



Internationales Symposion INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

ALCUNE OSSERVAZIONI SULL'IMPIEGO DELLA PROVA DI TAGLIO SEMPLICE NELLA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI TERRENI COINVOLTI IN MOVIMENTI FRANOSI

SOME OBSERVATIONS ON THE USE OF THE SIMPLE SHEAR APPARATUS TO CHARACTERIZE THE MECHANICAL RESPONSE OF SOILS INVOLVED IN LANDSLIDES

Silvia Beriotta, Simonetta Cola e Paolo Simonini¹

RIASSUNTO

Nell'articolo sono illustrati alcuni risultati preliminari di un'indagine sperimentale condotta con un apparecchio di taglio semplice, recentemente modificato al fine di applicare ad un campione stati di deformazione di taglio puro in condizioni di controllo di carico e/o di drenaggio. Scopo dello studio è valutare se l'apparecchio di taglio semplice sia idoneo a riprodurre stati di tensione e di deformazione non simmetrici caratteristici dei movimenti di versante. Per la sperimentazione condotta è stato utilizzato un terreno coesivo appartenente ad un versante recentemente interessato da un rilevante fenomeno franoso.

Parole chiave: taglio semplice, movimenti di versante, terreni coesivi

ABSTRACT

The paper presents some preliminary results of an experimental investigation recently carried out using a modified simple shear apparatus, to characterize the mechanical response of a fine grained soil coming from a large landslide occurred in the Italian Alps. More particularly, the aim is to evaluate the applicability of the modified simple shear apparatus, capable of applying to a soil specimen a deformation of pure shear under load and/or drainage control, to reproduce the soil behaviour under non-symmetric strain and stress states typically occurring in fast and slow slope movements.

Key words: simple shear, slope movements, cohesive soils

INTRODUZIONE

L'interesse principale della ricerca qui presentata è quello di valutare la possibilità d'impiego dell'apparecchio di taglio semplice quale dispositivo di misura della risposta meccanica dei terreni nelle condizioni di sollecitazione caratteristiche dei versanti naturali.

¹ Dipartimento IMAGE – Università di Padova, Via Ognissanti, 39 – 35129 Padova – Italia, 049-8277980, simonetta.cola@unipd.it, paolo.simonini@unipd.it.

Tra le apparecchiature geotecniche, la scatola di taglio semplice (Kjellman, 1951; Bjerrum e Landva, 1966; Roscoe, 1953) è l'unica in grado di applicare al campione stati di deformazione di taglio puro. Inoltre, a differenza della più comune attrezzatura di taglio diretto, ha la possibilità di controllare le pressioni neutrali e le variazioni di volume, permettendo quindi l'esecuzione di prove in diverse condizioni di drenaggio oppure di variare le pressioni neutrali al contorno del campione durante la fase di taglio.

Infine, con alcune modifiche del sistema di carico, è possibile applicare al terreno un stato tensionale non simmetrico già nella fase di consolidazione, come illustrato nello schema a destra di figura 1, oppure condurre prove di taglio incrementando in modo discreto lo sforzo di taglio e mantenendo poi costante (prove a carico costante o di *creep*).

Queste ultime opportunità sono particolarmente adatte allo studio della resistenza dei terreni su versanti, dove lo stato tensionale a riposo è contraddistinto da una sollecitazione di taglio iniziale non nulla. Infatti, è stato recentemente dimostrato (Biscontin, 2001) come, nel caso il terreno sia consolidato in una condizione tensionale non simmetrica, il comportamento a taglio sia molto diverso da quello di un terreno consolidato alla stessa tensione normale ma in condizioni simmetriche.

A causa delle condizioni cinematiche imposte al provino, il dispositivo di taglio semplice è adatto particolarmente allo studio di fenomeni franosi nei quali la rottura si presenti diffusa nella massa di terreno in movimento. Situazioni di questo tipo si verificano nelle frane in terreni poco consistenti o nelle colate di fango o di detrito (*mud-flow* e *debris-flow*).

Il presente articolo riassume e commenta i principali risultati ottenuti fino ad ora, nell'ambito di un'ampia ricerca attualmente in fase di sviluppo presso il Laboratorio di Geotecnica dell'Università di Padova.

IL DISPOSITIVO DI TAGLIO SEMPLICE

Il dispositivo di taglio semplice (direct simple shear, DSS) ha avuto un grande sviluppo soprattutto negli anni '60 e '70. Tre sono i principali dispositivi esistenti, realizzati rispettivamente presso il Swedish Geotechnical Institute, il Norwegian Geotechnical Institute e l'Università di Cambridge, e noti come tipo SGI (Kjellman, 1951), tipo NGI (Bjerrum e Landva, 1966) e tipo Cambridge (Roscoe, 1953).

Il DSS è in grado di applicare uno sforzo tagliante τ_{zx} alla base del campione, in modo tale che quest'ultimo, a partire da uno stato tensionale assialsimmetrico, si deformi in condizioni di deformazione piana, come illustrato nello schema di destra della figura 1. Ciò avviene senza necessariamente dare luogo alla formazione di una banda di taglio come avviene invece nel taglio diretto.

Per tale caratteristica il taglio semplice si presta allo studio di fenomeni d'instabilità dei pendii, quali *mud-flow* o *debris-flow*, in cui non si ha una superficie di rottura ben definita come invece avviene nei pendii in argille sovraconsolidate.

Un altro vantaggio del dispositivo di taglio semplice, rispetto ad altre attrezzature di taglio, è poter controllare e misu-

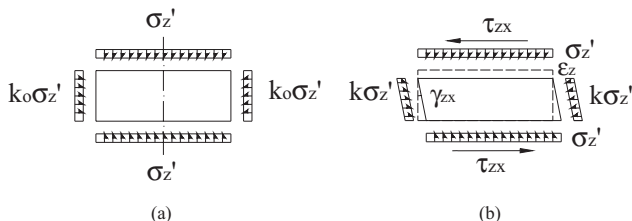


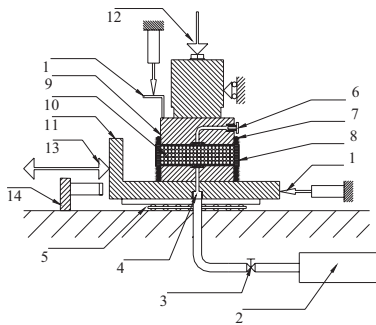
Fig. 1: Stato tensionale anisotropo simmetrico e non simmetrico applicato ad un provino nell'apparecchiatura di taglio semplice.

Fig. 1: Symmetrical and non-symmetrical stress condition in a sample.

rare la pressione neutrale durante la prova.

Tuttavia, mentre lo stato di deformazione è noto perché imposto dall'esterno, la definizione completa dello stato tensionale è invece possibile solo assumendo delle ipotesi interpretative (Randolph e Wroth, 1981). A tale scopo si possono considerare tre differenti ipotesi, note come ipotesi della massima obliquità tensionale (De Josselin de Jong, 1971), della massima tensione tangenziale (Potts e Martins, 1982) e di coassialità (Potts et al., 1987).

Le diverse modalità di interpretazione conducono, a parità di valori di sforzo verticale σ_z' e tensione tangenziale τ_{zx} , a differenti risultati in termini cerchi di Mohr e, di conseguenza, a differenti valori di angolo di attrito. Infatti, per quanto riguarda le prime due interpretazioni, l'ipotesi di massima obliquità tensionale fornisce un valore dell'angolo di attrito superiore rispetto a quello ottenuto nell'ipotesi di massima tensione tangenziale, anche se i due valori differiscono al massimo di 1°. Invece, l'ipotesi di coassialità introduce nei calcoli l'angolo di dilatanza e, di conseguenza, l'angolo d'attrito dipende da questo parametro.



- | | | | |
|---|---|----|--|
| 1 | Trasduttore di spostamento | 8 | Anelli in ottone |
| 2 | Dispositivo digitale di controllo delle pressioni | 9 | Membrana in lattice |
| 3 | Valvola per il controllo del drenaggio | 10 | Pistone |
| 4 | Drenaggio inferiore | 11 | Carrello |
| 5 | Binari scorrevoli | 12 | Carico verticale |
| 6 | Drenaggio superiore | 13 | Carico orizzontale |
| 7 | O-Rings | 14 | Trasduttore di spostamento di non contatto |

Fig. 2: Dispositivo di taglio semplice.

Fig. 2: Simple shear apparatus.

L'ATTREZZATURA IMPIEGATA

Il dispositivo di taglio semplice diretto, in dotazione presso l'Università di Padova ed utilizzato nel presente programma di prove, è un modello tipo SGI.

L'attrezzatura, che in condizioni standard consente di eseguire solamente prove a velocità di deformazione costante, è stata opportunamente modificata nei sistemi di drenaggio, di misura delle variazioni di volume del terreno e d'applicazione dello sforzo di taglio. La figura 2 mostra l'attrezzatura di taglio semplice modificata come descritto di seguito.

Con riferimento al primo aspetto, è stato aggiunto un drenaggio inferiore alla base della cella che contiene il campione, per consentire la saturazione completa del materiale; tale drenaggio è stato collegato ad un dispositivo digitale per il controllo delle pressioni neutrali e del volume di fluido immesso o espulso dalla cella.

In aggiunta, il drenaggio superiore è stato collegato ad un tubicino in PVC rigido, attraverso il quale s'impone una depressione per favorire la circolazione dell'acqua e la fuoriuscita delle bolle d'aria durante la fase di saturazione.

Per applicare uno stato di tensione non simmetrico al campione durante la fase di consolidazione, è stato aggiunto un sistema meccanico per controllare lo sforzo di taglio. Questo sistema consente anche di eseguire prove di taglio a carico costante (prove di *creep*), con uno sforzo di taglio che può essere incrementato a gradini fino al raggiungimento della

condizione di rottura.

Nelle prove di *creep* le velocità di deformazione sono molto piccole e per migliorarne la misura, è stato necessario aggiungere un trasduttore di spostamento di non contatto che permette di apprezzare con precisione spostamenti dell'ordine del micron.

Tutti i sistemi di misura sono stati collegati, attraverso un'interfaccia analogico-digitale, ad un computer per l'acquisizione automatica dei dati, soluzione che ha permesso di condurre prove di lunga durata.

PROGRAMMA DI PROVE

Il terreno utilizzato in questa prima fase del programma di prove proviene dalle pendici del monte Cima Salti, a Tenno (Trentino sud-occidentale), dove, nel 2000, è avvenuto un movimento franoso di ampie dimensioni (Cerato *et al.*, 2004). E' un'argilla molto limosa, con limite liquido $LL=45\%$, limite plastico $LP=25\%$ ed un indice di plasticità $IP=20\%$. Allo stato naturale è costituito da una matrice fine contenente alcuni elementi litici di dimensioni inferiori al centimetro, che sono stati eliminati mediante vagliatura a secco al fine di ottenere un materiale omogeneo.

I campioni per le prove sono stati preparati consolidando la frazione fine (passante al vaglio ASTM n.10) in un edometro di diametro 100 mm fino ad una tensione massima di 80 kPa. Dal materiale così ottenuto sono fustellati i provini, aventi diametro 70 mm e altezza 20 mm, da introdurre nella cella di taglio semplice.

Dentro la scatola di taglio, tutti i campioni sono stati sottoposti a saturazione ed ad ulteriore consolidazione fino alla tensione normale di prova: la completa consolidazione del provino si ottiene in circa 24 ore. Nel caso di prove su terreno sovraconsolidato, il provino è successivamente scaricato fino allo stato tensionale prescelto, permettendo un riequilibrio delle pressioni neutre interne.

Al termine della consolidazione, il campione è sottoposto alla fase di taglio fino a rottura.

Per questo materiale, risultato poco dilatante, i tre criteri d'interpretazione forniscono valori dell'angolo d'attrito pressoché coincidenti. Nel seguito si farà riferimento ai valori ottenuti sulla base del criterio massima obliquità tensionale (Figura 3) che assume come piani di massima obliquità tensionale i piani orizzontali sui quali agiscono le tensioni $\sigma_v'=\sigma_z'$ e τ_{zx} . In base a questa considerazione, l'espressione per calcolare l'angolo d'attrito risulta:

$$\tan \phi = \frac{\tau_{zx}}{\sigma_z'} \quad (1)$$

Allo scopo di provare il comportamento del materiale in condizioni di taglio puro e verificare l'applicabilità dei risultati ai fenomeni di stabilità precedentemente citati, sono state previste diverse tipologie di prova. Fino ad ora sono state eseguite prove a deformazione costante o a carico costante, le cui caratteristiche principali sono riassunte in tabella 1. In particolare:

- Prove a velocità di deformazione costante in condizioni non drenate su materiale normalmente consolidato a diverse tensioni verticali (SSU-C1, C2, C3).
- Prove a velocità di deformazione costante non drenate su materiale con diversi gradi di sovraconsolidazione (SSU-OC2, OC3).

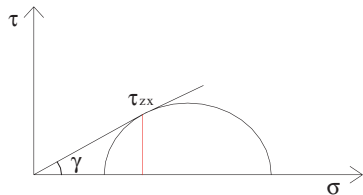


Fig. 3: Criterio di massima obliquità tensionale.
Fig. 3: Maximum shear obliquity principle.

- Prove a velocità di deformazione costante drenate su terreno normalconsolidato a diverse tensioni verticali (SSD-C1, C2, C3). Una di queste prove è stata ripetuta con una diversa velocità di deformazione (SSD-C4).
- Prove a carico costante di *creep* in condizioni drenate su terreno normalconsolidato a due diverse tensioni (SSD-I1, I2). Queste ultime sono state eseguite allo scopo di esaminare l'effetto della modalità di applicazione del carico a parità di tensione normale applicata.

I simboli riportati in tabella 1 rappresentano: la velocità di deformazione v , la tensione di consolidazione σ'_c , l'indice dei vuoti finale e , la tensione verticale efficace $\sigma'_{v,finale}$ in corrispondenza della massima resistenza al taglio, la massima resistenza al taglio misurata τ_{max} e il grado di sovraconsolidazione OCR.

Per le prove di *creep*, anziché la velocità di deformazione è riportata la durata d'applicazione di ogni singolo gradino di carico. Tale parametro è differente nelle due prove condotte, poiché è stato necessario disporre di più dati per ogni fase a sforzo di taglio costante, in modo da meglio evidenziare la dipendenza della velocità di deformazione dal tempo. Di tali risultati non si discute in quest'articolo perché sono ancora in fase di approfondimento.

PROVE A VELOCITA' DI DEFORMAZIONE COSTANTE

Prove non drenate su materiale normalmente consolidato

Durante la fase di taglio si misura lo sforzo di taglio e la pressione neutrale, funzione del livello di deformazione durante la prova in condizioni non drenate.

Le curve in figura 4 mostrano come la tensione tangenziale presenti un andamento crescente nel tratto iniziale, assestandosi attorno ad un valore costante per valori di γ_x maggiori del 10%, mentre la pressione neutrale continua a crescere. Pertanto non sembra esserci proporzionalità tra i due parametri, anche perché le curve rappresentanti l'andamento della

Tab. 1: Elenco delle prove eseguite e loro principali caratteristiche.
Tab. 1: Test program and main characteristics of tests.

PROVE A VELOCITA' DI DEFORMAZIONE COSTANTE							
Prova	v (mm/min)	σ'_c (kPa)	E	$\sigma'_{v,finale}$ (kPa)	τ_{max} (kPa)	OCR	Condizioni di drenaggio
SSU-C1	0.036	200	0.70	147.8	32.5	1	Non drenata
SSU-C2	0.036	300	0.65	244.8	61.7	1	Non drenata
SSU-C3	0.036	400	0.60	338.8	76.9	1	Non drenata
SSU-OC2	0.036	400	0.62	201.5	60.4	2	Non drenata
SSU-OC3	0.036	400	0.68	111.0	39.4	4	Non drenata
SSD-C1	0.0032	200	0.62	200	48.3	1	Drenata
SSD-C2	0.0032	300	0.57	300	72.0	1	Drenata
SSD-C3	0.0032	400	0.54	400	92.4	1	Drenata
SSD-C4	0.00048	200	0.63	200	56.3	1	Drenata
PROVE DI TAGLIO A CARICO COSTANTE							
Prova	Durata step di carico (gg.)	σ'_c (kPa)	E	$\sigma'_{v,finale}$ (kPa)	τ_{max} (kPa)	OCR	Condizioni di drenaggio
SSD-I1	1-2	200	0.65	200	57.0	1	Drenata
SSD-I2	3-4	400	0.56	400	113.7	1	Drenata

pressione neutrale tendono a coincidere.

In figura 5 sono rappresentati i cerchi di Mohr dello stato tensionale a rottura nelle tre prove. Malgrado il particolare andamento delle pressioni neutrali, essi risultano di diametro proporzionale alla tensione di consolidazione, caratteristica questa dei terreni normalmente consolidati. E' possibile così individuare un involucro a rottura passante per l'origine e contraddistinto da un angolo di attrito pari a circa 13°.

Prove non drenate su materiale sovraconsolidato

A consolidazione ultimata, i provini sono stati portati a rottura in modo del tutto analogo a quelli normalmente consolidati. Le grandezze misurate durante le prove sono riportate nelle figure 6 e 7. In figura 6 si può notare come anche in questo caso la tensione tangenziale, dopo un iniziale tratto crescente, per scorrimenti superiori al 10%, si assesti attorno ad un valore costante proporzionale al grado di sovraconsolidazione applicato al campione. E' pure

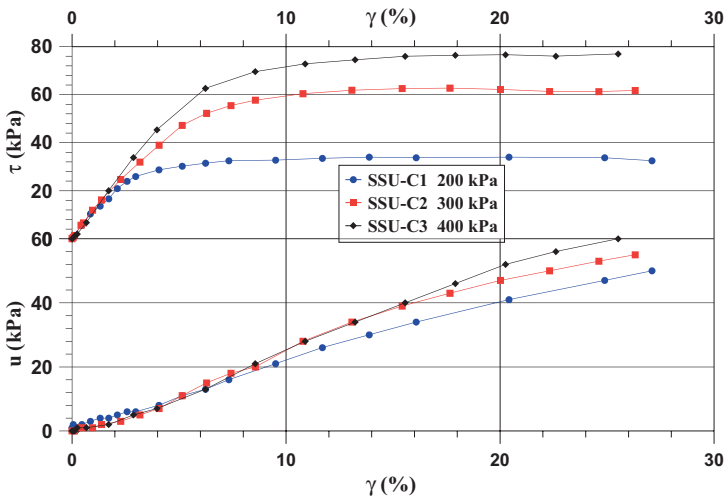


Fig. 4: Tensione tangenziale e pressione neutrale in funzione della deformazione di taglio per le prove non drenate su terreno normalconsolidato.

Fig. 4: Shear stress and pore pressure vs. shear strain in undrained tests on normally consolidated

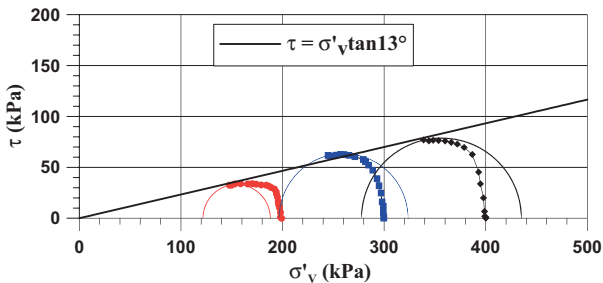


Fig. 5: Involuppo a rottura nel piano di Mohr per le prove non drenate su terreno normalconsolidato.

Fig. 5: Mohr-Coulomb envelope for undrained tests on normally consolidated specimens.

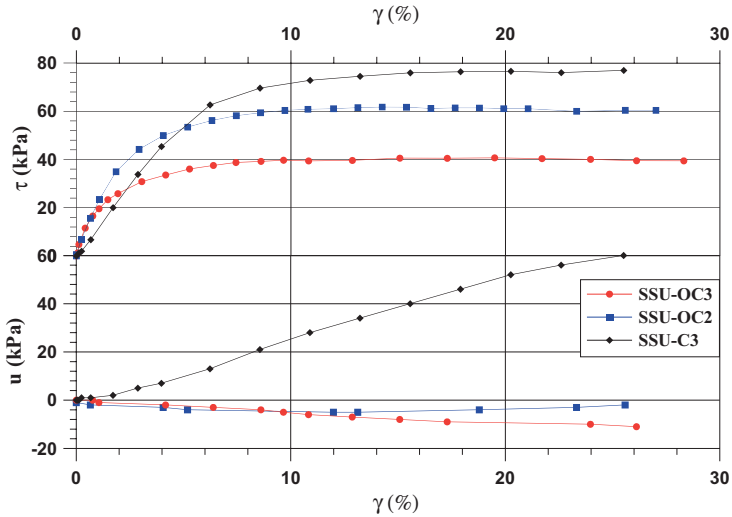


Fig. 6: Tensione tangenziale e pressione neutrale in funzione della deformazione di taglio per le prove non drenate su terreno sovraconsolidato.

Fig. 6: Shear stress and pore pressure vs. shear strain for undrained tests on overconsolidated specimens.

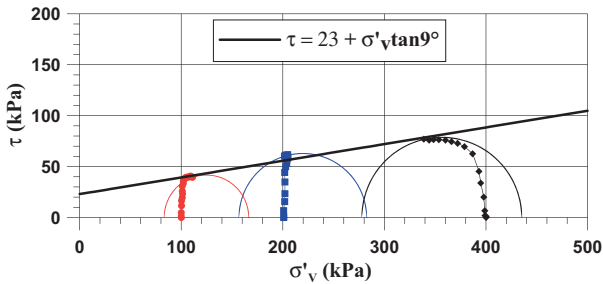


Fig. 7: Involuppo a rottura nel piano di Mohr per le prove non drenate su terreno sovraconsolidato.

Fig. 7: Mohr-Coulomb envelope for undrained tests on overconsolidated specimens.

evidente una maggior rigidezza nel tratto iniziale della curva tensione-scorrimento nel caso di provini sovraconsolidati rispetto a quello con $OCR=1$.

La pressione neutrale passa invece da valori positivi, per il provino normalmente consolidato, a valori negativi per i provini sovraconsolidati. Tale comportamento si nota pure nel piano di Mohr (figura 7) dove i percorsi tensionali cambiano direzione girando verso destra. L'involuppo a rottura in questo caso fornisce un valore di angolo di attrito di circa 9° e un valore di coesione intercetta pari a circa 23 kPa.

Prove drenate su materiale normalmente consolidato

La fase di taglio risulta differente rispetto a quella delle prove precedenti poiché nelle prove

drenate il drenaggio inferiore è mantenuto aperto. Inoltre si è adottata una velocità di deformazione notevolmente ridotta rispetto al caso non drenato (0.0032 mm/min contro 0.036 mm/min) per garantire che non ci siano sovrappressioni neutrali all'interno del provino. L'andamento della tensione tangenziale è crescente fino al raggiungimento del valore di rottura, come si osserva in figura 8; la tensione finale risulta proporzionale alla tensione di consolidazione. Le deformazioni verticali presentano un andamento pressoché lineare sempre crescente e sembrano non dipendere dallo stato tensionale agente poiché le curve sono quasi coincidenti. L'involuppo a rottura in figura 9 fornisce un valore di angolo di attrito di circa 13° confermando i risultati ottenuti nelle prove non drenate su materiale normalmente consolidato.

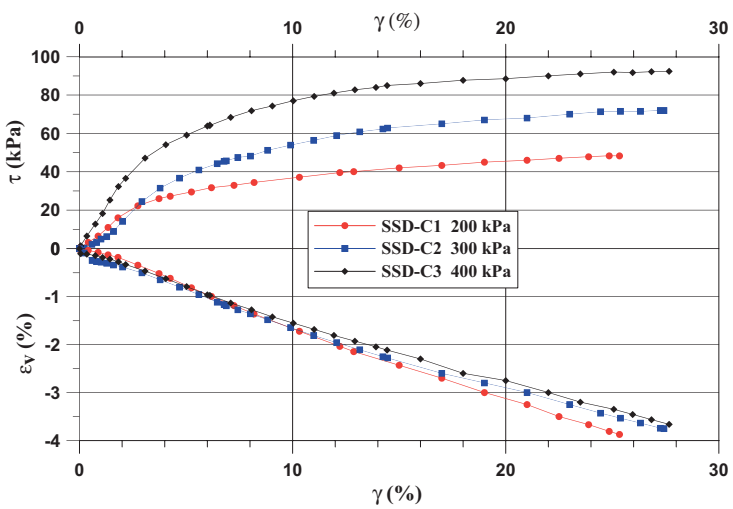


Fig. 8: Tensione tangenziale e deformazione verticale in funzione della deformazione di taglio per le prove drenate a velocità costante.

Fig. 8: Stress and vertical deformation versus shear strain for drained tests at constant rate.

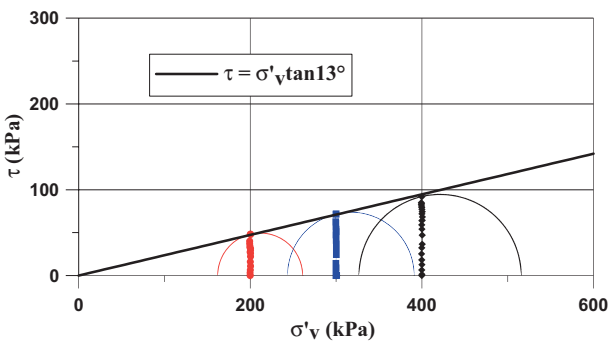


Fig. 9: Involuppo a rottura nel piano di Mohr per le prove drenate a velocità costante.

Fig. 9: Mohr relationship for drained tests at constant rate.

PROVE AD INCREMENTI DI SFORZO DI TAGLIO

Nelle prove a carico costante la rottura del campione avviene applicando incrementi di carico orizzontale di entità decrescente fino al raggiungimento di un valore di deformazione angolare pari al 20-25% oppure finché non si verifica una brusca accelerazione delle deformazioni di taglio.

Per quanto riguarda la prova con tensione verticale di 200 kPa, ogni gradino di carico è stato mantenuto per 1-2 giorni, mentre per la prova a 400 kPa la durata delle fasi a carico costante è stata aumentata fino a 3-4 giorni. In particolare, allo scopo di individuare ancor meglio l'andamento della velocità di deformazione nel tempo, l'ultimo gradino di carico nella prova SSD-I2 è stato mantenuto per circa 10 giorni.

In figura 10 è riportato il grafico della tensione normalizzata e della deformazione verticale in funzione della deformazione angolare. Si può osservare come le due prove diano risultati analoghi in termini di resistenza al taglio e quindi di angolo di attrito, anche se in questo caso l'angolo di attrito risultante è di circa 16° (vedi figura 11). Pertanto, rispetto alle prove a velocità costante, le prove di *creep* forniscono resistenze maggiori, mettendo in evidenza due aspetti molto importanti: l'influenza della durata della prova e della modalità con cui il campione è portato a rottura. Entrambi questi fattori saranno discussi in dettaglio nel paragrafo successivo.

La deformazione verticale, invece, pur presentando l'andamento caratteristico delle prove di *creep*, non sembra dipendere dallo sforzo normale, similmente a quanto riscontrato anche nelle prove drenate a velocità costante.

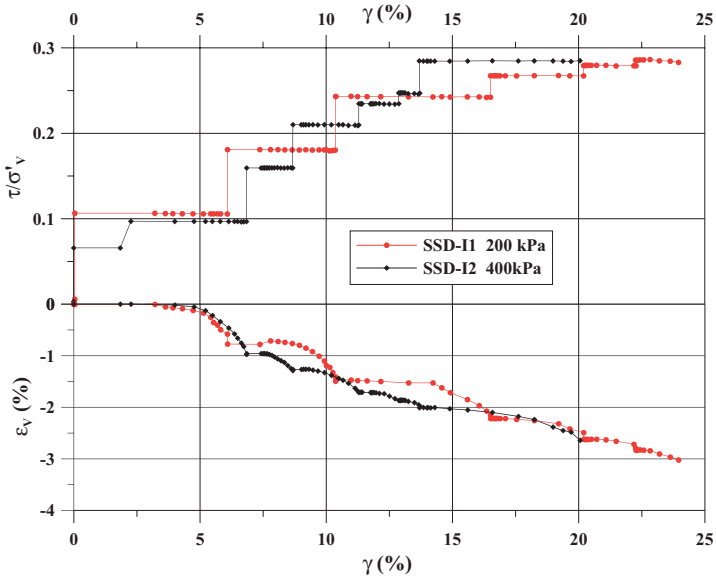


Fig. 10: Tensione tangenziale e deformazione verticale in funzione della deformazione di taglio per le prove a gradini di carico.

Fig. 10: Shear stress and vertical strain vs. shear strain in drained tests at constant shear stress.

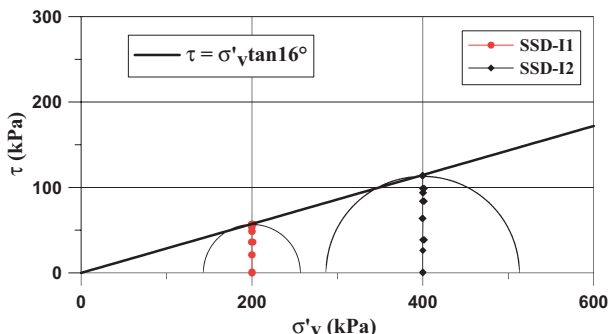


Fig. 11: Involuppo a rottura nel piano di Mohr per le prove drenate a carico costante.

Fig. 11: Mohr-Coulomb envelope for drained tests at constant shear stress.

CONFRONTO TRA I RISULTATI DELLE PROVE DRENATE

Alla tensione di 200 kPa, sono state condotte tre prove su terreno normalconsolidato e in condizioni drenate. Rispettivamente la SSD-C1 con velocità di 0.0032 mm/min., la SSD-C4 con $v = 0.00048$ mm/min e la SSD-I1 con gradini di carico.

Dal confronto dei risultati appare evidente come la modalità con cui il campione è deformato nella fase di taglio e la durata di questa fase influenzino notevolmente i valori finali di resistenza del terreno.

Per meglio evidenziare questo aspetto, in figura 12 sono riportati gli andamenti della tensione tangenziale e della deformazione verticale in funzione dello scorrimento angolare per le tre prove. La prova di *creep* SSD-I1 e la prova a velocità di deformazione costante SSD-C4 raggiungono a rottura gli stessi valori di resistenza, fatto che può essere spiegato tenendo conto che entrambe le prove, pur con modalità di carico diverse, raggiungono la rottura in un intervallo di tempo confrontabile (circa una settimana). Invece la fase di taglio della prova a velocità costante SSD-C1 è durata circa 24 ore e la resistenza finale del campione risulta inferiore a quella delle altre due prove. In termini di angolo di attrito si registra uno scarto di circa 3° .

Per quanto riguarda, invece, la deformazione verticale non si riscontrano particolari differenze, anche per le difficoltà, accennate in precedenza, connesse alla misura di tale grandezza.

CONCLUSIONI

I dati presentati nell'articolo sono i risultati preliminari di una ricerca appena iniziata presso l'Università di Padova. Essi permettono di sottolineare alcuni indiscutibili vantaggi offerti dall'apparecchiatura di taglio semplice nello studio del comportamento a taglio dei terreni, quali la possibilità di applicazione di stati di tensione non simmetrici e di deformazioni di taglio puro, caratteristici dei terreni su pendio.

I risultati ottenuti dalle prove a velocità di deformazione costante forniscono, per il terreno in esame, un valore di angolo di attrito pari a circa 13° . Questo valore risulta essere piuttosto basso, soprattutto se confrontato con i risultati di prove di taglio diretto sullo stesso materiale, le quali forniscono un angolo di $16\pm 18^\circ$ (Crepaldi, 2000). Pertanto, si può osservare come i risultati ottenuti con il dispositivo di taglio semplice si pongano, rispetto ai valori di altre

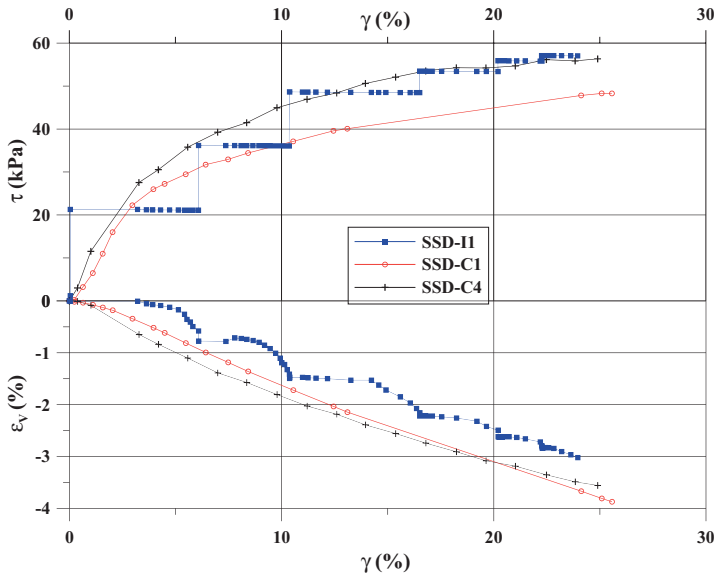


Fig. 12: Tensione tangenziale e deformazione verticale in funzione della deformazione di taglio per le prove a gradini di carico.

Fig. 12: Shear stress and vertical strain vs. shear strain for drained tests at constant shear stress.

apparecchiature, come un limite inferiore. Quest'affermazione trova riscontro anche in altri studi eseguiti con tale attrezzatura (Biscontin, 2001).

Infine, le modifiche apportate al dispositivo e descritte nell'articolo permetteranno di ampliare il campo della ricerca allo studio di fenomeni di *creep* riguardanti movimenti franosi e di studiare l'innesco di fenomeni di colata.

Con particolare riguardo al comportamento viscoso a taglio, dal confronto tra prove di *creep* e prove a velocità di deformazione costante, risulta evidente come la durata della fase di taglio influenzi la resistenza finale del terreno. Infatti, se la rottura è raggiunta più lentamente, il materiale sembra acquisire maggiore resistenza. Questo fenomeno potrebbe essere giustificato dall'interazione di due processi: uno di natura meccanica, dovuto essenzialmente ad un riassetamento e ad una maggiore compenetrazione dei grani che compongono il terreno, e uno di natura elettrochimica, dovuto alla rottura dei legami elettrochimici esistenti tra le particelle e alla formazione di temporanee configurazioni più stabili, mano a mano che avviene il processo applicazione della sollecitazione di taglio.

Invece, la modalità con cui il campione è condotto a rottura, a parità di durata della fase di taglio, non sembra influenzare la resistenza finale del campione. Tali risultati, proprio per la loro singolarità, offrono spunto per studi successivi.

BIBLIOGRAFIA

- Atkinson J. (1997): "Geotecnica: meccanica delle terre". *McGraw-Hill*.
- Biscontin, G. (2001): "Modelling the dynamic behaviour of lightly overconsolidated soil deposits on submerged slopes". *Tesi di dottorato*, California.
- Bjerrum, L., Landva, A. (1966) Direct Simple Shear Tests on Norwegian Quick Clay, *Geotechnique*, **16**(1), pp.1-20.
- Cerato, M., Cola, S., Franceschini, A., Malpaga, L., Simonini, P., Zanetti, A. (2004) La frana di Cima Salti nel Trentino Sudoccidentale, *International Congress Interpraevent 2004*, Riva del Garda, in stampa.
- Crepaldi, D. (2000) Studio geotecnico della frana di Cima Salti Comune di Tenno. *Tesi di laurea*, Università di Padova.
- De Josselin de Jong, G. (1971) Proc. of Roscoe Memorial Symp. Stress-Strain Behaviour of Soils, Discussion on session II, pp. 258-261, ed. R.H.G. Parry, Foulis, Cambridge.
- Kjellman, W. (1951) Testing the Shear Strength of Clay in Sweden, *Geotechnique*, **1**(2), pp. 225-232.
- Potts, D.M., Dounias, G.T., Vaughan, P.R. (1987) Finite element analysis of the direct shear box test, *Geotechnique*, **37**(1), pp. 11-23.
- Potts, D.M., Martins, J.P. (1982) The shaft resistance of axially loaded piles in clay, *Geotechnique*, **32**(4), pp. 369-386.
- Randolph, M.F., Wroth, C.P. (1981) Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles, *Geotechnique*, **31**(1), pp. 143-157.
- Roscoe, K.H. (1953) An Apparatus for the Application of Simple Shear to Soil Samples. *ICSMFE, Zurich*, Vol. 1, pp. 186-191.