prizme u zoni klizanja [npr.10,12]. Za svaki pristup, naponi se mogu odrediti na dva načina (Sl.1): preko totalne gravitacione sile (W) i sile pornog pritiska (U) u zoni smicanja ili preko efektivne gravitacione sile (W') i sile proceđivanja (J) – kao što se i rezultujuća zapreminska sila (W'') od dejstva gravitacije, potiska vode i filtracije određuje na takva dva načina od moguća tri [11]. Prvi način je češći i pogodniji jer se u praksi obično lakše određuje (ili procenjuje) rezultanta pornog pritiska (U) nego sila proceđivanja ($J=i\gamma_w A'$). Drugi način bolje pokazuje efekat filtracije i iz $N'=0$ omogućava izvođenje uslova hidrauličke stabilnosti nevezanog tla za analizirani slučaj.

Za konvencionalne proračune ali i za uvođenje u savremene numeričke postupke smatrali smo korisnim izvođenje (na oba načina) i primenu ‘opštih’ rešenja za faktore sigurnosti kosina *neograničene* i *konačne* visine sa ravnim površinom smicanja i pravolinijskom filtracijom u seizmičkim (kvazistatičkim) uslovima [8], iz kojih se izvode i prikazana rešenja za specijalne slučajeve – za razliku od njihovih pojedinačnih izvođenja, uobičajenih npr. u udžbeničkoj literaturi. Naravno, primena ovih rešenja uslovljena je stepenom uvedenih geometrijskih i fizičkih uprošćenja (svođenje na ravan problem, linearan uslov loma bez deformacija, kvazistatički seizmički uticaji i dr.).

KOSINA KONAČNE VISINE

Rešenje za faktor sigurnosti sa klasičnim uslovom loma duž ravne klizne površine dato je kako sledi, sa geometrijom problema i ravnotežnim poligonima sila za statičke i seizmičke uslove (Sl.1).



Sl.1. Ravnotežni poligoni sila i opšte rešenje za kosinu konačne visine
Fig.1. Equilibrium force polygons and solutions for the finite height slopes

Za poznatu raspodelu pornih pritisaka duž klizne površine i prvi član izraza (U/W_s) može biti iskazan preko geometrijskih karakteristika kosine. Kako se vidi, l/A i F_s (za poznatu silu pornog pritiska U) ne zavise od pada terena (β_1) iznad kosine, što je za statičke uslove bez filtracije naveo još Taylor [11].

Ovom prilikom izvedeno rešenje za faktor sigurnosti kosine neograničene visine, sa klasičnim uslovom loma duž ravne klizne površine, geometrijom problema i ravnotežnim poligonima sila za statičke i seizmičke uslove prikazano je na Sl.3. Analiza uslova pod kojima je merodavna klizna površina paralelna sa kosinom, kao i poređenje pseudo-statičkog i dinamičkog pristupa, mogu se videti u [3]. Treba imati u vidu da kvazistatičkim pristupom npr. nije uveden porast pornog pritiska zbog seizmičkih uticaja, da Wk_{sh} deluje kratko a ne trajno i dr.

Granične vrednosti pojedinih uticaja mogu se odrediti iz uslova granične ravnoteže ($F_s=1$):

$$\frac{c'}{\sigma_v} = k_s \cos \beta \cos(\beta + \theta) [\tan(\beta + \theta) - \tan \varphi] + r_u \tan \varphi'$$

Odavde, za $c' = 0$:

$$r_u = k_s \cos \beta \cos(\beta + \theta) [1 - \tan(\beta + \theta) / \tan \varphi']$$

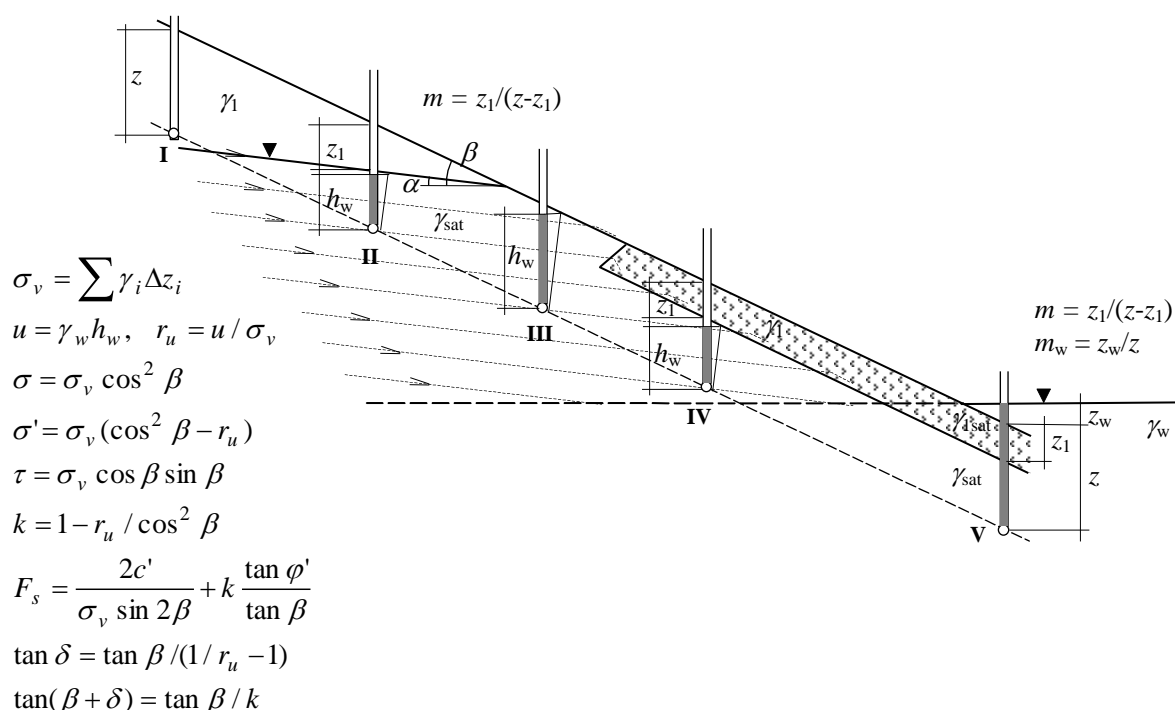
$$\tan \varphi' = \tan(\beta + \theta + \delta)$$

i bez seizmičkih uticaja :

$$r_u = \cos^2 \beta (1 - \tan \beta / \tan \varphi')$$

$$\tan \varphi' = \tan(\beta + \delta)$$

Na osnovu navedenog rešenja za opšti slučaj (Sl.3), na Sl.4 i 5 prikazana su rešenja za pet specijalnih slučajeva (I-V) sa pravolinijskom filtracijom bez seizmičkih uticaja, čestih kod nasutih objekata. U ovim rešenjima sadržana su i sva rešenja za jednostavnije slučajeve, dostupna u literaturi, u sličnoj ili drugačijoj formi data za tlo bez kohezije za slučajeve II [9], III [1,4] i IV [1] ili za koherentno tlo i filtraciju paralelno sa kosinom za slučajeve II [2,12], III [3] i IV [3,7].



Sl.4. Rešenje za kosinu neograničene visine sa pravolinijskom filtracijom bez seizmičkih uticaja i slučajevi I-V
 Fig.4. Solutions for the infinite slopes with right-linear filtration in statical conditions and I-V cases

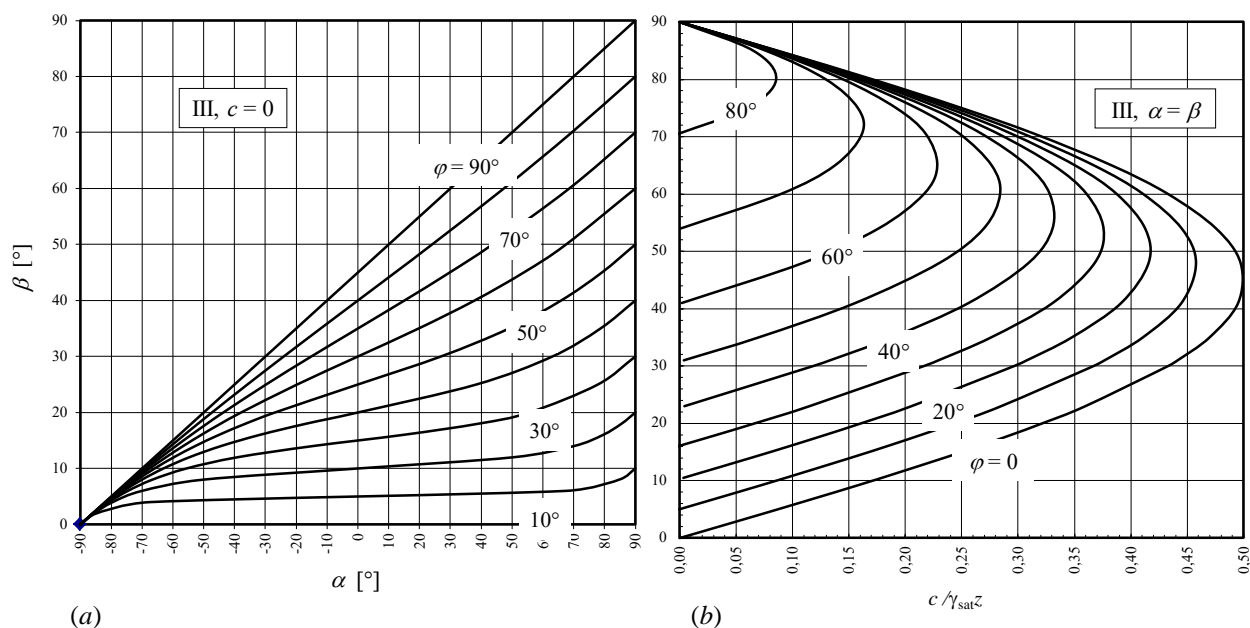
α		I ($z_1=z$)	II ($0<z_1<z$)	III (IV: $z_1=0$)	IV ($0<z_1<z$)
	σ_v	$z\gamma_1$	$z(\gamma_1 m + \gamma_{sat})/(1+m)$	$z\gamma_{sat}$	$z(\gamma_1 m + \gamma_{sat})/(1+m)$
α	i	0	$\sin \alpha$	$\sin \beta \square / \cos(\beta - \alpha)$	$\sin \beta \square / \cos(\beta - \alpha)$
	u	0	$z\gamma_w / [(1 + \tan^2 \beta)(1 + m)]$	$z\gamma_w / (1 + \tan \beta \tan \alpha)$	$z\gamma_w / [(1 + \tan \beta \tan \alpha)(1 + m)]$
	r_u	0	$\frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}} \frac{1}{1 + \tan^2 \alpha}$	$\frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}} \frac{1}{1 + \tan \beta \tan \alpha}$	$\frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}} \frac{1}{1 + \tan \beta \tan \alpha}$
	k	1	$1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}} \frac{1 + \tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \alpha}$	$1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}} \frac{1 + \tan^2 \beta}{1 + \tan \beta \tan \alpha}$	$1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}} \frac{1 + \tan^2 \beta}{1 + \tan \beta \tan \alpha}$
$\pm \pi/2$	r_u	0	–	0	0
	k	1	–	1	1
$\beta \pm \pi/2$	r_u	0	$\frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}} \sin^2 \beta$	∞	∞
	k	1	$1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}} \tan^2 \beta$	$-\infty$	$-\infty$
0	r_u	0	$\frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}}$	$\frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}}$	$\frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}}$
	k	1	$1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}} (1 + \tan^2 \beta)$	$1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}} (1 + \tan^2 \beta)$	$1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}} (1 + \tan^2 \beta)$
β	r_u	0	$\frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}} \cos^2 \beta$	$\frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}} \cos^2 \beta$	$\frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}} \cos^2 \beta$
	k	1	$1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}}$	$1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}} \cong \frac{1}{2}$	$1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_1 m + \gamma_{sat}}$

	V ($0<z_1<z$)	V ($z_1=z$)	V ($z_1=0$)
σ_v	$z[\gamma_w m_w + (\gamma_{1sat} m + \gamma_{sat})/(1+m)]$	$z(\gamma_w m_w + \gamma_{1sat})$	$z(\gamma_w m_w + \gamma_{sat})$
i	0		
u	$z\gamma_w(1+m_w)$		
r_u	$\frac{1+m_w}{m_w + \frac{\gamma_{1sat} m + \gamma_{sat}}{\gamma_w(1+m)}}$	$\frac{1+m_w}{m_w + \frac{\gamma_{1sat}}{\gamma_w}}$	$\frac{1+m_w}{m_w + \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w}}$
k	$1 - \frac{(1+m_w)(1+\tan^2 \beta)}{m_w + \frac{\gamma_{1sat} m + \gamma_{sat}}{\gamma_w(1+m)}}$	$1 - \frac{(1+m_w)(1+\tan^2 \beta)}{m_w + \frac{\gamma_{1sat}}{\gamma_w}}$	$1 - \frac{(1+m_w)(1+\tan^2 \beta)}{m_w + \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w}}$

Sl.5. Rešenja za specijalne slučajeve I-V prema Sl.4
Fig.5. Solutions for special cases I-V according to Fig.4

Za ilustraciju mogućnosti u traženju potrebnih vrednosti pojedinih uticaja za graničnu ravnotežu ($F_s=1$) kosine urađena su dva dijagrama za slučaj III, za tlo bez kohezije (Sl.6a) i za filtraciju paralelno sa kosinom (Sl.6b), inspirisana višestruko stimulativnom knjigom Bolton-a [1].

U literaturi [3,6] navode se za praksu privlačni dijagrami (Hoek,1970 i kasnije) sa rešenjima za ravne klizne površine kosina konačne visine. Interesantna su i rešenja npr. za translatorno klizanje (bloka) sa vertikalnom pukotinom iza kosine [npr.5] ili, u Francuskoj često navođeno, rešenje u vidu dijagrama za kružnocilindričnu površinu smicanja sa pravolinijskom filtracijom proizvoljnog pravca [4], što je izvan predmeta ovoga rada.



Sl.6. Uslov granične ravnoteže za slučaj III (a) u tlu bez kohezije i (b) za filtraciju paralelno sa kosinom
 Fig.6. Limit equilibrium conditions for case III (a) in noncoherent soil and (b) with filtration parallel to the slope

ZAKLJUČAK

Za analizu stabilnosti kosina sa ravnom kliznom površinom postoje jednostavna analitička rešenja dobijena metodom granične ravnoteže, u literaturi obično prikazana za specijalne slučajeve sa stacionarnom filtracijom u vertikalnom i horizontalnom pravcu ili paralelno sa kosinom. U radu su izvedena opšta rešenja za napone i faktore sigurnosti kosina neograničene i konačne visine, sa osvrtom na hidrauličku stabilnost, za proizvoljan pravac filtracije u statičkim i seizmičkim (kvazi-statičkim) uslovima, pogodna za numeričke metode proračuna. Za kosinu neograničene visine data su i rešenja za pet specijalnih slučajeva u homogenom i dvoslojnom tlu, čestih u nasutim objektima.

REFERENCE

- [1] Bolton, M. (1979): *A Guide to Soil Mechanics*. The Macmillan Press, London, 80-87.
- [2] Bromhead, E.N. (1986): *The Stability of Slopes*. Surrey University Press, London, 131.
- [3] Chowdhury, R.N. (1978): *Slope Analysis*. Elsevier, Amsterdam, 86-91, 277-289, 367.
- [4] Costet, J., Sanglerat, G. (1983): *Cours pratique de mécanique des sols*, 2. Dunod, Paris, 313-319.
- [5] Helin, F. i dr. (2002): Modification of Block Theory and its Application. *EJGE*, Vol.7, B.
- [6] Kutter, H.K. (1974): Analytical Methods for Rock Slope Analysis, in *Rock Mechanics* (ed. Müller, L.). Springer, Wien, 210.
- [7] Lee, I.K., White, W., Ingles, O.G. (1983): *Geotechnical Engineering*. Pitman, Boston, 291-294.
- [8] Samardaković, M. (2002): Stability analysis of slopes with translational failure surfaces and steady seepage flow, *Proceedings of the 12th Danube-European Conference "Geotechnical Engineering"*, (Passau, 2002), DGGT, Essen.
- [9] Schultze, E. (1982): Standsicherheit von Böschungen, Chap. 2.6 in *Grundbau Taschenbuch*, 3. Auflage, Teil 2 (ed. U.Smolczyk). W.Ernst&Sohn, Berlin, 268-269.
- [10] Scott, C.R. (1974): *Soil Mechanics and Foundations*. Applied Science Publ., London, 236-238.
- [11] Taylor, D.W. (1954): *Fundamentals of Soil Mechanics*, 7th ed. Wiley, New York, 173, 392.
- [12] Whitlow, R. (1983): *Basic Soil Mechanics*. Construction Press, London, 278-282.