

### Meccanismo della rottura progressiva nei pendii costituiti da argille plastiche sovraconsolidate o da « argiloscisti ».

L. BJERRUM: *The third Terzaghi lecture. Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales.* Journ. Soil Mech. Div., Proc. ASCE, vol. 93, SM 5, 1967.

#### Proprietà delle argille non degradate

Nelle argille sovra-consolidate e negli argiloscisti gli sforzi di taglio medi sulle superfici di slittamento delle frane sono spesso minori della resistenza al taglio determinata con prove di laboratorio.

La discrepanza tra prove di laboratorio e comportamento in sede può spiegarsi ricordando che nelle argille la resistenza al taglio diminuisce all'aumentare della deformazione fino ad un valore costante che rappresenta la resistenza « residua » del materiale. Il parametro  $\varphi_R$ , che esprime la resistenza residua, sembra dipendere solo dalle dimensioni, granulometria, forma e natura mineralogica dei costituenti della roccia.

Sulla base di tali considerazioni scavi e pendii dovrebbero essere dimensionati ammettendo che la resistenza al taglio del materiale sia pari al valore residuo; sarebbe cioè necessario adottare pendenze talmente basse da rendere proibitivo il costo di qualsiasi opera che comporti scavi in argilla. Deve osservarsi che se la stabilità dei pendii dipendesse effettivamente dal valore residuo della resistenza al taglio, i rilievi naturali dovrebbero avere versanti pochissimo acclivi.

Nel tentativo di giustificare tale comportamento BJERRUM presenta una interpretazione delle proprietà delle argille sovraconsolidate. Queste, dopo la loro deposizione sono sottoposte in sede all'azione di carichi elevati e che agiscono per tempi lunghissimi, si raggiunge così l'equilibrio tra contenuto d'acqua e carico agente. Parte del costipamento è reversibile ed è restituito in seguito allo scarico. La parte resti-

tuita dipende dalle proprietà dei costituenti argillosi che, deformati durante la consolidazione, tendono a riassumere la loro forma originaria dopo avvenuto lo scarico. Un'argilla consolidata contiene perciò un certo quantitativo di energia di deformazione restituibile.

Se l'argilla consolidata rimane per tempi sufficientemente lunghi (scala geologica dei tempi) sotto carichi costanti in essa possono avvenire trasformazioni chimiche e fisiche per effetto dei processi di diagenesi. Tali processi provocano la ricristallizzazione dei granuli nei punti di contatto di modo che le particelle vicine si « saldano » tra loro. La saldatura può essere causata anche dalla precipitazione di sostanze cementanti nelle zone di contatto tra i granuli.

Nelle argille possono pertanto formarsi dei legami che l'A. definisce *legami diagenetici*. Tali legami, la cui forza varia da argilla ad argilla in dipendenza della salinità dell'acqua interstiziale, della composizione mineralogica e della pressione di consolidazione, imprimono all'argilla una resistenza elevata ed un comportamento fragile.

Durante le fasi di scarico conseguenti all'erosione l'argilla tende ad aumentare il suo volume, ma a tale tendenza si oppongono i legami diagenetici. Se però la riduzione del carico è molto marcata i legami si rompono in numero via via crescente e il contenuto d'acqua aumenta.

Durante la sedimentazione le pressioni efficaci verticali ed orizzontali aumentano gradualmente. In fase di scarico, l'argilla che contiene energia restituibile si espande. L'espansione avviene in direzione verticale e non in quella orizzontale dato che in questa direzione la espansione è praticamente impedita. Di conseguenza la variazione delle pressioni efficaci verticali è più marcata di quella delle pressioni orizzontali. Se nell'argilla si sono sviluppati legami diagenetici, questi si oppongono all'espansione dell'argilla e la struttura formata dalle scaglie deformate di minerali argillosi fa sì che le pressioni orizzontali siano minori di

quelle che si hanno in un'argilla senza legami.

Se viene superato un certo valore della differenza tra pressioni efficaci verticali ed orizzontali, gli sforzi di taglio superano la resistenza dell'argilla. Possono così svilupparsi superfici di rottura e si hanno piccoli movimenti. L'entità delle deformazioni necessarie per ridurre le pressioni orizzontali al valore limite, dipende dalla rigidità strutturale dell'argilla e cioè dalla forza dei legami.

#### Effetti della degradazione esterna

Con il termine degradazione (weathering) l'A. intende le modifiche dello strato superficiale di argilla provocate dagli agenti esterni.

Nel caso di argille sovraconsolidate con legami forti il processo di degradazione è distinto in due fasi: una di *disintegrazione*, durante la quale si distrugge la struttura dell'argilla a causa della rottura dei legami, ed una di *alterazione chimica* dei costituenti. La prima fase avviene molto rapidamente (in scala di tempi geologici) ed è la più importante per ciò che concerne le variazioni delle proprietà meccaniche.

L'effetto principale della disintegrazione è la rottura dei legami e la conseguente liberazione dell'energia di deformazione. L'argilla si espande, il contenuto d'acqua aumenta e la resistenza al taglio si riduce. La espansione avviene in direzione normale alla superficie libera; poichè l'espansione parallelamente a detta superficie non è consentita, la liberazione graduale dell'energia provoca un aumento delle tensioni efficaci in questa direzione.

Nelle argille con legami deboli, la maggior parte dell'energia si libera durante la fase di scarico e pertanto gli effetti della disintegrazione sono trascurabili. Se invece i legami sono forti, solo una piccola parte dell'energia si libera durante lo scarico e di conseguenza l'espansione nella zona di disintegrazione è marcata.

La distruzione dei legami è dovuta

principalmente alle deformazioni. Nella zona di disintegrazione totale, prossima alle superfici libere agiscono le alteranze di temperatura e di umidità. Le deformazioni che accompagnano questi fenomeni sono molto efficaci nel provocare la disintegrazione. In questa zona avvengono anche fenomeni chimici (ossidazione e trasformazione di alcuni costituenti).

Nella zona di disintegrazione avanzata, le deformazioni possono essere dovute a variazioni cicliche delle tensioni efficaci dipendenti dalle oscillazioni della falda idrica. In questa zona può esistere un sistema di fratture aperte in cui circola acqua.

Nella zona di disintegrazione media, lontana dalla superficie del suolo, le deformazioni sono grandi soprattutto se la zona stessa è sita sotto un pendio. In questa zona sarebbero state riscontrate variazioni della composizione mineralogica dell'argilla. Tali differenze sono causa di rigonfiamenti e di deformazioni non uniformi. Non è improbabile che queste deformazioni siano sufficientemente grandi per causare rotture locali per taglio. I sistemi irregolari di piccole fratture che si osservano nelle zone di disintegrazione delle argille sovraconsolidate e degli argilloscisti potrebbero cioè spiegarsi ammettendo una non uniforme distribuzione delle rotture dei legami.

#### Meccanismo della rottura progressiva

I franamenti nelle argille plastiche sovraconsolidate sono preceduti dalla formazione di una superficie di slittamento continua provocata da un fenomeno di rottura progressiva della massa.

Per spiegare il meccanismo della rottura progressiva l'A. fa riferimento al caso di un fronte verticale in un'argilla con elevata energia di deformazione, nella quale, pertanto, le pressioni orizzontali sono elevate (fig. 1).

Prima della creazione del fronte la forza  $E_A$  sul piano  $AA'$  era in equilibrio con una forza orizzontale sul piano  $OO'$ . L'annullarsi della forza agente su questo piano per effetto dello scavo porta alla redistribuzione degli sforzi. Per l'equilibrio del masso di terra  $AA'OO'$  deve essere

$$E_A = \int_0^A \tau \, dl$$

ove  $\tau$  è lo sforzo di taglio sulla superficie  $OA$ .

Gli sforzi di taglio su questa superficie sono distribuiti come riportato in fig 1 b.

$$\text{Posto } K = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\text{med}}} \text{ si ha}$$

$$\tau_{\max} = K \frac{E_A}{\Delta l}$$

Se  $E_A$  è tanto grande che  $\tau_{\max}$  è maggiore della resistenza al taglio massima, a partire dal punto  $O$  si propaga una rottura che avanza fino al punto  $P_1$  in cui lo sforzo di taglio diviene eguale o minore del valore massimo della resistenza.

Dato il contenuto di energia restituibile la massa di argilla  $P_1P_1'O$  si espande verso il fronte libero con deformazione e gradienti di deformazione come quelli indicati nella fig. 1 c e 1 d. Per effetto di queste deformazioni (figura 1 b) la resistenza al taglio lungo  $OP_1$  si abbassa fino al valore residuo e la forza  $E_p$  sul piano  $P_1P_1'$  è data dalla

$$E_p = \int_0^{P_1} s \, dl$$

ove  $s$  è la resistenza al taglio.

La diminuzione di  $E_p$  porta ad una nuova distribuzione degli sforzi nel masso  $BB'P_1P_1'$ .

Ripetendo il ragionamento fatto in precedenza, lo sforzo di taglio lungo il piano  $PB$  aumenta ed il suo valore massimo è dato da

$$\tau_{\max} = k \frac{E_B - E_p}{\Delta l}$$

Se questo valore è maggiore della resistenza massima, la rottura avanza da  $P_1$  a  $P_2$  e successivamente, con meccanismo del tutto analogo, fino al punto  $P_3$  a distanza  $l$  da  $OO'$ . La forza orizzontale massima  $E_p$  sul piano  $P_3P_3'$  è uguale alla resistenza allo scorrimento lungo il piano di rottura  $OP_3$  ed è data da  $E_p = l s_{\text{res}}$ .

Se il piano  $CC'$  è tanto lontano da  $P_3$  che la forza orizzontale  $E_c$  non è influenzata dalla rottura per taglio, lo sforzo di taglio massimo lungo  $P_3C$  è dato da

$$\tau_{\max} = k \frac{E_c - E_p}{\Delta l}$$

Dato che  $E_p$  è direttamente proporzionale ad  $l$  risulta che la rottura si arresterà alla distanza da  $OO'$  per cui

$$\tau_{\max} = s_{\text{max}}$$

Se la superficie limite superiore dell'argilla è inclinata rispetto all'orizzon-

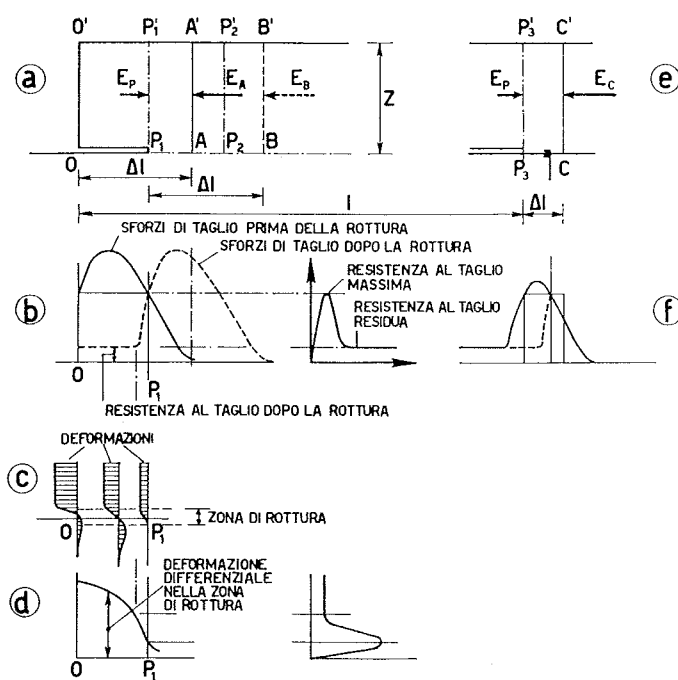


Fig. 1

tale si deve tener conto anche dell'azione della gravità.

Le proprietà delle argille in cui possono verificarsi fenomeni di rottura progressiva possono esprimersi quantitativamente mediante tre rapporti.

1) Gli sforzi di taglio locali devono essere maggiori della resistenza massima locale; il pericolo di rottura progressiva cresce con il rapporto  $p_H/s_p$  tra la tensione orizzontale  $p_H$  e la massima resistenza al taglio  $s_p$ .

2) Le deformazioni differenziali locali nella zona di rottura devono essere tanto grandi da deformare l'argilla oltre il valore della deformazione corrispondente alla resistenza massima. Il rapporto  $\varepsilon_H/\varepsilon_p$  misura di quanto la deformazione orizzontale  $\varepsilon_H$  è maggiore della deformazione  $\varepsilon_p$  corrispondente alla resistenza massima.

3) La resistenza al taglio per valori elevati della deformazione deve essere molto minore della resistenza massima dell'argilla. In tal modo la resistenza allo scorrimento lungo la superficie di rottura non si oppone allo spostamento necessario per fare avanzare la zona di concentrazione degli sforzi entro la massa di argilla intatta. Il rapporto  $s_p/s_{res}$  esprime il grado di « strain softening » dell'argilla.

Per un eguale grado di consolidazione e per eguali caratteristiche geometriche le tre condizioni su indicate saranno diversamente soddisfatte in dipendenza della forza dei legami diagenetici, dello stadio di alterazione e della plasticità dell'argilla. In tabella 1 è riportata una classifica di pericolosità per diversi tipi di argille.

TABELLA I

	Argilla plastica sovraconsolidata con legami deboli		Argilla plastica sovraconsolidata con legami forti		Argilla sovraconsolidata con plasticità bassa
	non degradata	degradata	non degradata	degradata	
$p_H/s_p$	2	3	0-1	3	1
$\varepsilon_H/\varepsilon_p$	2	2	1	3	0-1
$s_p/s_{res}$	2	1	3	2	0-1
Pericolosità nei riguardi della rottura progressiva	Alta	Alta	Bassa	Molto alta	Molto bassa

In base alle osservazioni effettuate su numerose frane vengono considerati esempi tipici di rottura progressiva i casi di fig. 2 a e 2 b; il primo, relativo ad uno scavo in argilla con legami deboli, il secondo ad un'argilla con legami forti. In entrambi i casi lo spo-

stamento della massa franante è prevalentemente orizzontale e la superficie di slittamento per rottura progressiva tende a svilupparsi secondo una superficie orizzontale o che segue i giunti di stratificazione.

gilla provocando un aumento delle tensioni parallele alla superficie. La rimozione del sostegno laterale, per effetto dell'erosione o di uno scavo, fa sì che le tensioni laterali siano trasmesse all'argilla non degradata dagli sforzi di

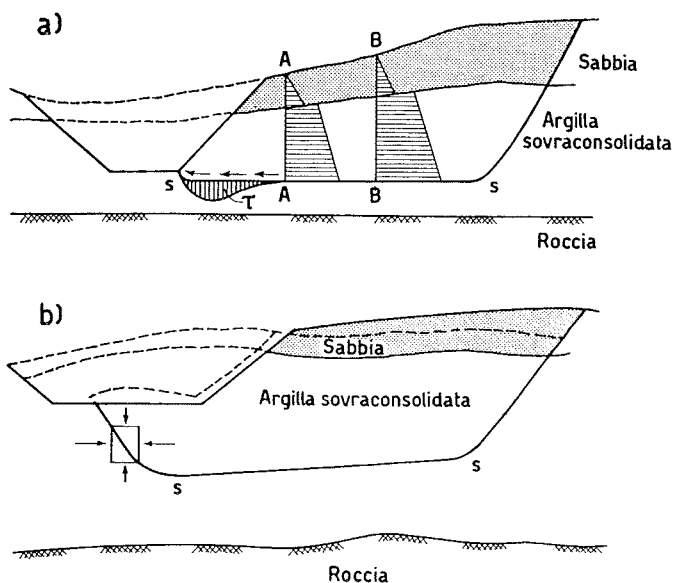


Fig. 2

Molte frane avvengono lungo superfici di slittamento pressochè parallele alla superficie del suolo. Le frane di questo tipo sono caratterizzate da una grande estensione e da modesto spessore ed interessano la fascia di terreno degradato.

Il meccanismo della rottura progressiva in questi materiali può essere il-

taglio agenti sul piano SS. Questi sforzi si sommano a quelli derivanti dalla gravità e pertanto a monte del fronte ripido vi è una concentrazione di sforzi; se questi sono maggiori della resistenza al taglio massima vi è uno slittamento locale e l'inizio della rottura progressiva.

Dato che la componente coesiva della resistenza massima è apprezzabile, la resistenza dell'argilla nella zona di alterazione aumenta solo debolmente con la profondità. Gli sforzi di taglio dovuti alla gravità ed alle tensioni laterali, invece, aumentano proporzionalmente con la profondità. Ciò spiega perchè il piano di slittamento tende ad iniziare alla massima profondità possibile ed è in realtà sito nella parte basale della fascia di alterazione.

In generale la velocità con cui si sviluppa la rottura progressiva dipende dall'inclinazione del versante, dall'entità delle pressioni laterali di rigonfiamento e dalla resistenza massima dell'argilla.

Possono distinguersi tre condizioni.

1) Se le tensioni laterali interne sono tanto alte che gli sforzi di taglio locali sono dello stesso ordine di grandezza della resistenza al taglio non drenata, la rottura progressiva si sviluppa molto rapidamente.

2) Se le tensioni interne hanno valori tali che gli sforzi di taglio locali sono minori della resistenza al taglio non drenata, ma maggiori della resistenza drenata, la rottura avviene lentamente. Nelle zone di concentrazione degli sforzi l'argilla tende a dilatarsi e ad aumentare il suo contenuto di acqua. La resistenza al taglio tende perciò a decrescere dal valore non drenato fino al valore drenato. La velocità con cui procede la rottura è pertanto regolata dal tempo necessario perché la resistenza si abbassi fino ad un valore minore di quello dello sforzo agente.

3) Se gli sforzi di taglio sono minori della resistenza drenata non vi è rottura nemmeno quando il contenuto d'acqua si è posto in equilibrio con le condizioni di sollecitazione. La rottura progressiva avviene solo se le tensioni laterali aumentano con il tempo per effetto della disintegrazione dell'argilla e del rilascio delle tensioni accumulate. In questi casi la frana può avvenire dopo anni, decenni o secoli dall'istante in cui ha iniziato ad agire la causa efficiente.

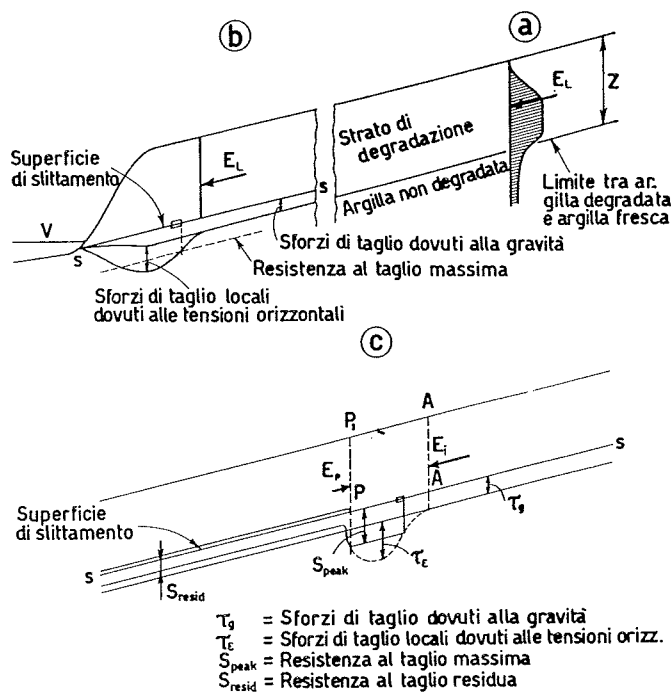


Fig. 3

#### Fenomeni di creep nei pendii nelle argille plastiche sovraconsolidate

Con il termine « creep » l'A. intende il movimento lentissimo del terreno costituente un pendio.

I movimenti di creep sono più accentuati nelle argille ad elevata consistenza; essi interessano infatti gli argilloscisti e le formazioni tipo « argille scagiose », mentre non sembra siano stati osservati nelle argille soffici delle regioni scandinave e del Canada.

I fenomeni di creep appaiono cioè da collegare alla lenta espansione che accompagna la disintegrazione delle argille sovraconsolidate e degli argilloscisti con elevata energia di deformazione.

Sulla base di tale ipotesi i requisiti perchè si verificano fenomeni di creep sono:

1) i costituenti argillosi del terreno devono avere marcate caratteristiche elastiche;

2) i legami formati quando l'argilla era sottoposta alla massima pressione di consolidazione devono essere tanto forti da non consentire la liberazione dell'energia di deformazione durante la fase di scarico; questi legami vengono distrutti quando l'argilla è sottoposta agli agenti fisici e chimici dell'alterazione;

3) le trasformazioni chimiche e mi-

neralogiche verificatesi quando l'argilla era sotto carico non devono distruggere le proprietà elastiche delle particelle argillose;

4) l'energia che si libera quando la struttura dell'argilla è distrutta dalla alterazione esterna deve essere sufficiente per far aumentare le tensioni laterali fino a valori tali che, insieme alle tensioni indotte dalla gravità, possano essere causa di rottura progressiva nella massa di argilla.

Se il pendio è ripido e la resistenza residua dell'argilla è minore degli sforzi taglienti i movimenti di creep conducono ad un franamento. Dopo il franamento viene esposta una nuova superficie e il processo si ripete. La durata dell'intervallo di tempo con cui si susseguono le frane dipende dalla celerità con cui procede la degradazione della fascia superficiale.

Se il pendio è poco acclive e le forze di taglio dovute alla gravità sono eguali alla resistenza residua il pendio è interessato da un movimento di creep lento e uniforme, non seguito da una frana. In una prima fase del fenomeno si ha la formazione di una superficie di scorrimento continua per rottura progressiva della massa di argilla. Quando la zolla superficiale è separata dall'argilla sottostante, l'espansione laterale, dovuta al procedere della degradazione causa movimenti di creep, da-

to che la resistenza allo scorrimento lungo la superficie di rottura è molto bassa. Con il procedere dei movimenti la disintegrazione dell'argilla aumenta con conseguente diminuzione della resistenza residua ed accelerazioni locali dei movimenti.

Se gli sforzi di taglio sono minori della resistenza residua non si verificano fenomeni di creep nel pendio. Movimenti laterali dovuti alle tensioni interne possono avvenire in alcune zone, ma non pregiudicano la stabilità generale del pendio.

#### Conclusioni

1) I dati disponibili sembrano indicare che le frane nelle argille plastiche sovraconsolidate e negli argilloscisti sono precedute dalla formazione di una superficie di scorrimento, dovuta ad un fenomeno di rottura progressiva, lungo la quale la resistenza al taglio dell'argilla è uguale al valore residuo.

2) La formazione di una superficie di scorrimento per rottura progressiva è possibile se le tensioni laterali interne sono tanto elevate da causare concentrazioni di sforzi nella zona in cui inizia a formarsi la superficie di scorrimento.

L'argilla deve contenere energia di

deformazione restituibile sufficiente per causare la espansione dell'argilla nella direzione dello scivolamento.

3) In alcune argille l'energia di deformazione, accumulata durante la consolidazione, viene restituita non appena si ha una diminuzione delle tensioni; in altre, invece, tale energia viene trattenuta dai legami diagenetici. Tali legami impediscono alle scaglie di minerale argilloso di espandersi quando viene rimosso il carico. Essi sono distrutti gradualmente dagli agenti dell'alterazione esterna con la conseguente liberazione dell'energia accumulata.

4) L'energia è restituita quasi totalmente durante lo scarico nelle argille con legami deboli. L'argilla si rigonfia quasi senza impedimento ed il rapporto tra tensioni efficaci orizzontali e verticali aumenta durante il rigonfiamento. Poichè le deformazioni laterali sono di regola impedito l'argilla ha una tendenza ad espandersi in direzione orizzontale. Gli effetti dell'alterazione esterna sono molto modesti.

Nelle argille con legami forti l'energia è trattenuta durante lo scarico. Il rigonfiamento è perciò impedito, le tensioni efficaci orizzontali sono relativamente basse e la tendenza alla espansione in direzione orizzontale è limitata. Quando i legami sono distrutti dagli agenti dell'alterazione esterna si ha un energico rigonfiamento, un aumento delle tensioni efficaci parallelamente alla superficie libera e la tendenza ad espandersi nella stessa direzione.

5) La possibilità di rottura progressiva è diversa a seconda del momento in cui si libera l'energia accumulata nell'argilla. Le più pericolose sono le argille sovraconsolidate e con legami forti sottoposte all'alterazione esterna. Seguono le argille sovraconsolidate con legami deboli. Le meno pericolose sono le argille sovraconsolidate con legami tanto forti da impedire la liberazione dell'energia accumulata.

6) Dall'esame dei dati relativi a circa 60 frane è risultato che circa il 55 % di queste interessa la coltre di degradazione dell'energia nella fascia di alterazione.

8) Sembra in definitiva che i fenomeni di instabilità dei pendii nelle argille sovraconsolidate dipendano dall'energia di deformazione trattenuta in queste argille per effetto dei legami diagenetici e dalla liberazione di energia che si ha quando i legami vengono distrutti.

(Franco Esu)

### Coefficienti di consolidazione e di permeabilità di un terreno da prove in sito a carico costante.

R. E. GIBSON - *An analysis of system flexibility and its effect on time-lag in pore water pressure measurements.* Geotechnique, Vol. XIII, 1963.

R. E. GIBSON - *A note on the constant-head test to measure soil permeability.* Geotechnique, Vol. XVI, 1966.

In un terreno saturo d'acqua l'A. immagina d'installare un piezometro come in fig. 1. Questo è costituito di elemento poroso terminale di ceramica non smaltata a forma di sfera cava; l'elemento poroso è a sua volta completamente immerso in un filtro di sabbia, anch'esso sferico.

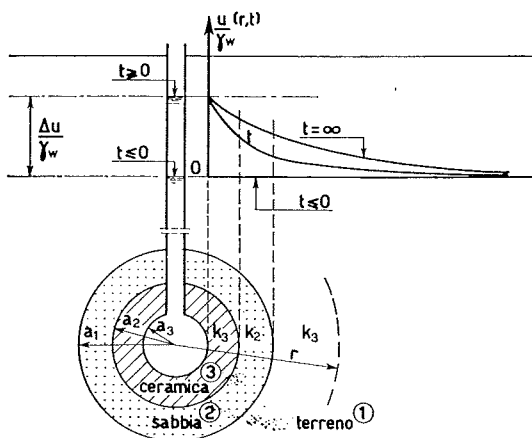


Fig. 1. - Pressioni neutre nell'intorno di una presa piezometrica sferica.

Nelle condizioni iniziali, l'acqua raggiunge nel piezometro la quota 0 corrispondente alla pressione neutra che regna nell'ambiente in prossimità della sfera. Nell'istante  $t = 0$ , si genera con manovra istantanea una variazione  $\frac{\Delta u}{\gamma_w}$  dell'altezza della colonna d'acqua all'interno del piezometro e si immagini di mantenere invariato nel tempo il livello così raggiunto.

Per effetto di questa manovra ha inizio nel terreno un fenomeno di rigonfiamento (o di consolidazione) e si verifica un moto di filtrazione nel terreno da (o verso) l'elemento poroso del piezometro.

Indicando con  $u_1, u_2, u_3$  gli incrementi di pressione neutra che si determinano in un punto generico, rispettivamente del terreno, della sabbia e della ceramica, rispetto al valore iniziale, per la simmetria del problema, le  $u$  saranno funzioni solo del raggio

generico  $r$  e del tempo  $t$ .

Per la ricerca delle espressioni delle  $u$  l'A. si pone nell'ipotesi che l'elemento poroso di ceramica, e la sabbia del filtro siano incomprimibili e caratterizzati, rispettivamente, dai coefficienti di permeabilità  $k_2$  e  $k_3$ ; che il terreno abbia un coefficiente di consolidazione  $c$  e di permeabilità  $k_1$ ; che siano valide infine le ipotesi della teoria della consolidazione di Terzaghi.

Con i simboli della fig. 1 le pressioni neutre  $u_1, u_2, u_3$  devono allora soddisfare le seguenti equazioni:

per  $r > a_1$

$$c \left( \frac{\partial^2 u_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_1}{\partial r} \right) = \frac{\partial u_1}{\partial t}$$

per  $a_2 < r < a_1$

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_2}{\partial r} = 0$$

per  $a_3 < r < a_2$

$$\frac{\partial^2 u_3}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_3}{\partial r} = 0$$

In corrispondenza delle superfici sferiche che delimitano i mezzi 1-2 e 2-3 possono scriversi le condizioni di eguaglianza dei valori delle pressioni neutre, nonché le condizioni di continuità:

per  $r = a_1$

$$u_1 = u_2 \quad k_1 \frac{\partial u_1}{\partial r} = k_2 \frac{\partial u_2}{\partial r}$$

per  $r = a_2$

$$u_2 = u_3 \quad k_2 \frac{\partial u_2}{\partial r} = k_3 \frac{\partial u_3}{\partial r}$$