

STABILNOST KOSINA

1. *Primjeri i elementi klizanja kosina*

1.1. Primjeri klizanja kosina

Utvrđivanje stabilnosti kosina je važna i izazovna aktivnost u građevinarstvu. Utvrđivanje uzroka klizanja jedan je od najvažnijih pokretača napretka u razumijevanju složenosti mehaničkog ponašanja tla. Opsežni istraživački napor u zadnjih osamdesetak godina doveli su do racionalno utemeljenih spoznaja koje nam služe za rješavanje praktičnih problema stabilnosti kosina. Usprkos tim naporima, određivanje stupnja stabilnosti kosina i njihovo ekonomično projektiranje i dalje ostaje izazov geotehničkoj struci. Tomu svjedoče povremene pojave nestabilnosti, bilo prirodnih kosina bilo kosina koje su rezultat građevinskih zahvata, usprkos primjeni suvremenih spoznaja struke. Iz tog razloga istraživanja ne prestaju, a istraživanja uzroka nastalih klizanja daju jedinstvenu priliku za provjeru i unapređenje postojećeg znanja. U nastavku će se prikazati nekoliko znanih i neznanih klizišta i pojava nestabilnosti kosina.

Izgradnja Panamskog kanala, koji presijeca američki kontinent i spaja Atlantski s Tihim oceanom, predstavljala je početkom dvadesetog stoljeća jedan od najvećih građevinskih poduhvata. Već tijekom njegove izgradnje pojavila su se velika klizanja tla koja su dovela do velikih zastoja i bitnog poskupljenja radova.

Slika 13-1 prikazuje klizanje bokova usjeka pri iskopu Panamskog kanala iz 1913. godine, kada je pokrenut volumen tla veći od 13 milijuna kubičnih metara. Tijekom čitavog trajanja kanala pojavljivala su se brojna klizanja tla koja su bitno otežavala gradnju, usporavala i poskupljivala radove. Još i danas, mnogo desetljeća nakon dovršetka njegove gradnje, javljaju se povremeno klizanja bokova kanala što je konačno primoralo njegovu upravu da postavi trajnu službu stručnjaka za praćenje i sanaciju klizišta.

Manjih razmjera, ali ne manje spektakularna, su posljedice klizanja tla u naseljenim mjestima koje prikazuje slika 13-2. Jedno klizište u Kaliforniji, izazvano potresom, prikazuje slika 13-3. Nestabilnosti na usjecima prikazuje slika 13-4.

U listopadu 1963. velika katastrofa praktički je izbrisala naselje Langaronne u talijanskim Dolomitima (oko 100 km sjeverno od Venecije). Tristo tisuća kubnih metara stijene i tla kliznulo je u akumulacijsko jezero netom završene lučne betonske brane Vajont (slika 13-5). Vodni val preko sto metara visine zapljusnuo je preko brane (koja je ostala gotovo čitava!), te praktički izbrisao nizvodno naselje usmrivši preko dvije tisuće mještana. Još se danas u stručnoj literaturi analiziraju mogući uzroci ove tragedije.

Klizanje velike mase rudarske jalovine, nasipane iznad mjesta Aberfan u Velikoj Britaniji, usmrtio je 1966. godine nekoliko desetaka mještana (slika 13-6).



Slika 13-1. Panamski kanal: klizanje 13 milijuna kubičnih metara tla pri iskopu bokova kanala (1913. godina)



Slika 13-2. Posljedice klizanja u naseljenom mjestu



Slika 13-3. Klizište u Kaliforniji izazvano potresom



Slika 13-4. Klizanja tla na kosinama usjeka



Slika 13-5. Klizanje tristo milijuna kubičnih metara stijene i tla u akumulacijsko jezero netom završene lučne brane Vajont u talijanskim Dolomitima (oko 100 km sjeverno od Venecije) prouzročilo je u listopadu 1963. godine vodni val visine preko 100 m, koji je nakon prelijevanja brane (koja je ostala gotovo neoštećena!) doslovce izbrisao nizvodni gradić Langaronne i usmrtio preko 2000 njegovih žitelja.



Slika 13-6. Veliko klizište na nasipu rudarske jalovine u Aberfanu (Velika Britanija) 1966. godine koje je usmrtilo nekoliko desetaka ljudi

Posebno su poznata klizanja obalnih konstrukcija, usjeka i željezničkih nasipa u Švedskoj. Nakon jednog posebno katastrofalnog rušenja 1913. godine, kada je 185 m željezničkog nasipa otklizalo u obližnje jezero, osnovana je Geotehnička komisija državnih željeznica (tu je prvi put uveden naziv „geotehnika“) da istraži uzroke brojnih klizanja i predloži rješenja. Njihov izvještaj, završen 1922. godine, smatra se prvim sveobuhvatnim geotehničkim izvještajem. U njemu su predložene nove metode vađenja i ispitivanja uzoraka tla kao i metode proračuna stabilnosti kosina. U ovim istraživanjima zapaženu je ulogu imao profesor W. Fellenius, koji je predložio i prvu racionalnu metodu proračuna stabilnosti kosina, i pod kojim imenom je ta metoda ušla u kasniju praksu. Ovi rani radovi u Švedskoj prvi su značajni koraci geotehničkog inženjerstva koje se time razvija u zasebnu granu građevinarstva.

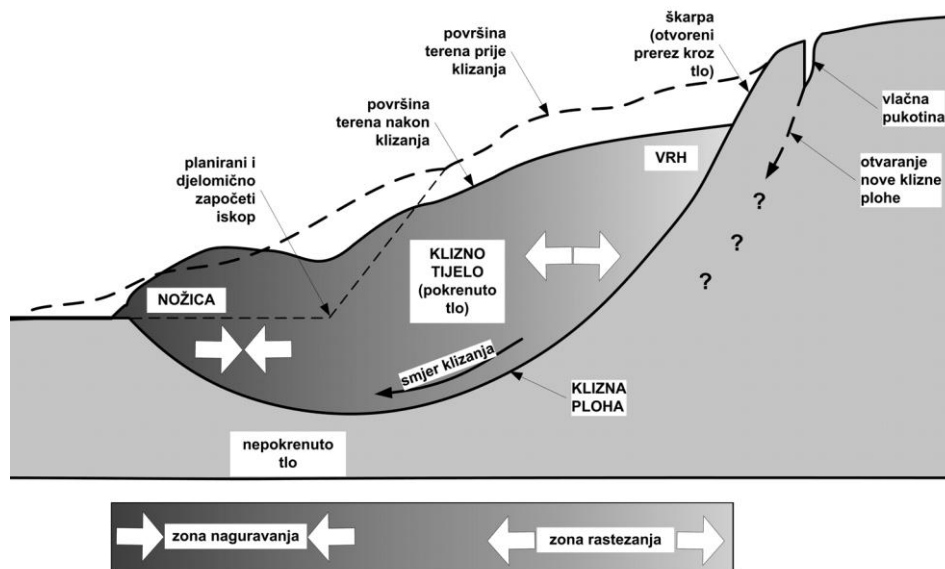
Ni građevinska praksa u Hrvatskoj nije bila pošteđena klizišta i nestabilnosti kosina. Posebno je poznato klizište Zalesina u Gorskom Kotaru na željezničkoj pruzi Zagreb-Rijeka, kao i mnoga klizišta na podsljemenskim obroncima Medvednice kod Zagreba. Sustavno se tim problemom u Hrvatskoj počeo baviti profesor E. Nonveiller, koji je svoja brojna praktična iskustva sažeo u posebnoj knjizi (Nonveiller 1987), prvij takvoj na hrvatskom jeziku.

Poseban poticaj proučavanju uzroka klizanju čine nasute brane, vrlo zahtjevne i skupe građevine. Ekonomska potreba za korištenjem lokalno raspoloživog tla kao i za što većom

uštedom količina ugrađenog tla, traže njihovo racionalno projektiranje. Brojne uspješno izgrađene brane, ponekad i impresivnih dimenzija, dokazuju praktičnu uporabivost našeg znanja o problemima stabilnosti kosina, ali rijetka, i posljedicama često zastrašujuća, rušenja upućuju da to znanje nije savršeno. Istraživanja koja slijede nakon takvih kalvarija i dalje unapređuju struku.

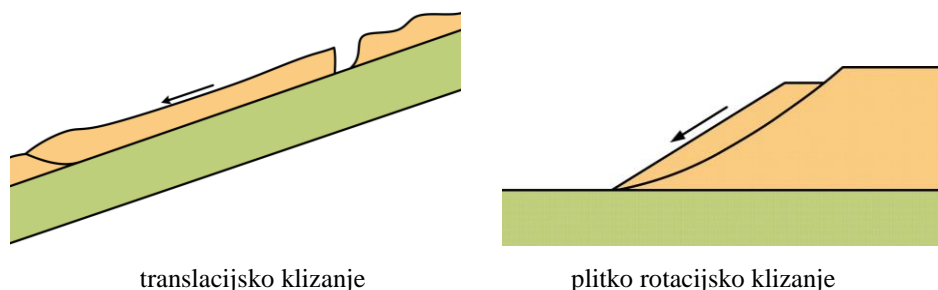
1.2. Klizno tijelo, klizna ploha, klizište i oblici klizanja

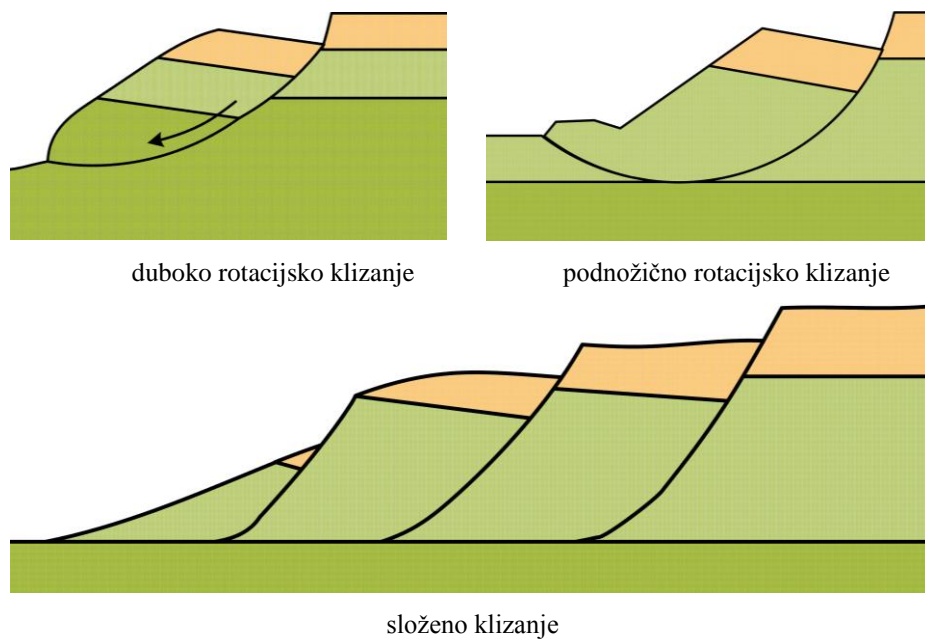
Iskustvo i opažanja ukazuju da se nestabilnost kosina u većini slučajeva očituje kao klizanje mase tla, *kliznog tijela*, po ravnoj ili zakrivljenoj *kliznoj plohi* (slika 13-7). Pri tome se u donjem dijelu kliznog tijela (pri *nožici*) tlo naguravanjem zbija, dok se u gornjem dijelu (pri *vrhu*) ono razrahljuje. Zbog vlačnih naprezanja u vrhu i zanemarive vlačne čvrstoće tla obično se, posebno u slučaju sitnozrnatih tala, otvara vlačna pukotina koja se, zbog smjera gibanja, može pri površini otkriti kao škarpa. Pojava takve pukotine jasan je znak nestabilnosti kosine već u ranoj fazi njenog nastanka. Pojava vlačne pukotine upućuje da se ona može nastaviti u novu kliznu plohu. Područje samog kliznog tijela kao i neposredna okolina oko njega naziva se *klizištem*.



Slika 13-7. Elementi nestabilnosti na kosini

Slika 13-7 prikazuje primjer jednostavnog klizišta, u kojem se pojavljuje jedno klizno tijelo i jedna, relativno pravilna klizna ploha. U drugim prilikama i za druge vrste tla mogući su i brojni drugi oblici klizanja (slika 13-8).



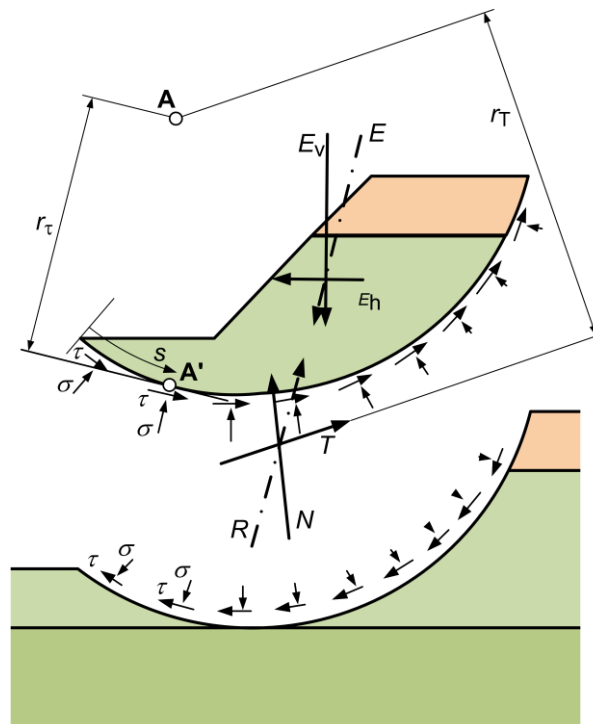


Slika 13-8. Primjeri različitih oblika klizanja kosina u tlu

2. Mehanizam klizanja

2.1. Analiza opterećenja i uvjeti globalne ravnoteže

U traženju uzroka nastalih klizanja ili u traženju uvjeta koji moraju biti ispunjeni da bi došlo do klizanja, uobičajeno je krenuti od analize opterećenja koja djeluju na već pokrenuto ili potencijalno klizno tijelo. Pri tome se gotovo redovito problem pojednostavljuje, pa se stvarno trodimenzionalna geometrija klizišta zamjenjuje dvodimenzionalnom u vertikalnom presjeku kroz kosinu u smjeru klizanja (slika 13-9). Rasprostiranje klizišta u takvom dvodimenzionalnom modelu je beskonačno u smjeru treće dimenzije, okomite na vertikalni presjek. Budući da se klizanje odvija u ravninama vertikalnog presjeka, model uključuje uvjet ravninskog stanja deformacija.



Slika 13-9. Opterećenja na klizno tijelo

Na klizno tijelo, s jedne strane djeluje akcija E (strelica iznad simbola označava vektor), koju čini prvenstveno težina samog kliznog tijela (vertikalna sila), zajedno s ostalim mogućim opterećenjem pri površini kosine (kao što su, primjerice, građevine), zatim moguće inercijalno opterećenje od potresa (horizontalna sila), a s druge strane sila otpora (reakcija) R , kao rezultanta naprezanja koja djeluju duž klizne plohe. U nekim slučajevima mogu se ovim silama pridružiti i sile od različitih građevinskih elemenata koje pridržavaju kosinu, kao što su sidra, potporne konstrukcije, piloti i slično. Prema zakonu mehanike, akcija i reakcija su jednake, ali suprotnog smjera (izražene kao vektori)

$$E = -R \quad (13.1)$$

Ponekad je povoljno silu reakcije R rastaviti na dvije komponente: rezultantu N normalnih naprezanja σ i rezultantu T posmičnih naprezanja τ

$$R = N + T \quad (13.2)$$

Dok je u svakom konkretnom slučaju, akciju E moguće odrediti iz poznate geometrije i jedinične težine tla γ , raspodjelu i veličine normalnih i posmičnih naprezanja duž klizne plohe moguće je odrediti tek na temelju poznate krutosti materijala u kliznom tijelu i u nepokrenutom dijelu tla, jer je, prema terminologiji statike neodređenih sustava, klizno tijelo na nepokrenutom tlu statički neizmerno neodređen sustav. Neodređenost se očituje u tome što bez uvažavanja krutosti kliznog tijela i podloge postoji beskonačan broj različitih raspodjela normalnih i posmičnih naprezanja duž klizne plohe od kojih je svaka u ravnoteži s istom akcijom E prema uvjetu ravnoteže iz jednadžbe (13.1). Ili drugim riječima, rješenje problema raspodjele naprezanja duž klizne plohe bez uvažavanja krutosti kliznog tijela i

krutosti podloge nema jednoznačno rješenje. Upravo način rješavanja problema određivanja raspodjele naprezanja u kliznoj plohi u ovakvom statički neodređenom sustavu razlikuje različite metode analize stabilnosti. Ove se metode mogu podijeliti u dvije odvojene grupe. U prvu grupu spadaju analize koje koriste mehaniku neprekidnih i deformabilnih tijela (egzaktne metode), a u drugu spadaju metode granične ravnoteže koje koriste mehaniku potpuno krutih tijela uz uvođenje više ili manje proizvoljnih pretpostavki kojima se uklanja statička neodređenost sustava. U ovom poglavlju opisat će se i raspraviti samo ove druge metode, pretežno korištene u praksi.

2.2. Drenirano i nedrenirano stanje

Zbog promjene opterećenja ili nekog drugog uzroka, o kojima će kasnije biti više riječi, dio kosine se pokreće (klizno tijelo), a u tlu se razvijaju deformacije (koje se, međutim, u metodi granične ravnoteže ne uzimaju u obzir).

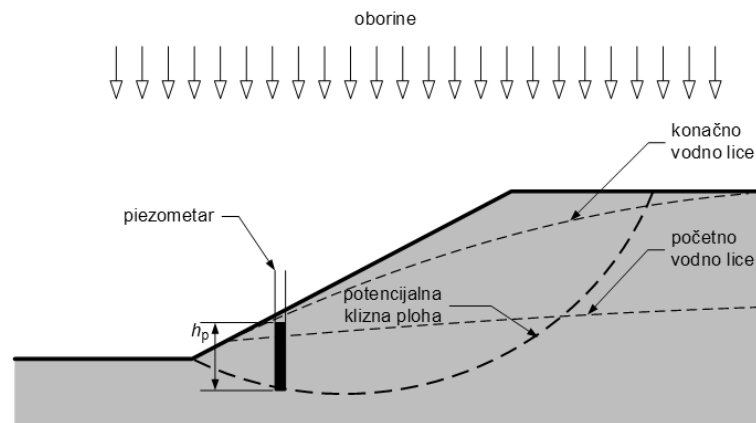
Drenirano stanje se odnosi na stacionarno ili gotovo stacionarno stanje deformacija i tečenja vode. U tom se slučaju volumen vode s vremenom ne mijenja ni u kojem mjestu u tlu, pa su zadovoljeni uvjeti stacionarnog tečenja. U dreniranom stanju obično se nalaze sva krupnozrnata tla s malo sitnih čestica, pri uobičajenim brzinama gradnje i korištenja građevina, te sitnozrnata tla nakon dugotrajnog stalnog opterećenja. Za analizu stabilnosti kosina u dreniranom stanju, koriste se efektivni parametri čvrstoće tla.

Nedrenirano stanje tla je ono u kojem je propusnost tla mala, pa se deformacije odvijaju pri konstantnom ili približno konstantnom volumenu u svim dijelovima tla. Takvo stanje praktički odgovara onom koje se susreće u sitnozrnatim vodom potpuno zasićenim tlima, prvenstveno glinama, pri većoj brzini izgradnje građevine. Takvo stanje je obično prisutno kod sitnozrnatih tala tijekom brže izgradnje građevinskog zahvata te kod krupnozrnatih tala pri kratkotrajnom opterećenju, kao što je potres. Za analizu stabilnosti kosina u nedreniranom stanju, koristi se nedrenirana čvrstoća tla.

2.3. Uzroci klizanja

Temeljni uvjet stabilnosti kosina je veća čvrstoća tla od posmičnog naprezanja potrebnog za održavanje ravnoteže potencijalnog kliznog tijela. Iz toga slijedi da je temeljni uzrok nastanka nestabilnosti kosina nedovoljna posmična čvrstoća tla koja je iz nekog razloga manja od posmičnog naprezanja potrebnog za održavanje ravnoteže kliznog tijela. To se može dogoditi zbog jednog od sljedeća dva razloga ili zbog njihove kombinacije: ili je čvrstoća pala, iz nekog razloga, ili je, iz nekog razloga, poraslo posmično naprezanje. Kako je čvrstoća funkcija normalnog efektivnog naprezanja, a ovo pak razlika normalnog naprezanja i pornog tlaka, moguće su mnogobrojne kombinacije uzroka koje dovode do nestabilnosti kosina.

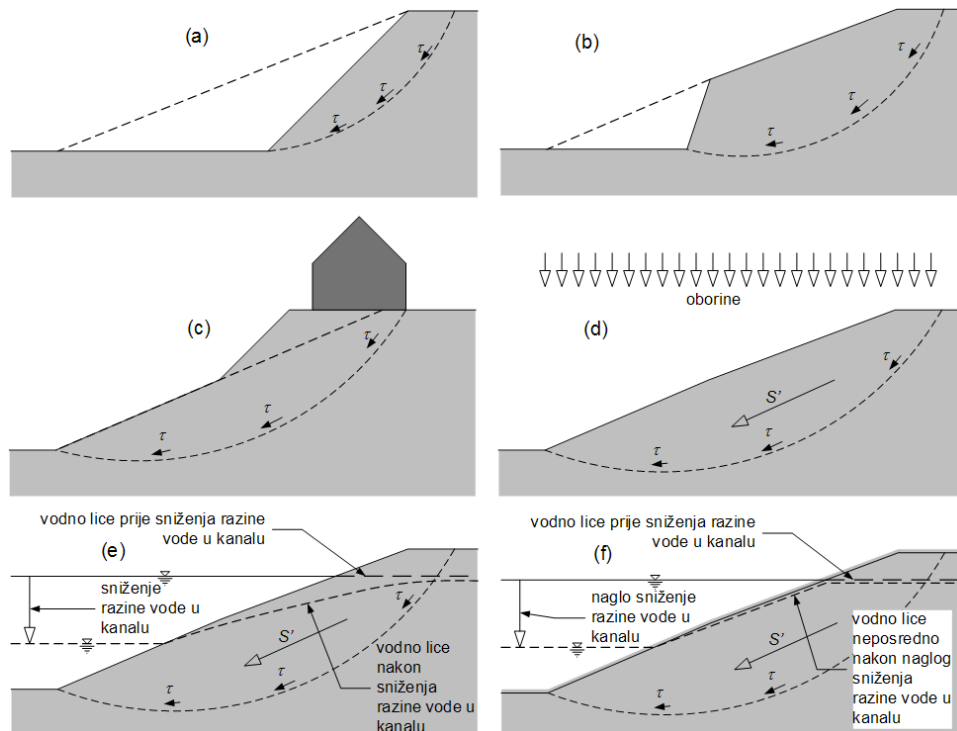
Najvažniji uzrok pada čvrstoće je porast pornog tlaka u tlu kosine. Slika 13-10 prikazuje kosinu izloženu oborinama koje dižu početnu razinu vodnog lica, te time povećavaju porne tlakove u kosini. Budući da normalno ukupno naprezanje u točkama potencijalne klizne plohe ostaje nepromijenjeno, porast pornih tlakova izaziva pad normalnih efektivnih naprezanja, a time i čvrstoće.



Slika 13-10. Porast poreznog tlaka i pada čvrstoće u kosini uslijed oborina

Drugi faktor koji dovodi do nestabilnosti kosina je povećanje posmičnih napreznja na potencijalnoj kliznoj plohi. Slika 13-11 prikazuje nekoliko takvih tipičnih slučajeva. To su zakošenje kosine (a), zasijecanje u njoj nožici (b), opterećenje gornjeg dijela kosine (c) i povećanje sile strujanja podzemne vode izazvane nepovoljnom promjenom strujanja podzemne vode od, primjerice, utjecaja kiše (d). Primjeri (e) i (f) iz razmatrane slike predstavljaju druge moguće slučajeve povećanja posmičnih napreznja uslijed promjene režima tečenja podzemne vode. Primjer (e) prikazuje slučaj postupnog sniženja razine vode u kanalu ili jezeru. Dok na površini tla u kanalu postupno pada hidraulički potencijal vode uslijed sniženja razine vode u kanalu, u široj okolini kanala zadržava se ranija razina podzemne vode i pripadnog potencijala. Ovaj pad potencijala prema kanalu izaziva tečenje vode i pripadnu strujnu silu S' u kliznom tijelu. Ako je sniženje u kanalu sporo, strujanje podzemne vode odgovara stacionarnom stanju za trenutne rubne uvjete potencijala. Ako je sniženje vode naglo i brzo, javlja se slučaj sa slike (f) koji je nepovoljniji od slučaja postupnog sniženja vode (e). U slučaju naglog sniženja vodno lice u tlu ne može odmah pasti na stacionarni oblik iz slike (e) jer za to treba određena količina vode isteći iz tla u kanal. To će se s vremenom ostvariti pa će geometrija strujanja preći u onu sa slike (e). Dok se to ne ostvari, najnepovoljniji trenutak za stabilnost kosine je onaj neposredno nakon naglog sniženja vode u kanalu kad raspored potencijala daje najnepovoljniju raspodjelu poreznih tlakova i izaziva najveću strujnu silu S' . Opisani slučajevi postupnog ili naglog sniženja vode u kanalu događaju se i u dobro propusnim tlima, u kojima je konsolidacija mnogo brža od promjene opterećenja. U slabo propusnim tlima na opisane procese dodaje se proces odgođenog klizanja uslijed konsolidacije.

Ovo razmatranje upućuje na svu složenost uzroka koji dovode do nestabilnosti ili klizanja kosina i koje u praksi bez detaljnih, savjesnih i opsežnih istraživanja često nije moguće jasno i precizno utvrditi.



Slika 13-11. Utjecaji koji povećavaju posmična naprezanja u zoni potencijalne klizne plohe na kosini: (a) zakošenje kosine, (b) zasijecanje u nožici kosine, (c) nasipavanje i opterećenje u gornjem dijelu kosine, (d) oborine ili drugi uzrok koji izaziva dodatno tečenje u tlu niz kosinu, zbog čega raste sila strujnog tlaka S' , (e) pojava strujne sile uslijed strujanja podzemne vode prema kanalu od postupnog sniženja vode u kanalu, (f) pojava strujne sile uslijed strujanja podzemne vode od naglog sniženja vode u kanalu (nepovoljnije strujanje i veća strujna sila S' od one iz slučaja (e)).

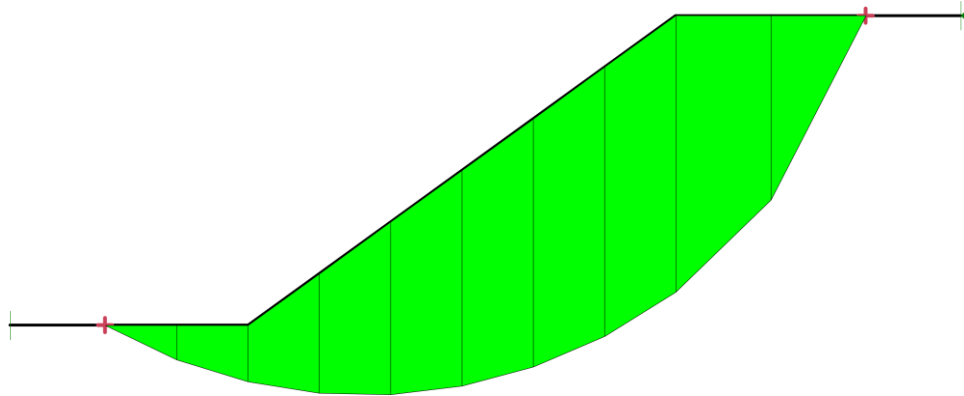
3. Analiza stabilnosti metodama granične ravnoteže

3.1. Metoda granične ravnoteže i pretpostavke

Analize stabilnosti zemljanih građevina najstariji su numerički postupci u geotehničkom inženjerstvu. Počeci se naziru početkom 20. stoljeća u proračunu stabilnosti jednog keja u Švedskoj. Klizna masa s kružnom kliznom plohom razdijeljena je u vertikalne lamele, a proračun stabilnosti proveden je metodom granične ravnoteže uz znatna pojednostavljenja. Od tada se metoda znatno razvila, ušla u široku praktičnu primjenu, a kako se pokazala vrlo uspješnom, i danas se gotovo isključivo koristi za provjeru stabilnosti kosina i drugih zemljanih građevina.

Metodom granične ravnoteže analizira se stabilnost zamišljenog ili stvarnog kliznog tijela koje je u sučelju s okolnim tlom preko klizne plohe. Klizno se tijelo razdijeli na niz od n vertikalnih lamela (slika 13-12). Sustav takvih lamela, bez uvođenja pretpostavki o njihovoj krutosti, statički je neodređen. Analizom uvjeta ravnoteže sila koje djeluju na svaku od lamela te uvođenjem pretpostavki, zbog uklanjanja statičke neodređenosti sustava, utvrđuje se veličina posmičnog i normalnog naprezanja duž klizne plohe, odnosno na osnovici svake lamele. Pretpostavke koje se u metodu unose radi uklanjanja statičke neodređenosti ne odnose se na krutost tla pa su stoga više ili manje proizvoljne. Kako su se u praksi pokazale relativno

uspješnima, zanemarena krutost tla čini se praktično prihvatljivom.



Slika 13-12. Klizno tijelo podijeljeno u vertikalne lamele za primjenu metode granične ravnoteže

Stupanj stabilnosti, u metodama se granične ravnoteže utvrđuje usporedbom posmične čvrstoće i posmičnog naprezanja duž klizne plohe. Za mjeru stupnja stabilnosti uobičajeno se uvodi pojam *faktora sigurnosti*, F , koji se definira kao odnos posmične čvrstoće, τ_f , i posmičnog naprezanja, τ

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (13.3)$$

Iz ove definicije faktora sigurnosti slijedi da na kliznoj plohi nije došlo do sloma tla, ako je $F > 1$, a slom nastupa za slučaj $F = 1$. Iz analiza ponekad može slijediti i vrijednost $0 \leq F < 1$, ali taj rezultat, zbog činjenice da je najveća moguća vrijednost posmičnog naprezanja upravo posmična čvrstoća, ukazuje da na promatranoj lameli nisu uspostavljeni uvjeti ravnotežne. Dakle, općenito se može pisati

$$\begin{aligned} F > 1 & \rightarrow \text{stabilno stanje} \\ F = 1 & \rightarrow \text{stanje sloma, nestabilno stanje} \\ 0 \leq F < 1 & \rightarrow \text{neravnotežno stanje} \end{aligned} \quad (13.4)$$

Jedna od spomenutih pretpostavki, koje služe za uklanjanje statičke neodređenosti sustava lamela, a koja je zajednička svim varijantama metode granične ravnoteže, pretpostavka je o konstantnosti faktora sigurnosti, F , duž klizne plohe kliznog tijela (što znači, za svaku lamelu).

Određivanjem faktora sigurnosti utvrđuje se stabilnost jednog zamišljenog ili stvarnog kliznog tijela. U slučaju projektiranja kosina, moguće klizno tijelo nije unaprijed određeno, već treba tražiti ono s najmanjim faktorom sigurnosti. Tek je to klizno tijelo mjerodavno za ocjenu stabilnosti čitave kosine jer je ono „najbliže“ nestabilnom stanju ili slomu. Faktor sigurnosti tog kliznog tijela može se definirati kao faktor sigurnosti čitave kosine. Iz ovog razmatranja slijedi da se praktična primjena metode granične ravnoteže sastoji od pronalaženja kliznog tijela s najmanjim faktorom sigurnosti. Klizna ploha koja pripada kliznom tijelu s najmanjim faktorom sigurnosti obično se naziva *kritičnom kliznom plohom*.

vodom, na klizno tijelo u toj zoni djeluje rezultanta hidrostatičkog tlaka vode označena s A_D . Na slici 13-13 označeni su i krakovi navedenih sila u odnosu na točku C (središte rotacije kliznog tijela), obzirom na koju će se provjeravati ravnoteža momenata sila.

Tablica 13-1 popisuje broj nepoznatih veličina sila i njihovih hvatišta u kliznom tijelu razdijeljenom na n uspravnih lamela. Tablica 13-2 popisuje broj jednadžbi ravnoteže u sustavu s n lamela. Usporedbom ukupnog broja nepoznanica i broja jednadžbi ravnoteže slijedi da sustav od n lamela ima $6n - 3 - 3n = 3n - 3$ nepoznanica više od broja raspoloživih jednadžbi pa kažemo da je sustav $3n - 3$ puta statički neodređen. Upravo je toliko novih pretpostavki potrebno da bi se sustav pretvorio u statički određeni.

Tablica 13-1. Nepoznanice u kliznom tijelu s n lamela

Opis nepoznanice	oznaka	broj
Normalna sila na osnovici lamele (rezultanta normalnog naprezanja σ)	N	n
Hvatište sile N	-	n
Tangencijalna sila na osnovici lamele (rezultanta posmičnog naprezanja τ)	S	n
Normalna sila između dviju lamela	X	$n - 1$
Tangencijalna sila između dviju lamela	Y	$n - 1$
Hvatište sile X	-	$n - 1$
Ukupno nepoznanica		$6n - 3$

Tablica 13-2. Broj jednadžbi ravnoteže sustava od n lamela

Jednadžbe ravnoteže lamela	broj
Zbroj sila u horizontalnom smjeru	n
Zbroj sila u vertikalnom smjeru	n
Zbroj momenata sila obzirom a točku C	n
Ukupno jednadžbi ravnoteže	$3n$

Pretpostavka o jednakom faktoru sigurnosti, F , duž klizne plohe uvodi preko Mohr-Coulombovog zakona, $\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \varphi'$, n jednadžbi oblika

$$S = C + (N - U) \tan \varphi' / F \quad (13.5)$$

gdje je $S = \tau b$, $C = c' b$, $N = \sigma b$, $U = ub$, ali i jednu novu nepoznanicu, faktor sigurnosti F .

Osim toga, uobičajeno se uvodi pretpostavka da je hvatište sile N na sredini lamele, čime se broj nepoznanica smanjuje za n . Nadalje, *opća metoda granične ravnoteže* uvodi pretpostavku o nagibu međulamelarnih sila u obliku (Morgenstern i Price, 1965)

$$\frac{Y}{X} = \lambda f(x) \quad (13.6)$$

pri čemu je λ nova nepoznanica, a $f(x)$ neka izabrana, dakle poznata funkcija horizontalne udaljenosti bokova lamele od početka klizne plohe. Kao što pokazuje tablica 13-3, ovim pretpostavkama izjednačuje se broj nepoznanica i raspoloživih jednadžbi u općoj metodi

granične ravnoteže pa sustav od n lamela postaje statički određen i može se riješiti.

Tablica 13-3. Provjera statičke određenosti sustava od n lamela u općoj metodi granične ravnoteže

Opis nepoznanice ili dodatne pretpostavke	oznaka	broj
Preostali višak nepoznanica u odnosu na broj jednadžbi iz tablica 13-1 i 13-2	-	$3n - 3$
Faktor sigurnosti	F	1
Faktor λ	λ	1
Mohr-Coulombov zakon čvrstoće, izraz (13.5)	-	$-n$
Funkcija nagiba međulamelarnih sila	$f(x)$	$-(n - 1)$
Hvatište sila N na sredini osnovice lamele	-	$-n$
Ukupno višak nepoznanica nad brojem jednadžbi		0

3.2.2. Jednadžbe ravnoteže i njihovo rješenje

Za svaku lamelu sa slike 13-13, mogu se postaviti tri jednadžbe ravnoteže: vektorski zbrojevi svih sila u horizontalnom smjeru, vektorski zbrojevi svih sila u vertikalnom smjeru i zbroj svih momenata sila obzirom na točku C , moraju biti jednaki nuli.

Iz globalne jednadžbe ravnoteže u horizontalnom smjeru (x), dobije se rješenje za faktor sigurnosti (oznaka zbroja, Σ , označava da se veličine iza oznake zbrajaju preko svih lamela)

$$F_x = \frac{\Sigma(C \cos \alpha + (N - U) \tan \varphi' \cos \alpha)}{\Sigma N \sin \alpha + \Sigma H - \Sigma D \cos \omega + A_L - A_D} \quad (13.7)$$

Iz globalne jednadžbe momenata sila, dobije se rješenje za faktor sigurnosti

$$F_m = \frac{\Sigma(Cs + (N - U) \tan \varphi \hat{)}{\Sigma Vv - \Sigma Nn + \Sigma Hh + \Sigma Dd + A_L a_L - A_D a_D} \quad (13.8)$$

U općem slučaju, uz neku zadanu funkciju nagiba međulamelarnih sila $f(x)$, postupak rješavanja nepoznanica navedenih jednadžbi provodi se iterativno u tri razine:

1. U prvoj razini odredi se početna vrijednost faktora sigurnosti, zanemarujući međulamelarne sile, dakle uz $\Delta X = 0$ i $\Delta Y = 0$ ($\Delta X = X_L - X_D$; $\Delta Y = Y_L - Y_D$). Za to može poslužiti izraz (13.8) za faktor sigurnosti iz ravnoteže momenata, u koji se za normalne sile N na osnovicama lamela koristi izraz

$$N = V \cos \alpha - H \sin \alpha + D \cos(\omega - 90^\circ + \alpha) \quad (13.9)$$

Ova početna vrijednost faktora sigurnosti koristit će se za računanje izraza u sljedećoj razini iteracije.

2. Druga razina iteracije ponavlja se za svaku proizvoljnu vrijednost varijable λ , s tim da

je neposredno nakon prve razine, obično $\lambda = 0$. Za izabranu se vrijednost λ kao i za vrijednost faktora sigurnosti iz prethodne iteracije izračunaju nove vrijednosti faktora sigurnosti F_x i F_m iz izraza (13.7) i (13.8), s tim da se normalna sila na osnovici lamela računa iz izraza

$$N = \frac{V - \Delta Y - \frac{\sin \alpha}{F} (C - U \tan \varphi') + D \sin \omega}{m_\alpha} \quad (13.10)$$

gdje je

$$m_\alpha = \cos \alpha + \frac{1}{F} \sin \alpha \tan \varphi' \quad (13.11)$$

U izrazu (13.10), nepoznata je veličina razlike vertikalnih međulamelarnih sila ΔY . Nove veličine međulamelarnih sila, u svakom se koraku ove razine iteracije računaju iz vektorskog zbroja svih sila u horizontalnom smjeru

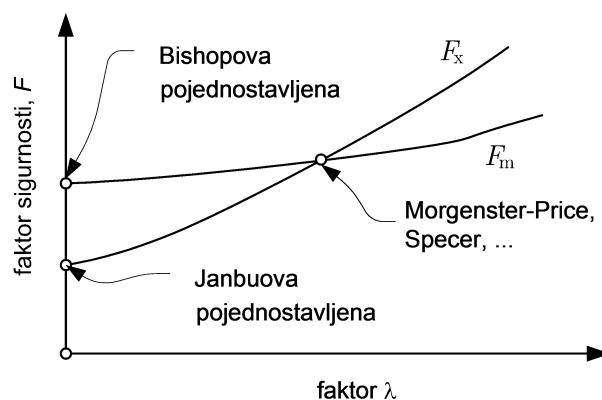
$$\Delta X - N \sin \alpha + S \cos \alpha - H + D \cos \omega = 0 \quad (13.12)$$

Iz izraza (13.12) i (13.5) slijedi

$$X_D = X_L + \frac{1}{F} (C - U \tan \varphi') \cos \alpha + N \left(\frac{1}{F} \tan \varphi' \cos \alpha - \sin \alpha \right) - H + D \cos \omega \quad (13.13)$$

Odgovarajuće vertikalne međulamelarne sile Y , izračunaju se iz izraza (13.6). Nakon nekoliko koraka iteracije, veličine faktora sigurnosti F_x i F_m dviju uzastopnih iteracija bit će gotovo jednake i tada je iteracija završena.

- U trećoj razini iteracije mijenja se veličina varijable λ tako dugo dok se ne postigne $F_x \approx F_m$ (slika 13-14).



Slika 13-14. Treća razina iteracije u proračunu faktora sigurnosti po općoj metodi granične ravnoteže

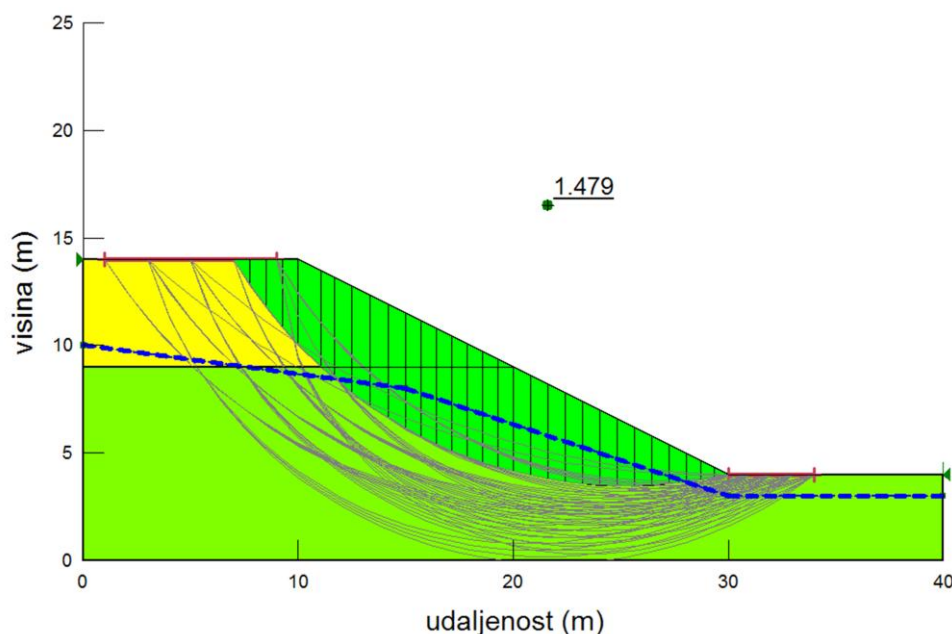
Provedba prikazanog općeg iteracijskog postupka rješavanja sustava nelinearnih jednadžbi praktički je neizvediva bez pomoći računala. Postupak je i razvijen kad je dostupnost računala

omogućila njegovu primjenu. Prije pojave računala koristile su se pojednostavljene varijante postupka.

3.2.3. Kritična klizna ploha

U prethodnom poglavlju opisan je postupak određivanja faktora sigurnosti za neko pretpostavljeno klizno tijelo u kosini. Pri dimenzioniranju kosine potrebno je odrediti njen oblik, posebno nagib, koji pri izvedbi i korištenju neće izazvati nestabilnost kosine. Kosina će biti stabilna ako ne postoji klizno tijelo za koje je faktor sigurnosti $F \leq 1$. To znači da je za stabilnost kosine mjerodavno ono klizno tijelo koje ima najmanji faktor sigurnosti. To je *kritično klizno tijelo*, a klizna ploha koja mu pripada naziva se *kritičnom kliznom plohom*. Mjera stabilnosti kosine se može iskazati upravo faktorom sigurnosti koji odgovara kritičnoj kliznoj plohi.

U praksi se potraga za kritičnom kliznom plohom provodi određivanjem faktora sigurnosti većeg broja probnih kliznih tijela te izborom onoga koje daje najmanji faktor sigurnosti. Ovaj postupak ne osigurava automatski da će se pronađena klizna ploha s najmanjim faktorom sigurnosti uvijek barem približno odgovarati kritičnoj kliznoj plohi. U načelu je moguće zamisliti beskonačan broj kliznih ploha u svakom promatranom slučaju kosine pa bi, opet u načelu, za pronalaženje kritične trebalo odrediti i beskonačan broj faktora sigurnosti. Kako je to praktički nemoguće, izabire se konačan broj probnih kliznih ploha, a iskustvo značajno pomaže da se s velikom vjerojatnošću barem približno pronađe ona kritična (slika 13-15). U tome uvelike pomažu razni razrađeni algoritmi koji se mogu naći u komercijalnim računarskim programima pa problem pronalaženja kritične klizne plohe danas u praksi ne predstavlja posebno složen problem.



Slika 13-15. Primjer približnog pronalaženja kritične klizne plohe: kosina s nizom probnih kružnih kliznih ploha te istaknutom kliznom plohom koja među probnima ima najmanji faktor sigurnosti; istaknuto je središte kritične kružnice s vrijednošću pripadnog faktora sigurnosti (prikaz rezultata iz programa GeoSlope/W tvrtke GeoSlope, Kanada)

3.2.4. Tlak vode u porama tla i koeficijent pornog tlaka r_u

Stabilnost kliznog tijela značajno ovisi o raspodjeli pornih tlakova duž klizne plohe, jer o toj raspodjeli ovisi raspodjela čvrstoće tla. To znači da svakom proračunu faktora sigurnosti i traženju kritične klizne plohe prethodi utvrđivanje raspodjele pornih tlakova u kosini.

Veličina pornog tlaka može se izraziti preko piezometarske visine $h_p = \frac{u}{\gamma_w}$. Ova je visina jednaka visini vode u zamišljenom piezometru, uspravnoj cijevi, otvorenoj s obje strane i ugrađenoj u tlo, kojoj se donji otvor poklapa s točkom u kojoj djeluje porni tlak u . Ako se spoje sve točke gornje razine vode u zamišljenim piezometrima, čija su dna razmještena duž klizne plohe, dobije se linija koja se naziva *piezometarskom*.

Drugi način zadavanja pornog tlaka u analizama granične ravnoteže moguć je preko *koeficijenta pornog tlaka* r_u koji se definira iz izraza

$$u = r_u \gamma h_L \quad (13.14)$$

gdje je h_L visina lamele. Za suho tlo $r_u = 0$, a za vodu na vrhu lamele, $r_u = \frac{\gamma_w}{\gamma}$. To znači da se koeficijent pornog tlaka kreće u granicama od nule do oko 0,5.

3.3. Posebne varijante metode granične ravnoteže

3.3.1. Neke poznatije varijante

Gotovo sve do sada razvijene varijante metode granične ravnoteže mogu se izvesti iz opisane opće metode. Tablica 3-4 prikazuje karakteristike nekih poznatijih varijanti.

Tablica 13-4. Karakteristike nekih povijesnih varijanti metode granične ravnoteže

Naziv varijante	klizna ploha	jednadžbe ravnoteže		sile među lamelama		funkcija nagiba sila među lamelama $f(x)$
		$\Sigma_x = 0$	$\Sigma_m = 0$	ΔX	ΔY	
Obična ili Felleniusova (Fellenius, 1936)	kružna	Ne	Da	= 0	= 0	$X = 0$ $Y = 0$
Janbuova pojednostavljena (Janbu, 1954)	opća	Da	Ne	$\neq 0$	= 0	= 0
Bishopova pojednostavljena (Bishop, 1955)	kružna	Ne	Da	$\neq 0$	= 0	= 0
Morgenstern-Priceova (Morgenstern i Price, 1965)	opća	Da	Da	$\neq 0$	$\neq 0$	zadaje korisnik
Spencerova (Spencer, 1967)	opća	Da	Da	$\neq 0$	$\neq 0$	= 1

Napomene: $\Sigma_x = 0$... jednadžba ravnoteže u horizontalnom smjeru
 $\Sigma_m = 0$... jednadžba ravnoteže momenata sila

Najraširenije u stručnoj praksi su kroz razna razdoblja razvoja metode bile Obična, švedska ili Felleniusova metoda (Fellenius, 1936), Janbuova pojednostavljena (Janbu, 1954), Bishopova pojednostavljena (Bishop, 1955), Morgenstern-Priceova (Morgenstern i Price, 1965) i Spencerova (Spencer, 1967). Od navedenih, prve tri su još u praksi bile prihvatljive za neposredan račun bez korištenja računskog stroja. Za ostale je praktično nužna uporaba računskog stroja.

3.3.2. Obična metoda (metoda Felleniusa ili švedska metoda)

Ovo je jedna od prvotno razvijenih metoda proračuna stabilnosti kosina (Fellenius, 1936). Metoda je razvijena za kružne klizne plohe polumjera R , uz pretpostavku da je rezultanta međulamelarnih sila jednaka nuli ($\Delta X = 0$, $\Delta Y = 0$). U tom slučaju, iz uvjeta ravnoteže momenata, slijedi neposredni izraz za faktor sigurnosti za drenirano stanje

$$F = \frac{\Sigma c' b + \Sigma (V \cos \alpha - ub) \tan \varphi'}{\Sigma V \sin \alpha} \quad (13.15)$$

pri čemu je uzeto u obzir da je $s = R$, $\frac{v}{R} = \sin \alpha$ i $n = 0$ (krak normalne sile na osnovici lamele). Uvjet ravnoteže u horizontalnom smjeru se zanemaruje. Za nedrenirano stanje, uvrštavanjem $c \rightarrow c_u$, $\varphi \rightarrow \varphi_u = 0$ u izraz (13.15), slijedi još jednostavniji izraz

$$F = \frac{\Sigma c_u b}{\Sigma V \sin \alpha} \quad (13.16)$$

U slučaju da je klizno tijelo u homogenom tlu (u svim točkama klizne plohe ista nedrenirana čvrstoća), izraz (13.16) se još pojednostavljuje u

$$F = \frac{c_u LR}{W_w} \quad (13.17)$$

gdje je L dužina kružnog luka klizne plohe, W je težina kliznog tijela, a w je krak težine u odnosu na središte kružne klizne plohe. U gornjim izrazima zbog jednostavnosti su zanemarene horizontalne i vanjske sile na klizno tijelo, kao i krajnje međulamelarne sile A .

3.3.3. Bishopova pojednostavljena metoda

Bishopova pojednostavljena metoda (Bishop, 1955) zadnja je od metoda u povijesnom razvoju metoda granične ravnoteže još primjerena proračunima bez korištenja računala. U izvornom obliku razvijena je za kružne klizne plohe ($s = R$, $n = 0$). U toj metodi kreće se od izraza za globalnu ravnotežu momenata sila, zanemaruje se ravnoteža u horizontalnom smjeru, te se zanemaruje razlika vertikalnih komponenti međulamelarnih sila koje djeluju na jednu lamelu ($\Delta Y = 0$), pa izraz (13.10) za normalnu silu na osnovici lamele, N , poprima oblik

$$N = \frac{V - \frac{\sin \alpha}{F} (C - U \tan \varphi') + D \sin \omega}{m_\alpha} \quad (13.18)$$

Iz uvjeta ravnoteže momenata sila, uvažavajući da je $\frac{1}{F} \sin \alpha \tan \varphi' = m_\alpha - \cos \alpha$, a širina lamele $b_x = b \cos \alpha$,

$$F = \frac{\Sigma \frac{c' b_x + (V - u b_x) \tan \varphi'}{m_\alpha}}{\Sigma V \sin \alpha + \frac{1}{R} (\Sigma H h + \Sigma D d + A_L a_L - A_D a_D)} \quad (13.19)$$

Za računanje faktora sigurnosti iz ovog izraza potreban je iteracijski postupak, jer je izraz implicitna jednadžba za faktor sigurnosti oblika $F = g(F)$, zbog ovisnosti m_α o faktoru sigurnosti F . Iteracijski postupak se provodi tako da se krene od neke početne vrijednosti F , na primjer 1, izračuna se $g(F)$ i time se dobije nova vrijednost za F te se postupak ponavlja n puta: $F_{i+1} \leftarrow g(F_i)$ dok se ne postigne $F = F_{n+1} \approx F_n$. U tom postupku indeks i označava redni broj iteracije.

3.3.4. Janbuova pojednostavljena metoda

Janbuova pojednostavljena metoda (Janbu, 1954, 1973), za razliku od Bishopove, kreće od zadovoljavanja jednadžbe ravnoteže u horizontalnom smjeru, dok zanemaruje globalnu ravnotežu momenata sila. Kao i kod pojednostavljene Bishopove metode, zanemaruje se vertikalna komponenta rezultante međulamelarnih sila koje djeluju na lamelu ($\Delta Y = 0$). Postupak računanja faktora sigurnosti moguće je provesti bez pomoći računala.

4. Projektiranje kosina

4.1. Stabilnost kosina i Eurokod 7

Projektiranje građevina sa stabilnim kosinama, slično kao i projektiranje bilo koje druge građevine, provodi se iterativno i postupno. Pretpostave se osnovne karakteristike konstrukcije, pa tako i kosina, a zatim se procjenjuje kroz koje kritične proračunske situacije će građevina tijekom izgradnje i njenog korištenja proći. Za te se proračunske situacije provjerava zadovoljavanje bitnih zahtjeva na građevinu. U dijelu koji se odnosi na nosivost i uporabivost, provjerava se da građevina ne prijeđe bilo koje od graničnih stanja. Za kosine to su prvenstveno granična stanja nosivosti GEO. Ako se pokaže da je neko od graničnih stanja prijeđeno ili, s druge strane, da je konstrukcija neracionalna, jer je dosezanje graničnih stanja „daleko“, prilagođava se oblik i karakteristike konstrukcije. Taj se postupak nastavlja dok se ne postigne ekonomična, ali stabilna i uporabiva konstrukcija.

Tradicionalno se u geotehnici rizik od dosezanja nekog graničnog stanja ograničavao nekim najmanjim dozvoljenim faktorom sigurnosti (na primjer od 1.2 do 1.5). Sustav

eurokodova uveo je pojam parcijalnih koeficijenata. Provjera dosezanja graničnog stanja nosivosti GEO u Eurokodu 7 provjerava se izrazom

$$E_d \leq R_d \quad (13.20)$$

gdje je E_d proračunski učinak djelovanja u promatranoj točki razmatranog mehanizma sloma konstrukcije za neku projektnu situaciju, a R_d je proračunska otpornost konstrukcije tom djelovanju. U slučaju problema stabilnosti kosina, djelovanje može biti posmično naprezanje, a otpornost posmična čvrstoća tla na mjestu djelovanja posmičnog naprezanja, znači na kliznoj plohi. U tom slučaju se izraz (13.20) može pisati u obliku

$$\tau_k \gamma_F \leq \frac{\tau_f}{\gamma_M} \quad (13.21)$$

gdje je τ_k karakteristična vrijednost djelovanja, proračunata temeljem karakterističnih vrijednosti jedinične težine tla i karakterističnih vrijednosti ostalih djelovanja (sile od tlakova porne vode, površinsko opterećenje itd.), τ_f je posmična čvrstoća tla, a γ_F i γ_M su parcijalni koeficijenti djelovanja i otpornosti materijala. Kako je gotovo u svim slučajevima stabilnosti kosina dominantno djelovanje od vlastite težine tla i djelovanje podzemne vode, a za ta su djelovanja u Eurokodu 7 parcijalni koeficijenti uvijek jednaki 1, to će u sva tri projektna pristupa, koja dozvoljava ova norma, kritična biti kombinacija parcijalnih koeficijenata u kojoj je $\gamma_F = 1$, a za $\gamma_M > 1$ treba uvrstiti odgovarajuće parcijalne koeficijente u odnosu na drenirano ili nedrenirano stanje smicanja. U slučaju dreniranog smicanja će biti $\gamma_M = \gamma_{\varphi'} = \gamma_{c'} = 1.25$, dok će u slučaju nedreniranog smicanja biti $\gamma_M = \gamma_{c_u} = 1.40$.

Iz ovog razmatranja slijedi da će pri provjeri dosezanja nekog od graničnih stanja nosivosti pri projektiranju kosina izraz (13.21) poprimiti oblik

$$\tau_k \leq \frac{\tau_f}{\gamma_M} \quad (13.22)$$

što se može pisati u obliku

$$\gamma_M \leq \frac{\tau_f}{\tau_k} = F \quad (13.23)$$

gdje je F poznati faktor sigurnosti tradicijskog pristupa provjeri stabilnosti kosina. U slučaju da nema vanjskog djelovanja na klizno tijelo (od opterećenja neke zgrade ili slično), Eurokod 7 traži da faktor sigurnosti kritične klizne plohe bude jednak ili veći od parcijalnog koeficijenta za čvrstoću tla, 1.25 za drenirano stanje ili 1.40 za nedrenirano stanje.

U slučaju da na klizno tijelo djeluje neko „vanjsko“ trajno ili prolazno opterećenje, kao što je težina neke građevine temeljene na kliznom tijelu, u proračunu faktora sigurnosti to opterećenje treba pomnožiti s odgovarajućim parcijalnim koeficijentom.

4.2. Proračunske situacije

4.2.1. Stabilnost tijekom i neposredno nakon izgradnje

Osim na geometriju i moguća opterećenja kosine, na stabilnost kosine tijekom izgradnje igra ulogu relativni odnos brzine izgradnje i propusnosti tla. Ako propusnost mala u odnosu na brzinu izgradnje, što je često slučaj kod glinovitih i prašiniastih tala, mogući su nedrenirani uvjeti u tlu tijekom ili neposredno nakon izgradnje. Pri tome treba voditi računa da će kod mekih, normalno konsolidiranih ili slabo prekonsolidiranih tala nedrenirana čvrstoća biti manja od drenirane, dok će za kruta, prekonsolidirana tla biti obratno. To znači da će faktor sigurnosti kod mekih sitnozrnih tala rasti s vremenom, dok će kod krutih sitnozrnih tala opadati u vremenu. U projektantskoj se praksi mogu provjeriti granični slučajevi provođenjem analiza za potpuno drenirane i za idealno nedrenirane uvjete.

4.2.2. Stabilnost u dugotrajnim (stacionarnim) uvjetima

Stabilnost u dugotrajnim stacionarnim uvjetima najčešća je proračunska situacija u praksi. Značajan je problem u praksi određivanje najnepovoljnijeg slučaja raspodjele pornih tlakova od stacionarnog strujanja. Često se kod prirodnih kosina pribjegava ugradnji odgovarajućih piezometara na više tlocrtnih i dubinskih lokacija na kosini te se provode dugotrajna mjerenja kako bi se utvrdili mogući rasponi i raspodjele pornih tlakova.

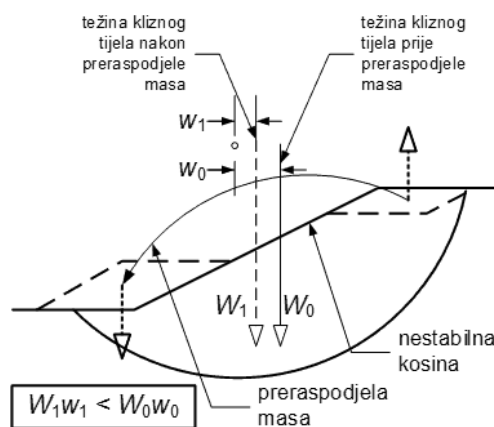
4.2.3. Naglo sniženje podzemne vode

Ova proračunska situacija javlja se često pri projektiranju nasutih brana kao i raznih otvorenih kanala. Upravljanje tim građevinama ponekad zahtijeva naglo sniženje vode u akumulaciji brane ili u kanalu što izaziva vrlo nepovoljno opterećenje nasute građevine ili kosine kanala. Obično su najnepovoljniji uvjeti neposredno nakon naglog sniženja vode u kanalu ili jezeru akumulacije pa se oni i najčešće ispituju na stabilnost.

5. Metode stabilizacije kosina

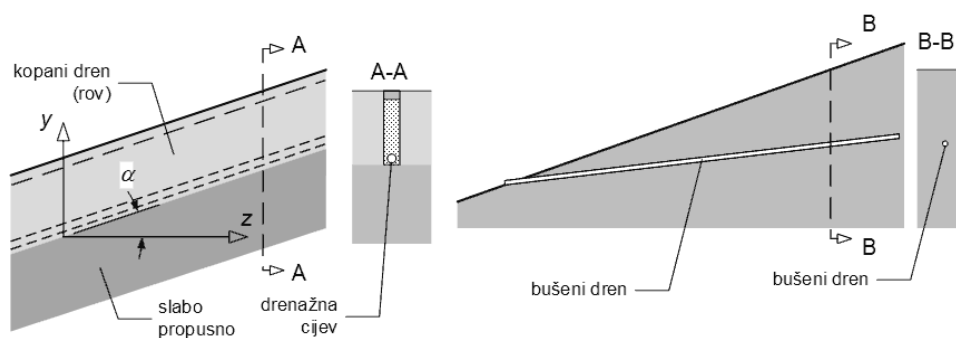
Prije primjene neke od mjera stabilizacije kosine, prvenstveno je potrebno odrediti uzroke nestabilnosti ili klizanja. Za utvrđivanje tih uzroka potrebno je provesti odgovarajuće geotehničke istražne radove. Vrlo je važno odrediti razdiobu pornih tlakova u podzemnoj vodi. U tu svrhu mogu poslužiti različiti instrumenti koji omogućuju dugotrajna opažanja i mjerenja. Kad su utvrđeni uzroci, mehanizam klizanja i potrebni parametri za analize stabilnosti, može se pristupiti izboru optimalne metode stabilizacije. Među tim metodama najčešće se koristi preraspodjela masa, površinsko i dubinsko dreniranje te izrada neke od mnogobrojnih mogućih potpornih konstrukcija.

Preraspodjelom masa, uklanjanjem tla s vrha kliznog tijela i nasipavanjem u nožici, kod rotacijskog se klizanja smanjuje moment težine kliznog tijela obzirom na središte rotacije (slika 13-16) i time se povećava faktor sigurnosti.



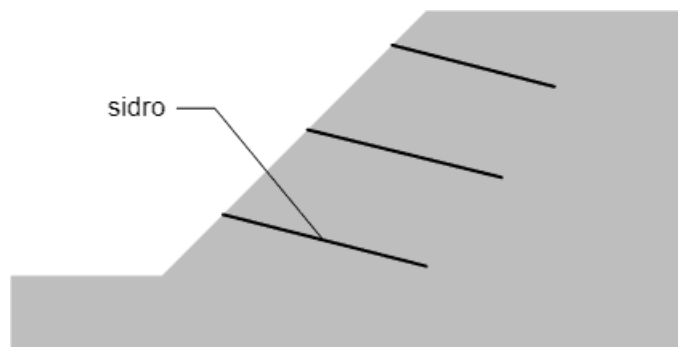
Slika 13-16. Preraspodjela masa pri stabilizaciji rotacijskog klizanja

Jedan od najčešćih uroka klizanja je utjecaj podzemne vode, koja smanjuje normalna efektivna naprezanja, a time i čvrstoću tla. Mjere koje smanjuju porni tlak u kosini u zoni klizne plohe jedne su od najčešćih i najekonomičnijih mjera sanacije. Među te mjere spada površinsko dreniranje i uređenje kosina te kopani i bušeni drenovi (slika 13-17). Cilj svakog dreniranja je smanjenje pornih tlakova u zoni kritične klizne plohe.



Slika 13-17. (a) Kopani dren (drenažni rov), (b) bušeni cjevasti dren

Potporne konstrukcije također mogu poslužiti stabilizaciji klizanja. Tim se konstrukcijama kliznom tijelu nameće dodatna, uglavnom horizontalna sila koja povećava faktor sigurnosti. Ojačanje kosine geotehničkim sidrima, koja također spadaju u potporne konstrukcije, prikazano je na slici 13-18.



Slika 13-18. Primjer sidrene potporne konstrukcije

6. Stabilnost beskonačne kosine

Promotrimo kompleksan slučaj stabilnosti beskonačne kosine pod nagibom β u odnosu na horizontalu, a razina podzemne vode je paralelna s nagibom kosine (slika 13-19). U ovom slučaju voda struji niz kosinu ispod razine podzemne vode, u smjeru paralelnom s nagibom kosine. Dakle, svaka je linija paralelna s nagibom kosine strujnica, a ekvipotencijale su okomite na strujnice. Pretpostavimo kliznu plohu na dubini y ispod površine kosine i promatramo element tla (lamelu) prikazan na slici 13-19. Ako sa y_w označimo vertikalnu udaljenost između klizne plohe i razine podzemne vode, onda je u točki na sredini osnovice lamele, piezometarski potencijal

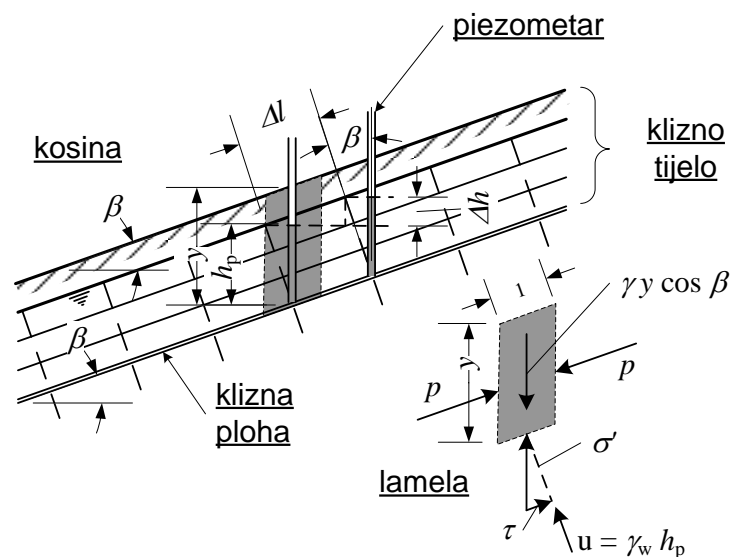
$$h_p = y_w \cos^2 \beta \quad (13.24)$$

pa je tlak vode u toj točki

$$u = \gamma_w y_w \cos^2 \beta \quad (13.25)$$

Hidraulički je gradijent

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} = \sin \beta \quad (13.26)$$



Slika 13-19. Stabilnost beskonačne ravne kosine s tečenjem podzemne vode niz kosinu paralelno s njenom površinom

Iz jednadžbi ravnoteže vertikalnih i horizontalnih komponenti svih sila koje djeluju na lamelu, slijedi da je normalno ukupno naprezanje na osnovici lamele

$$\sigma = \gamma y \cos^2 \beta \quad (13.27)$$

a posmično je naprezanje

$$\tau = \gamma y \sin \beta \cos \beta \quad (13.28)$$

Normalno efektivno naprezanje na osnovici lamele je

$$\sigma' = \sigma - u = (\gamma y - \gamma_w y_w) \cos^2 \beta \quad (13.29)$$

Za drenirane je uvjete, posmična čvrstoća na kliznoj plohi

$$\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi' \quad (13.30)$$

a za nedrenirane uvjete

$$\tau_f = c_u \quad (13.31)$$

Posebni slučajevi:

- suha kosina od krupnozrnatog tla, drenirani uvjeti ($y_w = 0$, $c' = 0$)

$$F_s = \frac{\sigma' \operatorname{tg} \varphi'}{\tau} = \frac{\gamma' y \cos^2 \beta \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma' y \sin \beta \cos \beta} = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \beta} \quad (13.32)$$

- kosina od krupnozrnatog tla ili sitnozrnatog tla s malom kohezijom, voda na površini kosine ($y_w = y$), drenirani uvjeti ($c' = 0$)

$$F_s = \frac{\sigma' \operatorname{tg} \varphi'}{\tau} = \frac{\gamma' y \cos^2 \beta \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma y \sin \beta \cos \beta} = \frac{\gamma' \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma \operatorname{tg} \beta} \approx \frac{1}{2} \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \beta} \quad (13.33)$$

Faktor sigurnosti oko dva je puta manji od onog za suhu kosinu. Strujanje vode bitno smanjuje stupanj stabilnosti kosine.

- kosina od sitnozrnatog tla, nedrenirani uvjeti ($\varphi_u = 0$):

$$F_s = \frac{c_u}{\tau} = \frac{c_u}{\gamma y \sin \beta \cos \beta} \quad (13.34)$$

Faktor sigurnosti pada s dubinom klizne plohe – dublje klizne plohe su kritičnije.