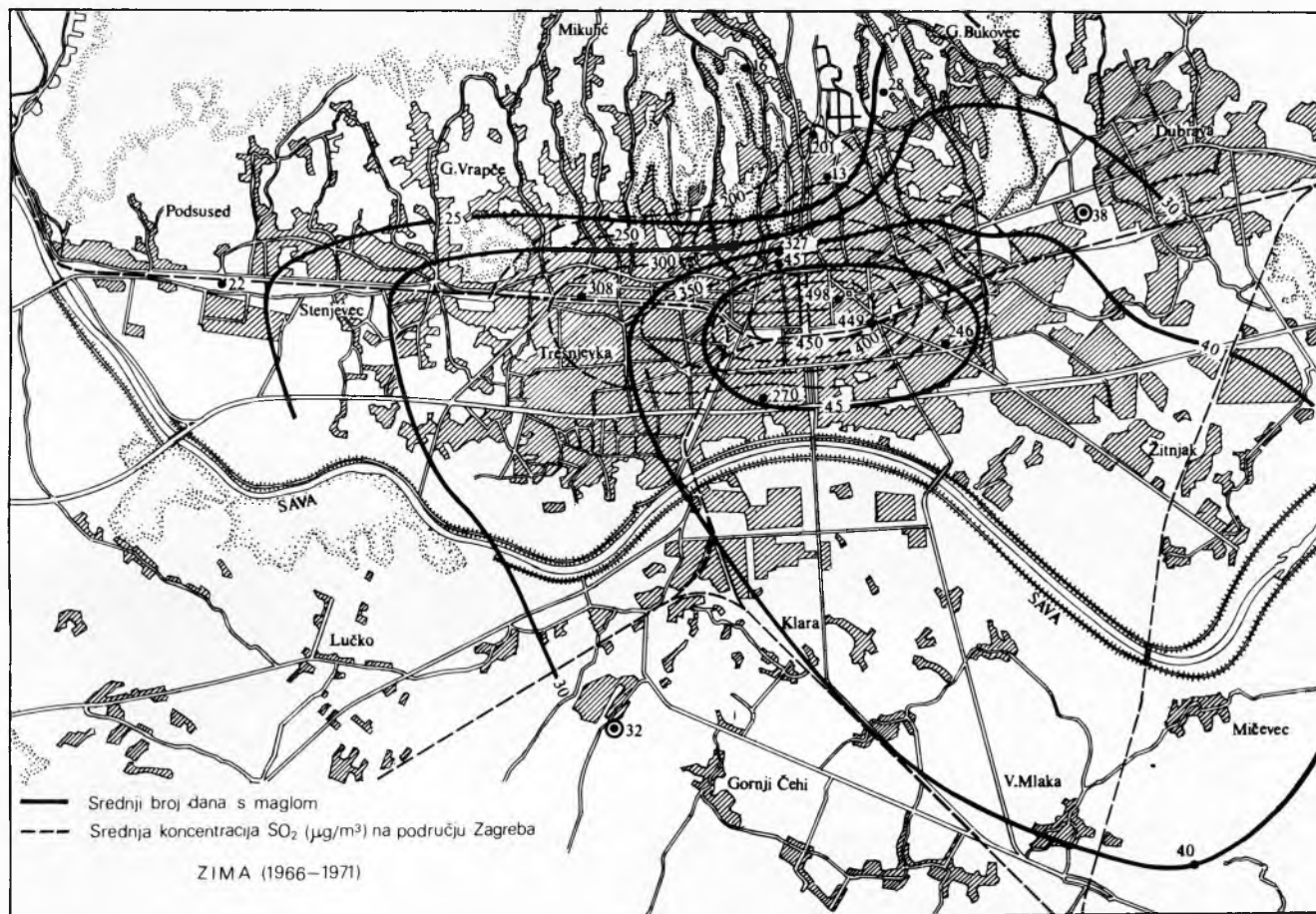


(imisija) ovisi mnogo o stanju atmosfere, posebno o stupnju stabilnosti najnižih zračnih slojeva. U uvjetima stabilne atmosfere nakupljaju se polutanti u nevelikoj visini iznad grada, a u anticiklonalnim stanjima može doći i do visokih razina imisije.

njihovu eksploataciju. Za hidroelektrane važan je u prvom redu vodni potencijal, koji je funkcija termičkog i oborinskog režima te režima isparivanja. Za termoelektrane izrađuju se ekološke studije, koje treba da ocijene koliki je potencijal atmosfere



Sl. 7. Srednji broj dana s maglom (puna linija) i srednja koncentracija SO<sub>2</sub> u µg m<sup>-3</sup> (crtkana linija) na području Zagreba za zimske mjeseci u razdoblju od 1966. do 1971. godine

**Graditeljstvo.** Pri projektiranju objekata treba uzeti sve prednosti lokalne klime, njenu modifikaciju postojećim objektima, te osnovne parametre djelovanja klime na vertikalne, nagnute i horizontalne plohe. Osim intenziteta zračenja, temperaturnih prilika i režima oborina, posebna pažnja pri gradnji visokih objekata posvećuje se podacima o režimu vjetera, odnosno analizi vjerojatnosti pojave izuzetnih vremenskih prilika (nepogoda), posebno radi sigurnosti budućih objekata. Ta klimatološka prognoza temelji se na proračunu ekstrema izabranih meteoroloških elemenata prema teoriji Gumbela ili Jenkinsona. Kao ulazni podaci služe dulji nizovi ekstremnih vrijednosti (najmanje 10 godina), i prema projektiranom vijeku trajanja objekata proračunava se za različite periode od 2, 5, 10, 20, 50 ili 100 godina koja će vrijednost promatranog elementa biti jednom premašena.

**Toplina** koju zgrada dobiva od Sunca ovisi o geografskoj širini, doba godine i dana, tipu reljefa, visini nad morem i naoblaci. Procjena Sunčeve radijacije koja dolazi na vertikalnu plohu različite orijentacije omogućuje da se najbolje iskoristi njen utjecaj na zidove zgrada i mikroklimu prostorija.

**Promet.** Utjecaj vremenskih prilika još je uvijek znatan na odvijanje prometa, pa je poznavanje klimatskih prilika u prvom redu važno za ispravno odabiranje lokacije aerodroma, auto-cesta, za procjenu utjecaja na iskoristivost prometnica i djelovanje izuzetno nepovoljnih vremenskih prilika kao što je gusta magla ili pojava poledice, olujnog vjetera i sl.

**Energetika.** Klimatski podaci su od izuzetnog značenja za procjenu najbolje lokacije velikih energetskih objekata i za

na potencijalnoj lokaciji da primi proračunate količine polutanata i ovisnost imisije u okolišu objekta o klimatskim prilikama. Analogno vrijedi i za nuklearne elektrane, za koje se procjenjuje i difuzija plinova u prosječnim i akcidentnim okolnostima.

LIT.: W. Köppen, Handbuch der Klimatologie. Berlin 1946. — V. Conrad, Methods in climatology. Harvard University Press, Cambridge, Mass. 1946. — C. E. P. Brooks, N. Caruthers, Handbook of statistical methods in meteorology. HMSO, London 1953. — P. Vujević, Klimatološka statistika. Naučna knjiga, Beograd 1956. — M. Milosavljević, Klimatologija. Beograd 1963. — J. Taubenheim, Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig, Leipzig 1969. — J. Mather, Climatology — fundamentals and applications. New York 1974. — K. Smith, Principles of applied climatology. McGraw Hill Co., London 1975. — P. Šegota, Klimatologija za geografe. Školska knjiga, Zagreb 1976. — M. B. Захарина, Строительная климатология. Гидрометеоиздат, Ленинград 1976. — O. Essenwanger, Applied statistics in atmospheric science. Elsevier, Amsterdam 1976.

D. Poje

**KLIZANJE TLA**, kretanje površinskog sloja zemljišta. Sve nagnute prirodne površine terena stalno se brže ili polaganije pomiču i kreću. Prirodni uzroci, kao što su sezonske promjene vlažnosti, temperature i razine podzemnih i tokova površinskih voda, oborine, vjetrovi, promjene fizičkih svojstava tla zbog različitih sporih geoloških i kemijskih procesa (kao npr. izluživanje i rastrožba), tektonski poremećaji i potresi, nepa-

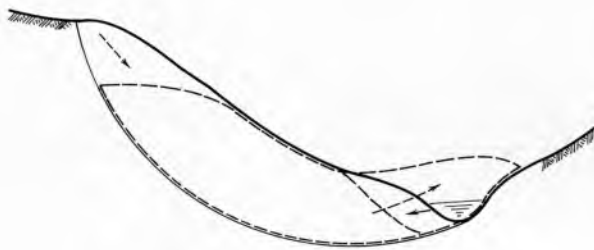
žljivi zahvati u promjeni vegetacijskog pokrivača i režima podzemnih voda stvaranjem umjetnih jezera ili nepodesnim natanpanjem kosina te promjena oblika prirodnih padina ili opterećenja, uzrokuju promjenu strukture i karakteristika slojeva tla. Posljedice mogu biti stalno, makar i veoma polagano, kretanje površinskog sloja niz kosinu, tzv. puzanje ili povremeni brzi i veliki pokreti većih i debljih dijelova kosine, tzv. klizanje tla.

U principu, slojevi na kosini bit će u ravnoteži kad je u svakoj točki tla posmična čvrstoća veća od posmičnog naprezanja. U toku dugih geoloških promjena nagibi prirodnih kosina prilagođeni su stvarnoj posmičnoj čvrstoći, pa su kosine u osnovi stabilne. Ako se zbog bilo kojeg prirodnog djelovanja ili umjetnog zahvata poremeti ravnoteža na kosini, te ako posmična naprezanja dosegnu stvarnu posmičnu čvrstoću materijala tla, tlo će početi klizati. Ono će se nastaviti i proširivati sve dok se promjenom oblika kosine ponovno ne uspostavi ravnoteža novim rasporedom masa, odnosno dok ne prestanu djelovati utjecaji koji su poremetili ravnotežu.

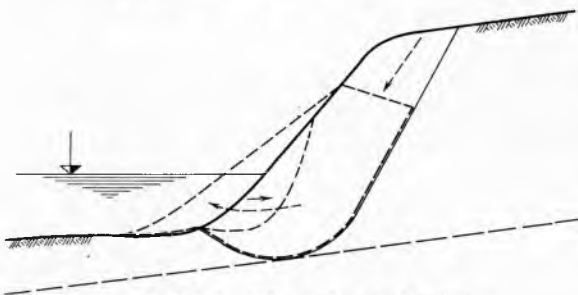
Razvoj brzine klizanja u vremenu važna je značajka za razvrstavanje i prognozu klizanja. Pri puzanju brzina je veoma mala i približno konstantna, do 30 mm godišnje. Pri klizanju tla brzine ovise o deformacijskim karakteristikama materijala, morfologiji i nagibu područja klizanja, te iznose od 30 cm/dan do 400 m/min. Registrirano je klizanje tla s brzinom od 450 km/h (Čile).

**Uzroci klizanja tla.** Analizom uzroka klizanja tla, ako se isključe dugotrajni geološki i kemijski procesi u tlu, ustanovljeno je da su voda (površinska ili podzemna) i umjetni zahvati najčešći uzroci poremećaja ravnoteže na kosini.

**Voda.** Površinski vodeni tokovi s većim brzinama erodiraju nožice obala što, kad su padine strme, može poremetiti ravnotežu i potaknuti klizanje tla (sl. 1). Slične su pojave na obalama jezera i mora gdje abrazijsko djelovanje valova ruši nožicu i uzrokuje odrone (sl. 2.)



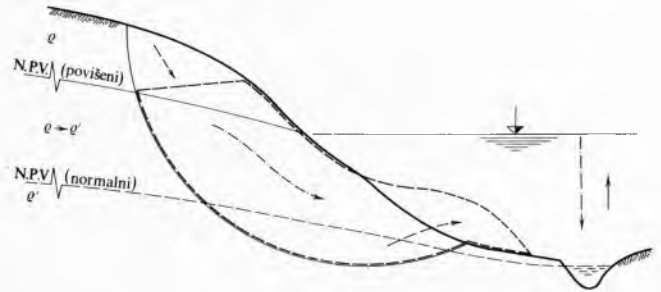
Sl. 1. Klizanje tla uzrokovano erozijom nožice



Sl. 2. Odroni tla uzrokovani abrazijom

Takve pojave na riječnim tokovima često su vrlo izrazite i uzrokuju pokret velikih masa tla koje pregrade rijeku i stvaraju prirodnu akumulaciju. U nas je u novije vrijeme poznato klizanje brda kod Gradota koje je blokiralo korito potoka Luda Mara u Makedoniji. Slično je bilo s potokom Visočica u Srbiji gdje je akumulirana voda poplavila selo Zavoj. Tako akumulirana voda donosi dodatne opasnosti. Usporom se poplavljaju uzvodna mjesta uz obalu rijeke i stvara se potencijalna energija vode koja, kad se prelije preko takve pregrade, postupno je ruši i plavi nizvodne površine uz intenzivnu eroziju u nizvodnom toku. Akumulirana voda potapanjem obala podiže razinu podzemnih voda i olakšava donje dijelove nožice pokosa zbog uz-

gona; nakon naglih pražnjenja takvih akumulacija intenzivno teku podzemne vode pa djeluju znatne dodatne sile strujnog tlaka, koje na kosini mogu uzrokovati klizanje inače stabilnih pokosa. Kad je razina vode u tlu približno horizontalna, smanjuje se jedinična težina tla radi uzgona, a ako je razina nagnuta osim uzgona djeluje i sila zbog otpora tečenju između čestica tla i vode. Takvi prirodni procesi odvijali su se češće kroz geološka razdoblja, a danas se pojavljuju rijetko i manje su izraženi, jer su se u takvim procesima u prošlosti smanjile kosine, stvarajući stabilna stanja (sl. 3).

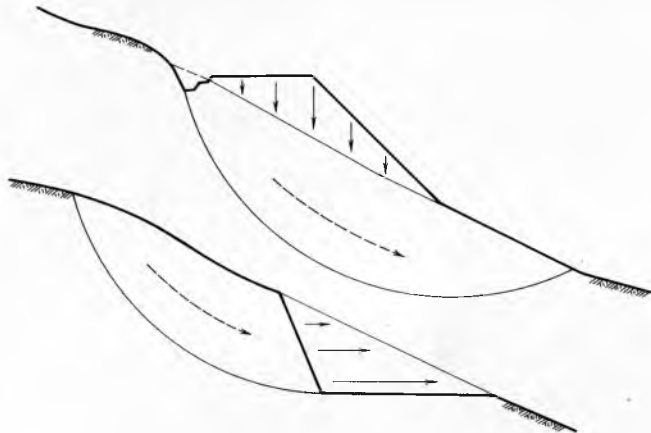


Sl. 3. Klizanje uzrokovano smanjenjem težine tla u nožici, odnosno naknadnim djelovanjem tlaka

Kad je nagnuto lice podzemne vode, potrebna su povećana tangencijalna naprezanja da preuzmu sile zbog strujnog tlaka. Zapaženo je da je u padini od malo propusnog materijala lice podzemnih voda većinom približno paralelno s površinom, a manje se oscilacije pojavljuju zbog sezonskih oscilacija oborina. Nagli poremećaji toga stanja, koji nastaju zbog dugotrajnih nepovoljnih klimatskih utjecaja, zbog trajnog procjeđivanja vode u tlo iz defektnih vodovodnih ili kanalizacijskih cijevi, zbog nepažljivog natapanja, zbog izgradnje brana i stvaranja akumulacijskih jezera, povisuju razinu podzemnih voda i povećavaju strujni tlak, što nepovoljno utječe na postojeću ravnotežu padine i može uzrokovati klizanje tla. Promjena vegetacijskog pokrivača sječom šume i nepažljivo obrađivanje zemlje obično povećavaju razinu podzemne vode u tlu, što opet pobuđuje klizanje tla. Od promjene vegetacijskog pokrivača do prvih pojava klizanja može proći i do 50 godina, pa se obično uzroci pripisuju nekom drugom činiocu. Posljedice, međutim, nepažljivog obrađivanja zemlje (rigolanje tla paralelno s padinom) ili izlivanje i natanpanje površine većim količinama vode pojavljuju se već nakon nekoliko godina.

Djelovanje podzemnih voda znatno je sporije od djelovanja površinskih, jer utjecaj podzemnih voda ovisi o propusnosti tla koja je često vrlo mala, pa klizanje nastaje kad za to na izgled nema nikakva razloga. Zbog toga je rašireno pogrešno mišljenje da voda u tlu djeluje kao mazivo koje smanjuje otpor trenja ili razmače tlo, pa ono buja čime se smanjuje njegova otpornost. Ta su mišljenja davno opovrgnuta mjerenjem otpora trenja kad se glatko polirane plohe različitih minerala pomiču po suhom ili vlažnom sloju istog ili drugog minerala. Hidrofilni minerali koji upijaju vodu, imaju znatno veći otpor trenja u prisutnosti vode, dok hidrofobni minerali, koji ne upijaju vodu, imaju nešto manji otpor trenja. Kombinacija hidrofilnih i hidrofobnih minerala ima otpor trenja približno jednak u vlažnom i u suhom stanju. U tlu je više hidrofilnih minerala ili kombinacija hidrofilnih i hidrofobnih minerala, pa voda većinom ima suprotno djelovanje od maziva, ili je pak utjecaj vode na promjenu trenja među česticama neznatan. Također je raširena teorija o utjecaju vode na stabilnost, prema kojoj bi fizičko ili kemijsko rastrojstvo zbog prisutnosti vode moglo izmijeniti svojstva tla tako da nastane klizanje. Pri tome se zaboravlja da je voda, u područjima umjerene i vlažne klime, stalno prisutna u tlu, pa su takvi procesi rastrojbe djelovali kroz duga geološka razdoblja. Voda može utjecati na kemijska svojstva minerala od kojih se sastoji tlo. Takvi su procesi svagdje i trajno prisutni, vrlo su spori i potrebno je vrlo dugo vremena da bi došli do izražaja. Zbog toga se utjecaj vode u kemijskim procesima i njima pobuđenim promjenama svojstava tla gotovo uvijek mogu zanemariti kad se proučavaju sadašnje pojave klizanja.

*Promjena opterećenja.* Umjetni zahvati na padinama, kao što su podsjecanje kosina, iskapanje usjeka, građenje nasipa i građenina, česti su uzroci klizanja tla. Osim što se promjenom rasporeda masa može neposredno narušiti postojeća ravnoteža na kosini, mogu nastati i promjene svojstava tla zbog naknadnog opterećenja, odnosno rasterećenja slojeva tla na prirodnim padinama (sl. 4).



Sl. 4. Klizanje inicirano nepažljivim opterećenjem ili rasterećenjem tla

Pojave klizanja tla na padinama posljedica su sloma na određenim plohama ili zonama, kad posmična naprezanja zbog promjene opterećenja postanu veća od posmične čvrstoće tla. Posmična je čvrstoća tla

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi', \quad (1)$$

gdje su  $c'$  i  $\varphi'$  parametri čvrstoće za efektivno naprezanje  $\sigma'$ , koje je jednako  $\sigma' = \sigma - u$ . Tu je  $\sigma$  ukupno naprezanje, a  $u$  neutralno naprezanje ili tlak u porama.

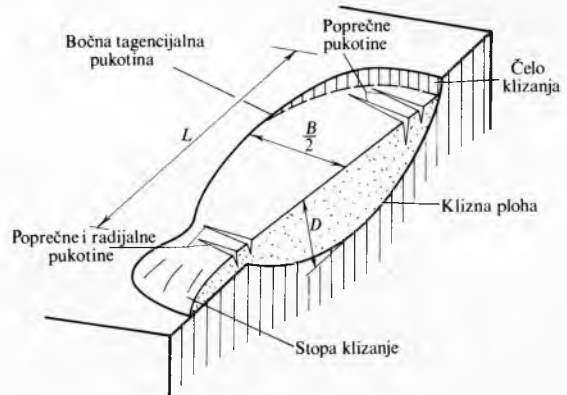
Parametar čvrstoće  $c$  kohezije javlja se samo kad je tlo od sitnozmatih koherentnih materijala i ovisi najviše o poroznosti u zoni sloma. Kut posmične čvrstoće  $\varphi$  ovisi, kad je tlo od krupnozmatih nekoherentnih materijala, o mineraloškom i granulometrijskom sastavu, o krupnoći i obliku zrna, te o poroznosti, a kad je tlo od sitnozmatih materijala više ovisi o mineraloškom sastavu, a manje o granulometrijskom sastavu i poroznosti. Propusnost krupnozmatih materijala višeg je reda od propusnosti sitnozmatih. Voda koja ispunjava pore u tlu mnogo je manje stišljiva od skeletne strukture tla. Zbog toga svaka promjena obujma tla zbog promjene opterećenja može nastati tek nakon istiskivanja određene količine vode. U krupnozmatim materijalima za taj proces potrebno je samo nekoliko minuta ili sati, dok u sitnozmatim materijalima taj proces može trajati i nekoliko desetaka godina, već prema propusnosti i promjeni obujma, odnosno debljini sloja.

Kako je posmična čvrstoća djelomično ovisna o normalnom naprezanju, u veoma propusnom materijalu tla ta će čvrstoća rasti proporcionalno porastu opterećenja, dok će se u malo propusnom materijalu zbog porasta tlaka u porama smanjiti efektivno naprezanje, pa će se smanjiti i posmična čvrstoća. Rasterećenjem uz smanjeno naprezanje postepeno se povećava obujam i poroznost tla, što utječe i na porast vlažnosti. Kut  $\varphi$  manje je osjetljiv na te promjene, ali se vrijednost kohezije  $c$  može znatno smanjiti. Posebno u prekonsolidiranim glinama često se nailazi na nehomogeni raspucali materijal, pa rasterećenje u takvu materijalu može uzrokovati lokalno bujanje, posebno kad su prisutni minerali montmorilonita. Čvrstoća se tada znatno smanjuje i slom može nastati lokalno uz postupno širenje u područja smanjene čvrstoće. Taj slom nastaje obično tek nakon nekog vremena od promjene naprezanja, jer brzina procesa ne ovisi samo o intenzivnosti smanjenja naprezanja već i o drugim svojstvima materijala. Voda u porama sitnozmatih materijala mnogo utječe na njegovu čvrstoću, pa materijal treba ispitati na uzorcima u laboratoriju gdje se mogu odrediti mjerodavni parametri.

**Oblici klizanja.** Proučavanjem klizišta utvrđene su različite klasifikacije klizanja u pojedinim strukama (geografija, geologija

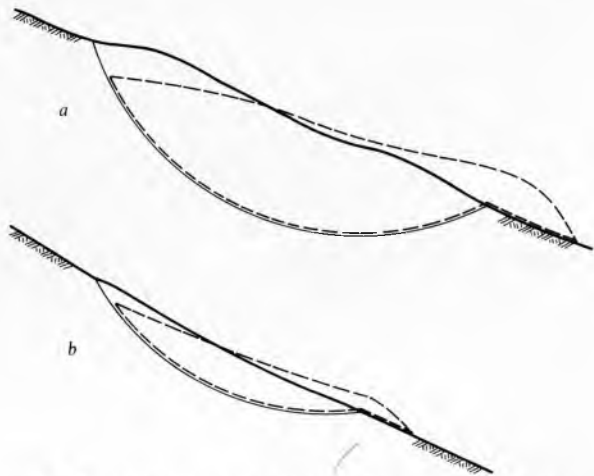
i građevinarstvo). U građevinarstvu se klizanje kosina proučava ispitivanjem karakteristika tla, određivanjem uvjeta ravnoteže mehanizma sloma u materijalu. Uz mnogo mjerodavnih utjecaja moguće su različite varijacije pojava klizišta, pa najčešće klasifikacija obuhvaća samo rotacijsko klizanje, klizanje proizvoljnog oblika, složeno, translatorno i kompleksno klizanje, jer su takve pojave najčešće.

Osnovne su značajke oblika svakog klizanja tla: poprečne pukotine (često otvorene na gornjem rubu), priljubljene pukotine pomaka na bočnim granicama između klizišta i stabilne zone kosine, te poprečno i radialno raspucani materijal na stopi pokrenute mase tla (sl. 5).

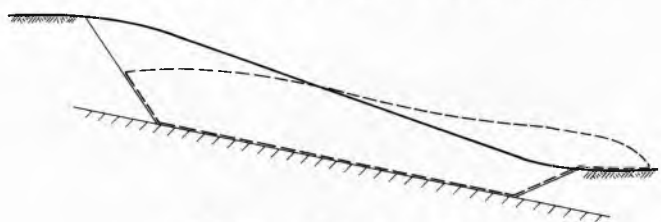


Sl. 5. Presjek kroz tipično klizište

*Rotacijsko klizanje* nastaje najčešće u homogenom glinovitom materijalu, a pojavljuje se i u rastrošenim stijenkama, te u šljunkovitim i pjeskovitim materijalima (sl. 6). Na gornjim dijelovima pojavljuju se pukotine i površina tla se spušta, dok se u stopi tlo bora i izdiže. U ostalim dijelovima nema većih distorzija.



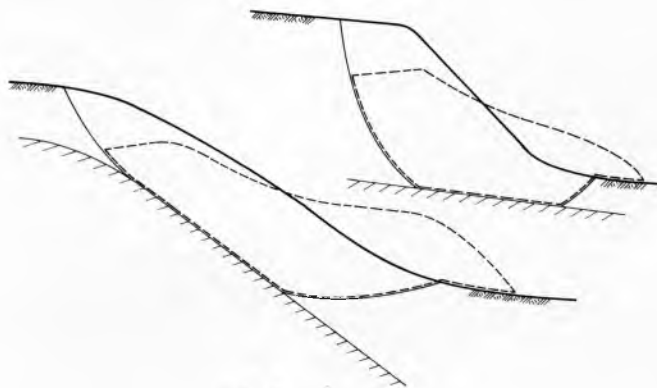
Sl. 6. Rotacijsko klizanje, a duboko b plitko rotacijsko klizanje



Sl. 7. Klizanje proizvoljnog oblika

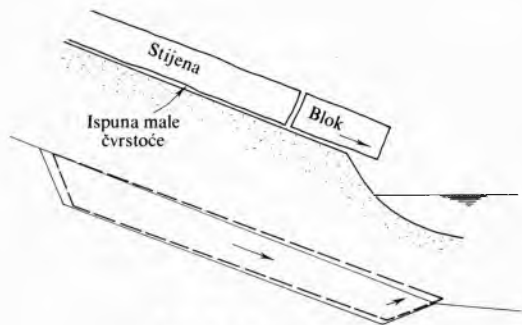
*Klizanje proizvoljnog oblika* pojavljuje se u svim vrstama materijala tla, a uvjetovano je prostiranjem slojeva. Gornji dio se spušta i na njegovoj površini pojavljuju se pukotine, srednji se dio pomiče translatorno, a donji se dio izdiže i bora (sl. 7).

**Složeno klizanje.** Tada su nepropusni slojevi tla glavni uzrok klizanja, ali gornji i donji dijelovi često popuštaju po rotacijskim plohama, koje su ujedno i linije najmanjeg otpora. Površinski su efekti između rotacijskoga i proizvodnjog oblika s naglašenim deformacijama (sl. 8).



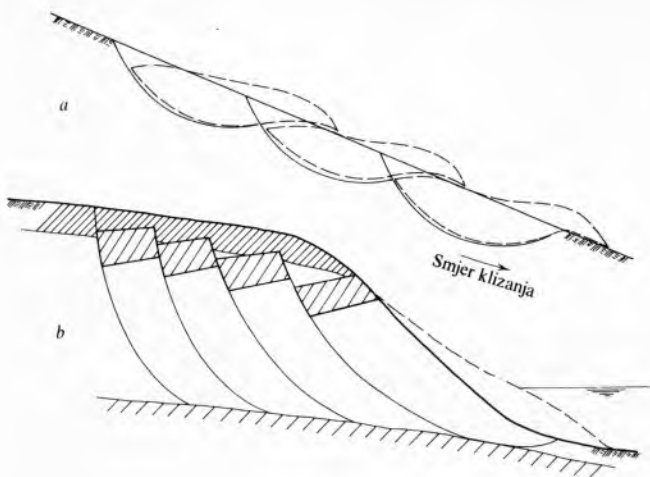
Sl. 8. Složeno klizanje

**Translatorno klizanje** nastaje kad postoji diskontinuitet svojstava materijala na kosini, kad je diskontinuitet na maloj dubini i granica diskontinuiteta približno paralelna s površinom kosine. Blok klizi po plohi diskontinuiteta bez većih distorzija. U stjenovitim materijalima klizanje nastaje po slojevima ili pukotinskim plohama koje su ispunjene materijalom manje čvrstoće. U koherentnom materijalu to su plošna klizanja, a diskontinuitete čine proslojci masne, često prekonsolidirane gline (sl. 9).



Sl. 9. Translatorno klizanje

**Kompleksna klizanja** pojavljuju se kao uzastopna rotacijska i višestruka retrogresivna klizanja (sl. 10). Uzastopna rotacijska klizanja posljedica su procesa degradacije prekonsolidirane raspucale gline. Višestruka retrogresivna klizanja, rotacijskoga ili translatornog tipa nastaju kad postoji zajednički bazni sloj.



Sl. 10. Kompleksna klizanja. a uzastopno rotacijsko, b višestruko retrogresivno klizanje

Klizanje nastaje zbog potkapanja stope erozijom ili abrazijom, ili kad je u površinskom dijelu materijal veće čvrstoće, pa nastaju dublja klizanja.

**Sile na kosini** jesu: gravitacijska sila (težina tla), uzgon, strujni tlak, tlak u porama zbog promjene vanjskog opterećenja i vanjske sile zbog dodatnih opterećenja.

**Gravitacijska sila** kliznog segmenta širine 1 m određuje se iz formule

$$W = Vg\varrho, \quad (2)$$

gdje je  $V$  volumen kliznog segmenta širine 1 m,  $g$  ubrzanje Zemljine teže, a  $\varrho$  gustoća prirodno vlažnog tla, koja se za suho tlo izračunava iz relacije

$$\varrho_d = (1 - n)\varrho_s, \quad (3)$$

a za vlažno tlo iz relacije

$$\varrho_w = (1 - n)\varrho_s + nS_r\varrho_v, \quad (4)$$

u kojima je  $\varrho_s$  gustoća suhog materijala tla,  $n$  poroznost,  $S_r$  stupanj zasićenosti vodom, a  $\varrho_v$  gustoća vode.

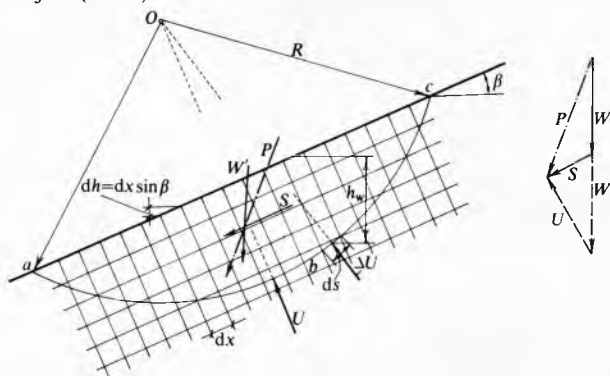
**Uzgon** djeluje na potopljeni dio segmenta, a obično se uzima kao smanjena prostorna težina tla. Ako je segment tla djelomično potopljen, težina će segmenta s djelovanjem uzgona iznositi

$$W_a = V_1g\varrho + V_2g\varrho', \quad (5)$$

gdje je  $V_1$  nepotopljeni, a  $V_2$  potopljeni dio segmenta, dok je  $\varrho'$  gustoća koja uzima u obzir i uzgon, pa je

$$\varrho' = (1 - n)(\varrho_s - \varrho_v). \quad (6)$$

**Strujni tlak** se pojavljuje ako voda teče kroz tlo. Da se odrede te sile, treba poznavati strujnu mrežu toka vode, koja se sastoji od strujnih i ekvipotencijalnih linija. Metode za izradbu strujne mreže proučavaju se u hidromehanici (v. *Mehanika fluida*), a ovdje će se prikazati samo pojednostavnjeni primjeri (sl. 11).

Sl. 11. Shema utjecaja tlaka.  $W$  ukupna težina tla,  $W'$  uronjena težina tla,  $U$  sila uzgona,  $S$  sila strujnog tlaka,  $P$  rezultantna sila

Zakrivljene strujnice i ekvipotencijalne linije, zbog pojednostavnjenja prikazane su pravokutnom mrežom. Tada je gradijent tlaka

$$i = \frac{dh}{dx} = \frac{dx \sin \beta}{dx} = \sin \beta, \quad (7)$$

gdje je  $\beta$  kut nagiba lica vode. Gradijent tlaka jednak je u svakoj točki presjeka kroz kosinu zbog pojednostavnjene strujne mreže, pa je ukupna sila strujnog tlaka

$$S = Ag\varrho_w i = Ag\varrho_w \sin \beta, \quad (8)$$

gdje je  $A$  površina presjeka kliznog segmenta. Ta se metoda primjenjuje kad se na temelju skice strujne mreže može ocijeniti kut mjerodavnog smjera strujanja vode  $\beta$ .

Ako se računa s punom težinom tla (crtkane linije u poligonu sila na sl. 11), tada je uzgon kao hidrostatski tlak na pojedine segmente između dviju susjednih ekvipotencijalnih linija

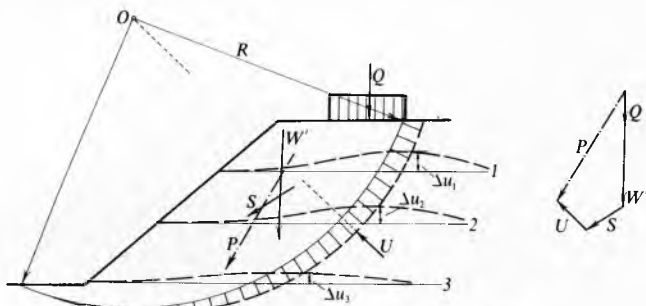
$$\Delta U = h_w g \varrho_w ds, \quad (9)$$

s djelovanjem okomito na kliznu plohu, odnosno usmjeren prema središtu kruga  $O$ , jer je tada klizna ploha dio kružnice. Ukupna sila hidrostatskog tlaka uzgona dobiva se pomoću poligona sila (sl. 11). Sila  $U$  okomita je na tetivu  $a-c$ .

Tlak u porama pojavljuje se u slabo propusnom materijalu tla u područjima gdje se mijenja naprezanje zbog dopunskih opterećenja. Taj tlak ovisi o propusnosti, poroznosti i putu dreniranja vode kroz tlo, a s vremenom se konsolidira ili disipira, ali to prolazno stanje može biti mjerodavno za stabilnost kosine. Tlak u porama izračunava se iz promjene glavnih naprezanja  $\Delta\sigma_1$  i  $\Delta\sigma_3$  (sl. 12), uz prosječne koeficijente promjene tlaka u porama  $A$  i  $B$  koji se dobiju ispitivanjem u laboratoriju, prema izrazu:

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]. \quad (10)$$

Ako opterećenje raste postepeno kroz duže vremensko razdoblje dok ne postigne konačnu vrijednost, za proračun se uzima smanjenje tlaka u porama prema vremenskom toku slijeganja.



Sl. 12. Tlak u porama u području klizne plohe

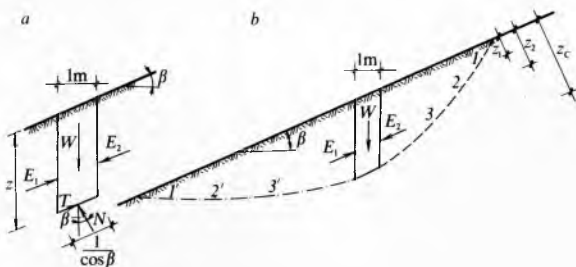
**Naprezanje na kosini i uvjeti sloma.** Promatra li se element unutar područja klizanja presjeka 1 m (sl. 13a), na dubini  $z$  naprezanja će iznositi:

$$\text{normalno naprezanje } \sigma_n = N \cos \beta = g q z \cos^2 \beta, \quad (11)$$

$$\text{tangencijalno naprezanje } \tau = T \cos \beta = g q z \sin \beta \cos \beta, \quad (12)$$

gdje je  $N = W \cos \beta = g q z \cos \beta$ ,  $T = W \sin \beta = g q z \sin \beta$ , a  $W = g q z$ .

Na mjestima gdje tangencijalni naponi premaše posmičnu čvrstoću (1) nastaje slom i velika deformacija. Klizna ploha sastoji se od svih točaka u kojima se pojavio slom. To je obično poligonska linija, koja se može aproksimirati krivuljom. U praksi se najčešće ta složena krivulja zamjenjuje cilindričnim plohama, pomoću kojih se jednostavno proračunavaju uvjeti ravnoteže i sloma, ili plohom oblika logaritamske spirale. Klizne plohe u nehomogenim materijalima imaju složeniji oblik koji ovisi o slijedu promjene svojstava materijala na različitim mjestima kosine.



Sl. 13. Naprezanja i nagib klizne plohe u različitim dubinama

**Metode proračuna stabilnosti.** Pri analizi stabilnosti najčešće se razmatra ravnoteža sila u ravnini najvećeg presjeka. Okomito na tu ravninu ne mijenjaju se sile u tlu i na površini kosine. Površine sloma zbog klizanja projiciraju se na promatranu ravninu kao linije sloma. Najčešće takav proračun stabilnosti kosine zadovoljava.

Na kosini od prirodnoga ili umjetnoga nasutoga i zbijenog materijala neće se pojaviti deformacije i klizanje ako posmična

naprezanja  $\tau$  (12) na bilo kojoj plohi kroz kosinu ne premaše posmičnu čvrstoću materijala  $\tau_f$  (1). Stabilnost kosine izražava se faktorom sigurnosti  $F_s = \frac{\tau_f}{\tau}$ .

Faktor sigurnosti u projektiranju kosina, nasipa, usjeka i asanacije klizanja uzima se od 1,2...2,0.

Već prema osnovnim postavkama, prilikom rješavanja problema stabilnosti mogu se analize stabilnosti svrstati u slijedeće grupe: metode teorije plastičnosti, metode granične ravnoteže i metoda konačnih elemenata.

**Metode teorije plastičnosti.** Ravnoteža naprezanja na neizmjerljivo malom elementu tla bilo u kojoj točki ravnine (sl. 14a) daje dvije diferencijalne jednadžbe:

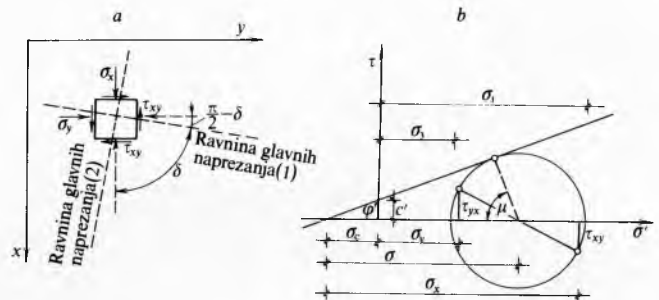
$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = X, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = Y, \quad (14)$$

gdje su  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\sigma_{xy}$  naprezanja u promatranoj ravnini  $xy$ , a  $X$  i  $Y$  su komponente težine tla u smjeru  $x$ , odnosno  $y$ . Za svaku točku u kojoj se pojavilo plastično tečenje ispunjen je i uvjet sloma koji se može napisati (sl. 14b) u obliku

$$\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} = (\sigma_x + \sigma_y + 2\sigma_c) \sin \varphi, \quad (15)$$

gdje je  $\sigma_c = c' \cot \varphi$ .



Sl. 14. Naprezanja u točki s graničnim stanjem ravnoteže (a) i Mohrov krug sloma (b)

Ako djeluje samo težina materijala, komponentne sile  $X$  i  $Y$  dobivaju vrijednost:  $X = g q$ ,  $Y = 0$ .

Primjena metode teorije plastičnosti kad je materijal nehomogen i kad postoje komplicirani granični uvjeti, koji se javljaju u praksi, vrlo je otežana i najčešće nemoguća. Zbog toga se ta metoda, iako ima jasan i prihvatljiv pristup, rijetko primjenjuje u normalnoj inženjerskoj praksi.

**Metode granične ravnoteže.** Tim se metodama ispituju faktori sigurnosti za više pretpostavljenih mogućih površina klizanja. Kritičnom se smatra ona površina klizanja koja ima najmanji faktor sigurnosti. Najviše se upotrebljavaju klizne plohe u obliku ravnine, kruga ili logaritamske spirale, ali tim se metodama mogu riješiti i klizne površine bilo kojeg oblika.

Te metode, koje su u primjeni jednostavne, ne daju egzaktno rezultate, ali je njihovom primjenom za kontrolne analize izvršenih klizanja dokazana potrebna pouzdanost. Granična ravnoteža može se drediti analitički i grafički.

Iz uvjeta ravnoteže sila (na segmentu kosine) (sl. 15) dobit će se tri jednadžbe: za ravnotežu horizontalnih i vertikalnih komponenata sila i za ravnotežu momenata oko središta kliznog kruga. Pri tom zbroj komponenata naprezanja na obodu kliznog kruga mora biti u ravnoteži s komponentama težine segmenata, strujnog tlaka i vanjskog opterećenja koji djeluju na promatrani segment. Jednadžbe ravnoteže glase:

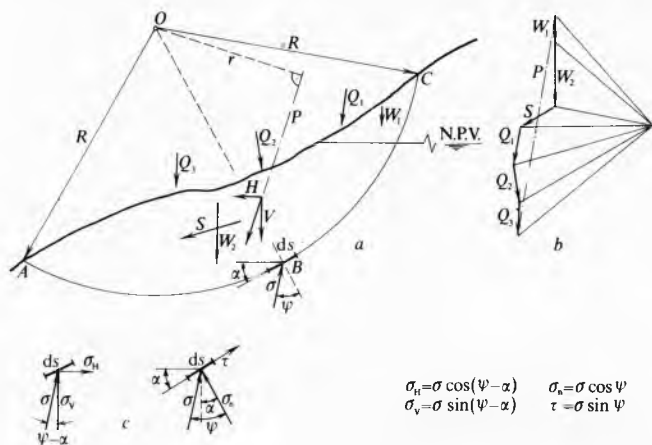
$$\Sigma V = \int \sigma \cos(\psi - \alpha) ds - V = 0 \quad (16)$$

$$\Sigma H = \int \sigma \sin(\psi - \alpha) ds - H = 0 \quad (17)$$

$$\Sigma M = \int \sigma R \sin \psi ds - Pr = 0. \quad (18)$$



Te tri jednadžbe nisu dovoljne da se odredi vrijednost napreznja  $\sigma$  u svakoj točki klizne plohe, iz čega bi se na već opisani način mogao odrediti faktor sigurnosti kosine. Problem nije statički određen, a ne mogu se primijeniti ni metode za rješavanje statički neodređenih sustava, jer se tlo ne ponaša kao elastičan materijal. Rješenje se nalazi uvođenjem u račun prikladnih pretpostavki o raspodjeli napona uzduž klizne plohe.



Sl. 15. Napadne sile i napreznja na kliznoj plohi (a), verižni poligon (b), komponente napreznja na elementu klizne plohe (c)

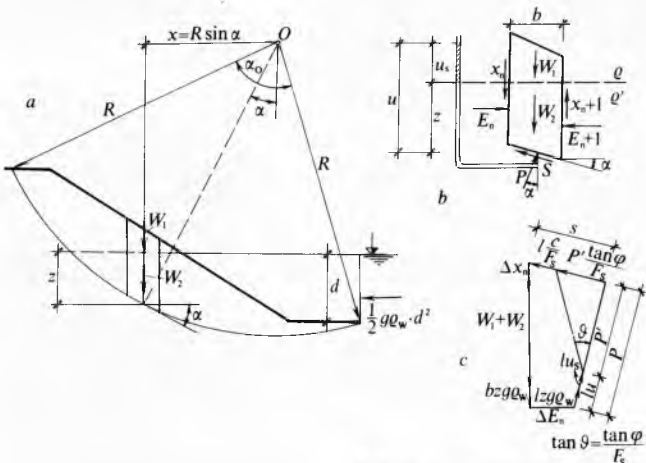
Uvjet statičke ravnoteže segmenta iznad klizne plohe bit će zadovoljen ako raspodjela napreznja  $\sigma$  odgovara uvjetu da je rezultanta napreznja uzduž klizne plohe jednaka po iznosu, obrnuta po smjeru i da djeluje u istom pravcu kao i rezultanta  $P$  svih sila koje djeluju na segment i u njemu. Proračun se uz tu pretpostavku može izvesti rezultatnom metodom i metodom lamela.

Rezultatnom metodom analizira se ravnoteža cjelokupne mase tla omeđene vanjskim konturama i površinom klizanja uz pretpostavku da su karakteristike materijala tla  $\varphi$  i  $c$  (1) uzduž klizne plohe konstantne.

U metodi lamela masa se tla iznad klizne plohe podijeli na više vertikalnih lamela, pa se za svaku od njih posebno ispituje ravnoteža. Taj postupak može se primijeniti i kad karakteristike materijala nisu konstantne uzduž klizne plohe. Grafički postupak prema rezultatnoj metodi upotrebljava se najčešće za klizne površine kružnog oblika (D. W. Taylor, 1948) ili oblika logaritamske spirale (L. Šuklje, 1969). Za klizne površine bilo kojeg oblika grafički je postupak suviše kompliciran.

Stabilnost metodom lamela moguće je ispitivati grafički i analitički.

Grafički postupak provodi se tako da se za svaku lamelu postave uvjeti ravnoteže sila i momenata. Obično se primjenjuje kad je broj lamela mali. Za više lamela analitička



Sl. 16. Veličine za proračun prema A. W. Bishopu. a klizni segment s lamelom n, b povećana lamela n sa silama, c poligon sila za lamelu n

metoda, koja se osniva na istim principima, znatno je preciznija uz upotrebu elektroničkih računala.

Metoda lamela je statički neodređena. Rješava se eliminacijom prekobrojnih nepoznanica uvođenjem pretpostavki o položaju i smjeru sila na pojedinim lamelama. O pretpostavkama ovisi rezultat, a kontrola je logična raspodjela napreznja unutar mase. Postoji mnogo pretpostavki koje zadovoljavaju raspodjelu napreznja, a rezultat daje raspon vrijednosti faktora sigurnosti.

Aproksimativna metoda lamela jedna je od prvih analitičkih metoda kojima se zanemaruju sile među lamelama (H. Krey 1926, K. Terzaghi 1929, D. R. May i J. H. A. Brahtz 1936). Prvu analitičku metodu, također za klizne plohe kružnog oblika kad se razmatra i ravnoteža međulamelnih sila, razradio je A. W. Bishop 1954. godine (sl. 16). Bishopova metoda daje točniji rezultat od aproksimativne metode, a njena primjena pomoću elektroničnog računala jednostavna je i brza. Faktor sigurnosti dobiva se iz izraza:

$$F_s = \frac{\Sigma [c' b + (W_1 + W_2 + \Delta X_n - bu_s) \tan \varphi'] : m_\alpha}{\Sigma (W_1 + W_2) \sin \alpha} \quad (19)$$

gdje je  $m_\alpha = \cos \alpha + \tan \alpha \frac{\tan \varphi'}{F_s}$

Jednadžba za faktor sigurnosti implicitna je i izračunava se iterativnim postupkom. U praksi se zanemaruju sile među lamelama ( $\Delta X_n = 0$ ), a usporedba s točnijim rješenjem pokazuje da je pogreška manja od 7% (obično manja od 2%). Analizu stabilnosti za linije klizanja bilo kojeg oblika prvi je proveo N. Janbu 1954. godine i dao je jednadžbu:

$$F_s = \frac{\Sigma [c' b + (W_1 + W_2 - bu_s) \tan \varphi'] : n_\alpha f_0}{Q + \Sigma (W_1 + W_2) \tan \alpha} \quad (20)$$

gdje je  $n_\alpha = \cos^2 \alpha \left( 1 + \frac{\tan \alpha \tan \varphi'}{F_s} \right)$ , a  $f_0$  koeficijent ovisan o du-

ljini i debljini kliznog segmenta, te o udjelu kohezije i trenja u posmičnoj čvrstoći, kojim se korigira rezultat zbog utjecaja sile  $\Delta X_n$ . Ne može se odrediti koliko to utječe na točnost proračuna jer nisu zadovoljeni svi uvjeti ravnoteže na jednoj od lamela i jer su prilikom postavljanja uvjeta ravnoteže momenata zanemareni članovi drugog reda. Metoda E. Nonveiller (1965) razmatra ravnotežu momenata za cjelokupno klizno tijelo, a ploha sloma ima bilo kakav oblik po volji odabranog pola. Faktor sigurnosti određuje se iz izraza:

$$F_s = \frac{\Sigma [c' b + (W_1 + W_2 + \Delta y - ub) \tan \varphi'] \frac{a}{m_\alpha}}{\Sigma (W_1 + W_2) x - \Sigma [W_1 + W_2 + \Delta y + (ub \tan \varphi' - c' b) \frac{\tan \alpha}{F_s}] \frac{f}{m_\alpha}}$$

Pri toj metodi postavlja se pitanje izbora momentnog pola, jer faktor sigurnosti može donekle ovisiti o položaju toga pola.

N. R. Morgenstern i V. E. Price 1965. godine razmatrali su ravnotežu mogućeg kliznog tijela u diferencijalnoj formi. Tu su zadovoljeni svi uvjeti ravnoteže, što ne vrijedi za ostale spomenute metode. Prednost te metode nije u bitno uspješnijem izboru pretpostavki kojima je eliminirana statička neodređenost, nego u pravilnijem pristupu numeričkoj analizi. Pogreške koje se pojavljuju primjenom ostalih metoda, zbog toga što nisu ispunjeni svi uvjeti ravnoteže, nije moguće općenito procijeniti, jer one ovise kako o primjenjenoj metodi tako i o slučaju koji se ispituje. Čini se da najčešće te pogreške nisu velike, osim kad se upotrebljava aproksimativna metoda lamela.

Sve spomenute metode osnivaju se na pretpostavci o linearnoj ovisnosti posmične čvrstoće i efektivnog normalnog napreznja. Ispitivanja tla i stijena, međutim, često pokazuju da postoji nelinearna ovisnost tih dviju veličina. Metodu proračuna stabilnosti kosina za nelinearne zavisnosti predložio je Dž. Sarač 1947. godine.

Metode konačnih elemenata. Tom se metodom uzimaju u obzir primarna napreznja, anizotropija pojava diskontinuiteta, promjena uvjeta ravnoteže postupnom gradnjom ili iskopom i sl.

Pojava progresivnog sloma materijala kad čvrstoća opada s porastom deformacije također se može analizirati metodom konačnih elemenata.

Razvoj te metode, kao jedne od numeričkih metoda, bio je omogućen pojavom elektroničkih računala. Metoda se primjenjuje u inženjerstvu za rješavanje najrazličitijih problema teorije konstrukcija i mehanike kontinuuma uopće, pa je njena primjena u mehanici tla samo jedna od mogućih upotreba te metode.

Ta metoda za analizu stabilnosti kosina jest principijelno novi pristup prema ostalima metodama, jer ona uzima odnose između naprezanja i deformacija.

Međutim, činjenica je da danas ne postoji određeni kriterij koji bi se mogao primjenjivati u praksi za neposredno iskorištavanje rezultata proračuna metodom konačnih elemenata kad se određuje mjerodavni nagib kosine ili sigurnost s obzirom na slom tla. U primjeni metode granične ravnoteže, i pored nedostataka u osnovnoj koncepciji, faktor sigurnosti opće je uvedeni i na iskustvu zasnovani kriterij za ocjenu stabilnosti, pa je primjena te metode u praksi jednostavna. Zbog toga primjena metoda teorije plastičnosti i granične ravnoteže ostaje i dalje aktuelna, posebice to vrijedi za metodu granične ravnoteže. Može se pretpostaviti da će se istodobno sve više razvijati i primjenjivati analiza metodom konačnih elemenata za nelinearno deformabilan materijal. To će omogućiti da se u analizi stabilnosti kosina obuhvate i deformacije što nije moguće drugim metodama.

**Sanacija klizišta.** Mjere za smirivanje nastalih klizanja treba temeljiti na poznavanju uzroka zbog kojih su nastali poremećaji stabilnosti i pokreti na kosini. Zbog toga su potrebna različita istraživanja koja moraju obuhvatiti: geodetsko snimanje terena na području klizanja, geološka istraživanja područja, geomehanički sastav slojeva tla i njihove karakteristike, oscilacije i pad podzemnih voda, smjer, intenzitet i brzina pomaka kosine, položaj plohe ili zone sloma, te moguće uzroke sloma.

Prikupljeni podaci služe kao podloga za kontrolu stabilnosti pokrenutog područja kosine. Ako proračun stabilnosti daje faktor sigurnosti  $F_s \approx 1,0$ , tada su parametri posmične čvrstoće i uzroci klizanja ispravno određeni.

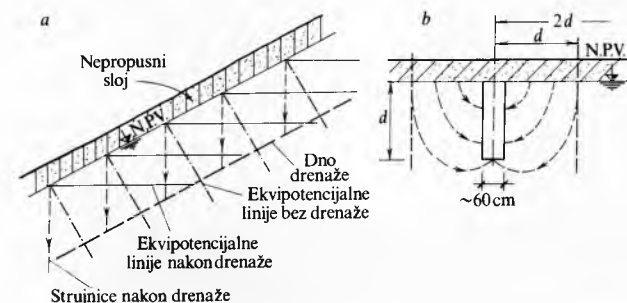
Kad su poznati uzroci klizanja i provjereni parametri, može se pristupiti projektiranju sanacije klizišta.

Najčešće su mjere za sanaciju klizišta: promjena oblika kosine i sniženje vodostaja podzemnih voda te promjena smjera njenog toka pomoću drenaže. Klizanje na kosini smirit će se ako se smanje naprezanja ili poveća čvrstoća tla.

Mjere koje smanjuju naprezanja jesu: rasterećenje gornjeg dijela klizišta, opterećenje donjeg dijela klizišta, povoljnije skretanje i usmjeravanje strujnog tlaka.

Mjere koje povećavaju čvrstoću kosine jesu: prikladno opterećenje donjeg dijela klizišta kad je ono od nekoherentnih materijala, smanjenje tlakova u porama i posebni postupci kao što su injektiranje i elektroosmoza. Mjere za smanjenje naprezanja uvijek su korisne, ali efekt korisnosti ovisi o vrsti tla (koherentno ili nekoherentno tlo).

Uspješnost provedenih mjera prema projektu kontrolira se analizom stabilnosti tako da omjer faktora sigurnosti nakon provedene sanacije ( $F_{sa}$ ) i faktora sigurnosti prirodne kosine ( $F_s$ ) bude  $\geq 1,2$ .



Sl. 17. Strujno polje na kosini s drenažom i bez nje. a presjek uz bočnu stranu drena, b poprečni presjek kroz drenažu

Stabilizacijske mjere s rasterećenjem odnosno opterećenjem daju najbolji efekt kada se mase mogu prebaciti s gornjega na donji dio klizišta.

Dreniranjem se snižuju vodostaji podzemnih voda i povoljnije usmjeruje strujanje vode, što smanjuje strujni tlak. Drenira se kopanjem u zasjecima do 6,0 m dubine ili horizontalnim bušotinama duljine do 150 metara.

Razmak drenažnih zasjeka ili bušotina odabire se tako da se postigne toliko smanjenje strujnog tlaka koliko je potrebno da se poveća koeficijent sigurnosti. Ispuna drenažnih otvora mora osigurati njihovo trajno djelovanje (sl. 17).

Osnove na kojima se temelji projekt sanacije klizišta nikad nisu sasvim pouzdane zbog heterogenosti materijala u kosinama i mnogo faktora koji utječu na faktor stabilnosti kosine. Zato projekt sanacije treba zamisliti kao osnovne smjernice unutar kojih će u se u toku radova provesti i promjene osnovane na novim podacima. Nakon dovršenja radova potrebno je i dalje posmatrati pomake na kosini, jer to će potvrditi uspješnost izvršenih radova ili dati informacije za potrebne dodatne radove kojima će se postići zadovoljavajuće smirenje tla.

LIT.: K. Terzaghi, Mechanism of landslides. John Wiley, New York 1950. — A. W. Bishop, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, The Institution of civil engineers, London 1955. — L. Šuklje, Mehanika tal. Univerza v Ljubljani, Ljubljana 1967. — O. C. Zienkiewicz, Y. C. Cheng, The finite element method in structural and continuum mechanics. McGraw Hill, New York 1967. — N. R. Morgenstern, Rock mechanics in engineering practice. John Wiley and Sons, London 1968. — L. Šuklje, Rheological aspects of soil mechanics. John Wiley — Interscience, London 1969. — N. Janbu, Slope stability computations, Embankment — Dam Engineering. John Wiley and Sons, New York 1973. — Dž. Sarač, Metode proračuna stabilnosti kosina u mehanici tla. Institut za geotehniku i fundiranje Građevinskog fakulteta, Sarajevo 1976. — E. Norveiller, Mehanika tla i temeljenje građevina. Školska knjiga, Zagreb 1979.

I. Kleiner

**KLOR, hlor** (Chlorum, Cl), kemijski element, red. br. 17, at. masa 35,453, drugi u VIIb skupini periodskog sustava (između fluora i broma).

Prma starogrčkom  $\chi\lambda\varsigma$  hals sol i  $\gamma\epsilon\nu\omega$  genao stvaram elementi se te skupine, koja uz fluor (v. Fluor, TE 5, str. 493) i brom (v. Brom, TE 2, str. 539) obuhvaća još i jod (v. Jod, TE 6, str. 631) i astat, nazivaju još i halogenima. Time se izražava njihova težnja da direktno grade soli.

Elektronska je konfiguracija klora  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$ . Prirodni se klor sastoji od dva stabilna izotopa:  $^{35}\text{Cl}$  i  $^{37}\text{Cl}$ . Njihovi su sadržaji u toj smjesi 75,77% i 24,23%. Osim tih, poznato je još sedam više ili manje dobro identificiranih radioaktivnih izotopa klora:  $^{32}\text{Cl}$ ,  $^{33}\text{Cl}$ ,  $^{34}\text{Cl}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Cl}$  i  $^{40}\text{Cl}$ . Radioaktivni su izotopi klora raspadaju uz zračenje  $\beta^+$  ( $^{32}\text{Cl}$ ,  $^{33}\text{Cl}$ ,  $^{34}\text{Cl}$  i  $^{36}\text{Cl}$ ), ili/i  $\beta^-$  ( $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Cl}$  i  $^{40}\text{Cl}$ ). Zračenje je  $^{36}\text{Cl}$  popraćeno K-zahvatom. Njegovo je vrijeme poluraspada  $3,1 \cdot 10^5$  godina. Vrijeme je poluraspada ostalih radioaktivnih izotopa klora mnogo kraće: varira od 0,31 s ( $^{32}\text{Cl}$ ) do  $\sim 1$  h ( $^{39}\text{Cl}$ ).

Vjerojatno su već u XIII stoljeću alkemičari, koji su u svojim pokusima grijali zlatotopku, poznavali pare klora. Međutim, prvi ih je zabilježio C. W. Scheele, 1774, kad ih je primijetio u reakciji kloridne (solne) kiseline s mangan(IV)-oksidom, ali ni on nije spoznao da su to pare kemijskog elementa. Više od trideset godina nakon toga mislilo se da su to pare kiseline i nazivale su se oksimurijatičnom kiselinom. Tek je 1810. H. Davy, na temelju svojih ispitivanja i neuspjeha L. J. Gay-Lussaca i J. Thénarda da razlože oksimurijatičnu kiselinu, zaključio da je ona element i dao mu ime chlorine (klor), prema starogrčkom  $\chi\lambda\omega\rho\varsigma$  chloros zelenožut, i simbol Cl. Zbog toga se otkriće klora i pripisuje Davyju.

Prvi put je klor upotrijebljen u industriji za bijeljenje 1799, ali u vrlo malim količinama. Industrijska je potrošnja klora ostala vrlo malena sve do druge polovice XIX stoljeća. Tada je njegova potrošnja za bijeljenje počela rasti toliko da se pojavila potreba novih procesa proizvodnje. Prvi industrijski proces proizvodnje klora izradio je W. Weldon 1866. Taj se proces zasnivao na Scheeleovoj metodi oksidacije kloridne kiseline mangan(IV)-oksidom, ali je obuhvaćao i dobivanje klorovodika iz kamene soli i sulfatne (sumporne) kiseline i regeneraciju mangan(IV)-oksida. Već 1872. izradio je H. Deacon novi industrijski postupak proizvodnje klora u kojem je namjesto mangan(IV)-oksidom katalitički oksidirao klorovodik zrakom. Za katalizator je u tom postupku upotrijebljen bakar(II)-klorid.

Tim se postupcima proizvodilo samo razrijeđeni klor, ali je i to bilo dovoljno da se iz njega i vapna proizvede kalcij-hipoklorit kao proizvod koji je u tadašnjim prilikama bio jedino poznato sredstvo za transport klora do