

SOVRAPPRESSIONI INTERSTIZIALI CICLICHE IN CONDIZIONI DI PENDIO SU TERRENI SABBIOSI DA PROVE DI TAGLIO SEMPLICE

Giuseppe Tomasello, Daniela Dominica Porcino
Università “Mediterranea” di Reggio Calabria
giuseppe.tomasello@unirc.it, daniela.porcino@unirc.it

Sommario

L'effetto di una tensione tangenziale statica iniziale sul comportamento non drenato ciclico delle sabbie ed in particolare sullo sviluppo delle sovrappressioni interstiziali associate è stato investigato conducendo prove di taglio semplice cicliche, prendendo in conto differenti valori del rapporto tensionale statico $\alpha = \tau_{stat}/\sigma'_{v0}$ nell'intervallo 0-0.30. Le prove sono state condotte su provini sciolti e densi della sabbia del Ticino ricostituiti con il metodo del “moist tamping”. I risultati ottenuti hanno evidenziato come lo sviluppo delle sovrappressioni interstiziali generate durante la sollecitazione ciclica sia significativamente influenzato dall'ampiezza del rapporto tensionale ciclico applicato (CSR) rispetto a quello statico (α) e ciò determina differenti meccanismi di rottura. Un nuovo modello di generazione delle sovrappressioni interstiziali cicliche, in grado di cogliere efficacemente la risposta osservata sotto diverse condizioni di stato iniziale, viene proposto nel presente studio fornendo altresì indicazioni sulla variazione dei parametri empirici del modello presentato.

1. Introduzione

La corretta valutazione delle sovrappressioni interstiziali generate durante un evento sismico in condizioni di pendio riveste una grande importanza sotto l'aspetto pratico in relazione all'analisi di stabilità post-sismica di pendii naturali ed artificiali, allo sviluppo dei fenomeni di liquefazione dei terreni costituenti, come nel caso delle dighe in terra (vedasi San Fernando Dam), nonché alla stima dei cedimenti dovuti alla dissipazione delle sovrappressioni interstiziali generate durante l'evento sismico. Durante un evento sismico un elemento di terreno in sito all'interno di un pendio (Figura 1) è soggetto generalmente a sollecitazioni cicliche di taglio τ_{cycl} agenti sul piano orizzontale accoppiate ad una tensione tangenziale statica pre-esistente τ_{stat} .

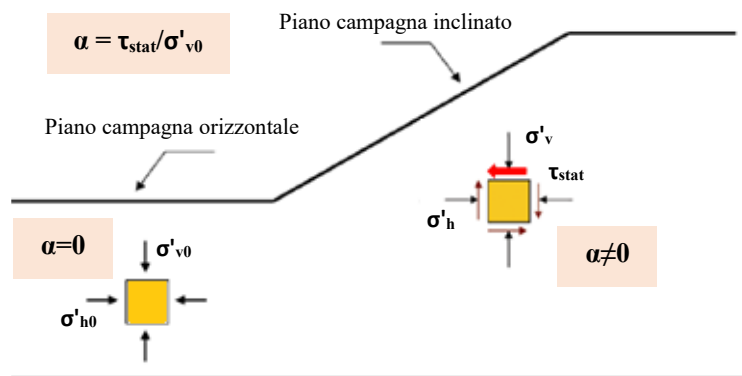


Fig 1. Condizioni tensionali in sito nei casi di piano campagna orizzontale ($\alpha=0$) e inclinato ($\alpha \neq 0$) prima di un evento sismico.

Questa situazione è di diretto interesse anche in altri problemi ingegneristici, come ad esempio nel caso dei terreni ubicati nelle immediate vicinanze di una fondazione superficiale o di un rilevato.

Il livello della tensione tangenziale statica iniziale τ_{stat} applicata sul piano orizzontale è generalmente caratterizzato dal parametro α , definito dalla relazione (Seed 1983):

$$\alpha = \frac{\tau_{stat}}{\sigma'_{v0}} \quad (1)$$

dove σ'_{v0} è la tensione verticale efficace iniziale.

Studi sull'effetto della presenza di una tensione tangenziale statica iniziale sulla resistenza alla liquefazione hanno dimostrato come tale effetto possa essere positivo ovvero benefico (ad es. Seed 1981) o negativo e quindi dannoso (ad es. Yoshimi & Oh-Oka 1975). Harder & Boulanger (1997) sulla base di diversi dati di letteratura hanno suggerito che l'effetto di α risulta essere positivo nel caso di sabbie dense ($D_R=55-70\%$) e negativo per sabbie sciolte ($D_R\approx 35\%$), mentre per sabbie mediamente addensate ($D_R=45-50\%$) esso sarebbe trascurabile. Tali indicazioni sono valide per una tensione verticale efficace inferiore a 300 kPa e valori di $\alpha \leq 0.30$.

Sebbene alcuni ricercatori concordino sul fatto che gli effetti del parametro α sul comportamento non drenato ciclico e sulla resistenza non drenata ciclica delle sabbie possano essere influenzati dalla densità relativa (ad es. Yang & Sze 2011) e dalla tensione verticale efficace (ad es. Sivathayalan & Ha 2011), non esiste ancora un generale accordo tra i risultati presentati in letteratura (Sivathayalan & Ha 2011). Attualmente gli studi riguardanti la modellazione delle sovrappressioni interstiziali cicliche in presenza di una tensione tangenziale statica applicata sono piuttosto limitati (Pan & Yang 2018; Zhang et al. 2018) e si basano su risultati sperimentali di prove triassiali cicliche.

La presente nota si è proposta principalmente: (a) di investigare gli effetti di pendio sullo sviluppo delle sovrappressioni interstiziali cicliche attraverso l'esecuzione di prove di taglio semplice non drenate cicliche condotte su una sabbia pulita, (b) di sviluppare un nuovo modello di generazione di tali sovrappressioni in grado di cogliere efficacemente la risposta osservata. L'influenza delle variabili CSR ($=\tau_{cycl}/\sigma'_{v0}$), D_R ed α sui parametri del modello è stata analizzata e discussa.

2. Apparecchiatura e procedura di prova

L'apparecchiatura di taglio semplice utilizzata è un modello Geonor/NGI, opportunamente modificata per l'esecuzione di prove non drenate cicliche a controllo di carico e di spostamento (Porcino et al. 2006). È noto che le prove di taglio semplice costituiscono un valido strumento di analisi del comportamento al taglio dei terreni poiché permettono di modellare molto più realisticamente, rispetto ad esempio all'apparecchiatura triassiale convenzionale, il comportamento sismico dei terreni sia in presenza che in assenza di condizioni di pendio.

La sabbia utilizzata è la sabbia silicea del Ticino (TS). In Figura 2 sono riportate la curva granulometrica e le sue proprietà fisiche. I provini sono stati ricostituiti utilizzando il metodo del "moist tamping", (contenuto d'acqua prefissato = $14\pm 1\%$), a due differenti valori di densità relativa $D_R = 43\%$ e 71% . I provini sono stati consolidati ad una tensione verticale efficace pari a 100 kPa. Le tensioni tangenziali cicliche (τ_{cycl}) sono state applicate intorno ad un valore della tensione tangenziale statica iniziale pari a 0 ($\tau_{stat}=0$) oppure diverso da zero ($\tau_{stat}\neq 0$), realizzando prove simmetriche ($\alpha=0$) e non simmetriche ($\alpha=0.1, 0.2, 0.3$), rispettivamente.

3. Risultati sperimentali

3.1 Meccanismi di rottura ciclica osservati

Le Figure 3 e 4 mostrano i risultati sperimentali ottenuti da due prove non drenate di taglio semplice ciclico considerando due differenti condizioni di carico: (i) $CSR/\alpha > 1$ ("shear stress-reversal") (Figura 3) e (ii) $CSR/\alpha \leq 1$ ("no shear stress-reversal") (Figura 4).

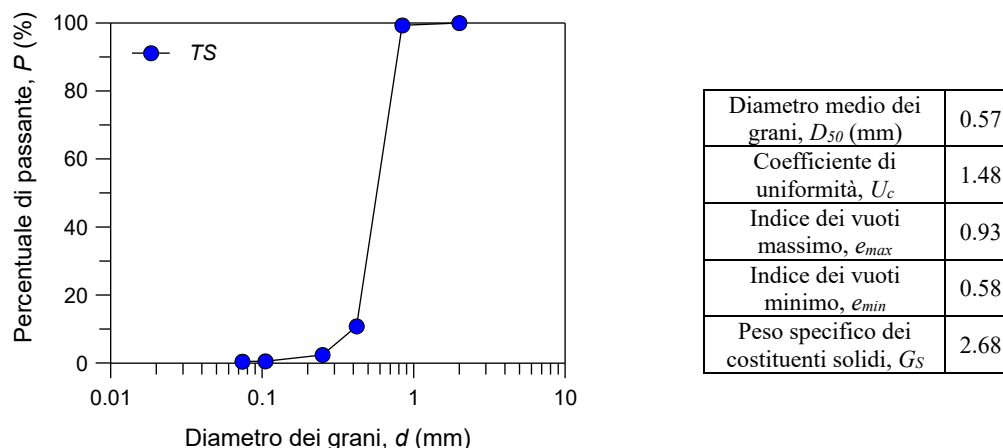


Fig 2. Curva granulometrica e proprietà fisiche della sabbia del Ticino (TS).

La Figura 3 illustra una tipica risposta di comportamento di tipo “cyclic mobility”, in accordo a Yang & Sze (2011), che nel presente studio è stata osservata in condizioni di “shear stress-reversal”. Tale comportamento è caratterizzato da una graduale e progressiva riduzione delle tensioni verticali efficaci dovuta allo sviluppo delle sovrappressioni interstiziali con il numero di cicli di carico, ed un contemporaneo aumento delle deformazioni di taglio cicliche che restano limitate fino al raggiungimento di una condizione di liquefazione iniziale ($\sigma'_v=0$). Successivamente si osservano delle escursioni transitorie dello stress-path in prossimità dell’origine, con una tipica forma “a farfalla”, e lo sviluppo di elevati livelli di deformazioni di taglio cicliche. Nei casi di un meccanismo di rottura di tipo “cyclic mobility” le sovrappressioni interstiziali misurate raggiungono valori limiti a rottura pari a 77% - 95% della tensione verticale efficace iniziale: in tal caso la rottura (cioè l’innesco della liquefazione) è definita in termini deformativi (come precisato nel seguito).

La Figura 4 mostra invece una tipica risposta di comportamento non drenato ciclico nota come “plastic strain accumulation”, in accordo a Yang & Sze (2011). Tale comportamento è stato osservato prevalentemente nei casi di “no shear stress-reversal” tuttavia, in alcuni casi, anche in condizioni di limitata inversione della tensione tangenziale ciclica applicata (“limited shear stress-reversal”). Nel caso di comportamento di tipo “plastic strain accumulation” è possibile osservare un incremento delle deformazioni di taglio nella direzione di applicazione della tensione tangenziale statica. Le tensioni verticali efficaci si riducono rapidamente nella prima fase di prova per poi stabilizzarsi (così come tendono a stabilizzarsi le sovrappressioni interstiziali Δu) lontano dall’origine. Sono stati misurati valori limiti delle Δu a rottura variabili tra il 41% e il 77% della tensione verticale efficace iniziale in funzione del valore di α ($\alpha=0.30-0.10$). In questo tipo di meccanismo la rottura è governata dall’accumulo di deformazioni residue del provino piuttosto che dalle sovrappressioni interstiziali (Yang & Sze 2011).

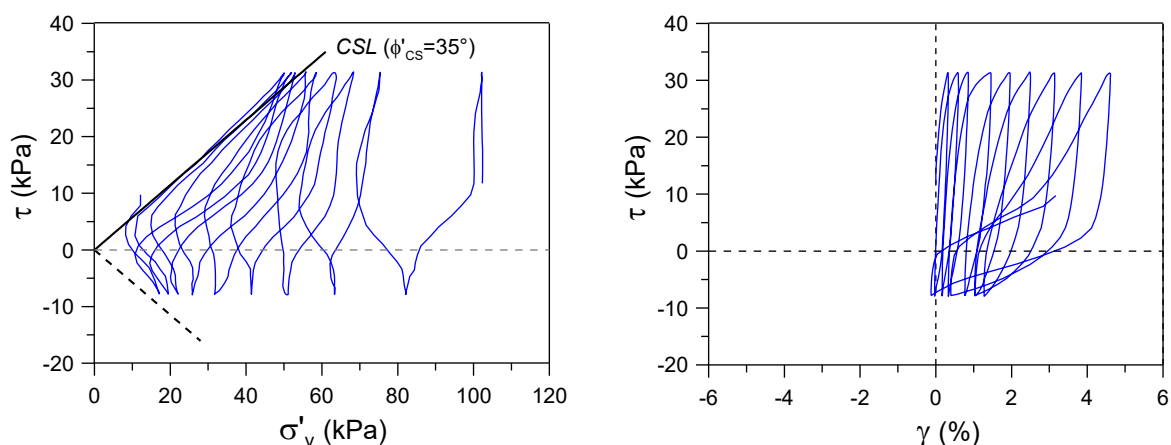


Fig 3. Comportamento di tipo “cyclic mobility” (TS, $D_R=71\%$, $\sigma'_{v0}=100$ kPa, $\alpha=0.10$, $CSR=0.20$).

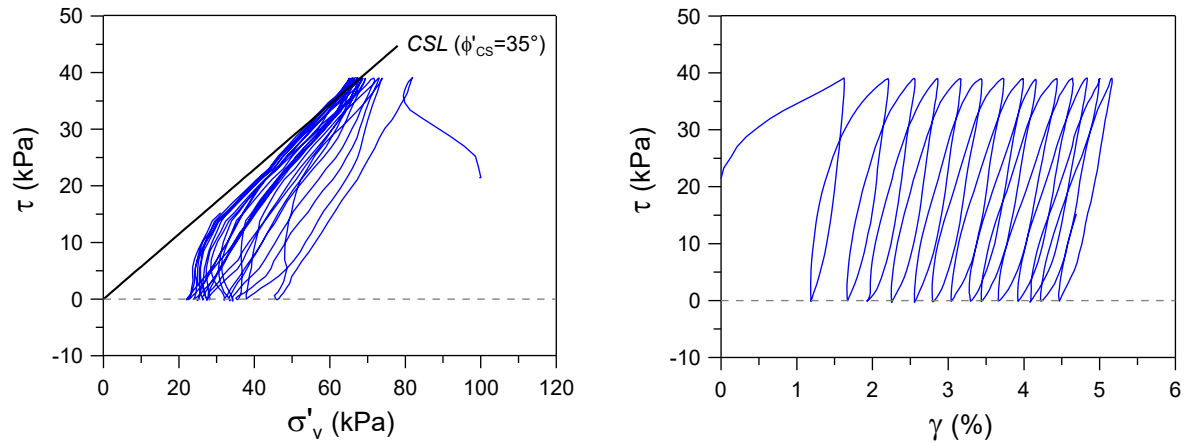


Fig 4. Comportamento di tipo “plastic strain accumulation” (TS, $D_R=71\%$, $\sigma'_{v0}=100$ kPa, $\alpha=0.20$, $CSR=0.20$).

Per tale motivo nel presente studio è stato assunto un criterio di rottura (o liquefazione) basato sul raggiungimento di una deformazione ciclica in singola ampiezza pari a 3.75% nei casi in cui il meccanismo di rottura risulti essere di tipo “cyclic mobility”, e sul raggiungimento di una deformazione di picco pari a 3.75% nel caso di “plastic strain accumulation”, in accordo ad altri autori (Sivathayalan & Ha 2011).

3.2 Generazione delle sovrappressioni interstiziali cicliche e modellazione

In Figura 5 si riportano gli andamenti del rapporto delle sovrappressioni interstiziali cicliche residue $R_{u,res}$ ovvero misurate ad ogni ciclo in corrispondenza dell’annullamento della τ_{cycl} ($R_{u,res}=\Delta u_{res}/\sigma'_{v0}$) in funzione del numero di cicli N normalizzato al valore a rottura N_f . I risultati si riferiscono a provini sciolti e densi ($D_R=43\%$ e 71%) al variare del parametro α . Come si può notare (Figura 5b, 5c e 5d) la presenza di una tensione tangenziale statica iniziale determina un differente comportamento rispetto a quello normalmente esibito da una sabbia pulita in condizioni $\alpha=0$ ovvero piano campagna orizzontale (Figura 5a).

Nel caso di piano campagna orizzontale (Figura 5a) è possibile osservare un tipico andamento “ad S” delle $R_{u,res}$ al variare del rapporto N/N_f , che può essere interpretato efficacemente utilizzando il modello proposto originariamente da Seed et al. (1975) e successivamente semplificato da Booker et al. (1976) nella forma:

$$R_{u,res} = \frac{2}{\pi} \cdot \sin^{-1} \left[\left(\frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{2-\beta}} \right] \quad (2)$$

dove β è un parametro empirico da determinare. I valori di tale parametro ottenuti nel presente studio dall’interpretazione delle singole prove di taglio semplice cicliche nell’intervallo di D_R e CSR analizzati variano tra 0.77 e 1.72 (Figura 5a) con un valore di “best fit” ottenuto dalla considerazione di tutte le prove pari a 0.92 (curva indicata in rosso).

In presenza di una condizione di piano campagna inclinato ($\alpha \neq 0$) si può notare un andamento monotonicamente crescente delle sovrappressioni interstiziali cicliche (Figure da 5b a 5d) al variare del rapporto N/N_f , con una tendenza a stabilizzarsi intorno a valori di $R_{u,res}$ tanto più piccoli quanto maggiore è il valore di α . Pertanto in questi casi, lo sviluppo delle sovrappressioni interstiziali tende a discostarsi dal modello di Seed et al. (1975) (Figura 5a) rendendo necessario l’adozione di nuove leggi. Nella presente ricerca, si è utilizzata una legge di potenza, definita da due parametri a e b , in grado di tener conto, congiuntamente, della variabile α :

$$R_{u,res} = a \cdot \left(\frac{N}{N_f} \right)^b \quad (3)$$

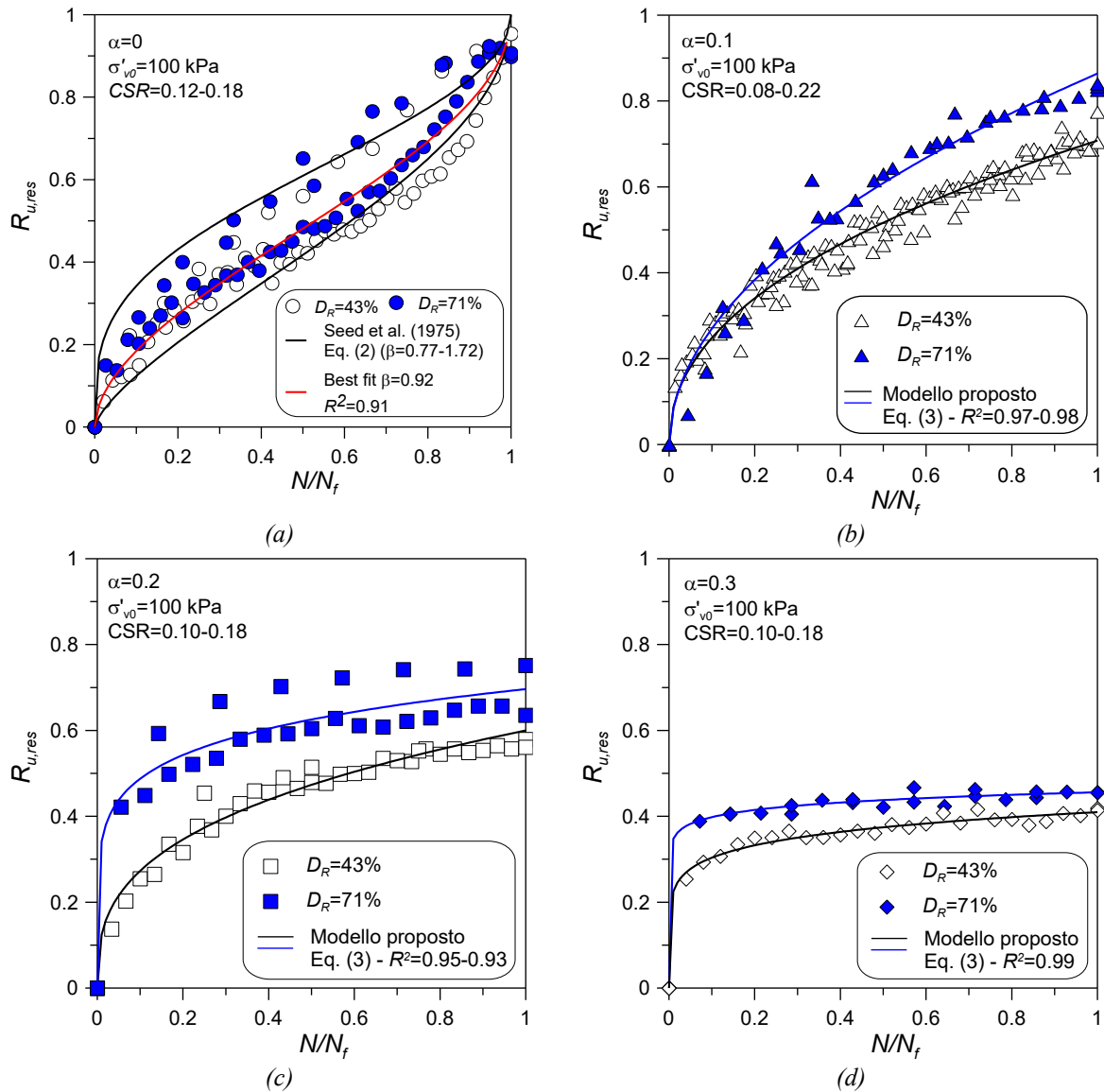


Fig 5. Andamento del rapporto delle sovrappressioni interstiziali cicliche al variare del numero di cicli normalizzato per la sabbia del Ticino per differenti valori di α : (a) $\alpha=0$, (b) $\alpha=0.1$, (c) $\alpha=0.2$, e (d) $\alpha=0.3$.

E' interessante osservare che quando $N=N_f$ il parametro a corrisponde al valore limite di $R_{u,res}$ a rottura. I risultati mostrati in Figura 5b, 5c e 5d evidenziano la buona capacità del modello di cogliere l'andamento sperimentale ($R^2 > 0.93$) qualunque sia il meccanismo di rottura prevalente, indipendentemente dallo stato di addensamento della sabbia. L'analisi dei risultati sperimentali ha evidenziato un effetto trascurabile del parametro CSR sullo sviluppo di $R_{u,res}$ in accordo con precedenti studi (ad es. Pan & Yang 2018).

La variazione lineare dei parametri $a_{best\,fit}$ e $b_{best\,fit}$ ottenuti con la considerazione degli andamenti di tutte le prove a diversi valori di CSR al variare di α è mostrata in Figura 6, ove si osserva una significativa dipendenza dalla densità relativa della sabbia (D_R) nel campo di D_R investigato.

4. Conclusioni

La presenza di una tensione tangenziale statica sui meccanismi di sviluppo delle sovrappressioni interstiziali cicliche in depositi sabbiosi è stata analizzata attraverso l'interpretazione dei risultati di prove di taglio semplice cicliche condotte a differenti valori del rapporto tensionale statico (α) e ciclico (CSR) e differenti stati di addensamento della sabbia.

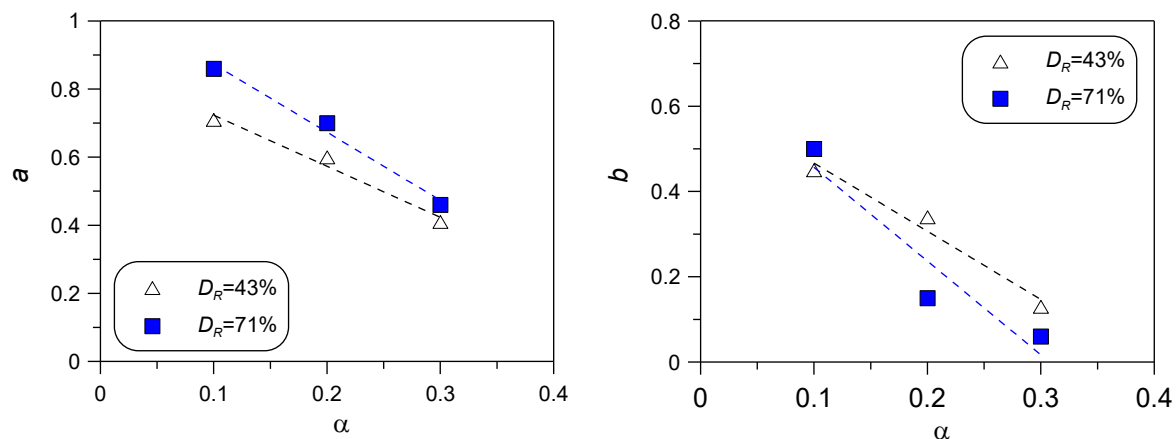


Fig 5. Andamento dei parametri a e b dell'Eq. (3) al variare del rapporto di tensione tangenziale statica iniziale α per la sabbia del Ticino.

Le principali conclusioni possono essere così sintetizzate:

a) Lo sviluppo delle sovrappressioni interstiziali cicliche (Δu) in presenza di una τ_{stat} è significativamente influenzato dal rapporto CSR/α : per i casi in cui CSR/α induce un meccanismo di “cyclic mobility” si osserva un progressivo aumento delle sovrappressioni interstiziali con valori limitati a rottura nell'intervallo 77% - 95% della tensione verticale efficace iniziale; viceversa, per i casi in cui CSR/α induce un meccanismo di “plastic strain accumulation”, si osserva un aumento delle Δu nella prima fase della prova raggiungendo valori di R_u che tendono a stabilizzarsi nell'ultima fase intorno a valori significativamente al di sotto di 0.95 e che tendono a ridursi quanto maggiore è il livello della τ_{stat} pre-esistente.

b) La relazione tra $R_{u,res}$ e il numero di cicli normalizzato N/N_f in presenza di una tensione tangenziale statica iniziale ($\alpha \neq 0$) segue un differente andamento rispetto a quello osservato per le prove ad $\alpha = 0$. Per tale ragione il modello proposto da Seed et al. (1975) non appare efficace nel cogliere l'andamento dei punti sperimentali nei casi in cui si realizzino in sito condizioni di pendio.

c) Un semplice modello è stato specificatamente proposto per questi casi: esso si basa su una legge di potenza ed è definito da due parametri empirici da determinare. Il modello si presta ad essere utilizzato in maniera efficace qualunque sia il meccanismo di rottura prevalente, ed indipendentemente dallo stato di addensamento della sabbia. Una legge di variazione dei parametri a e b del modello è stata fornita al variare del parametro α e dello stato di addensamento della sabbia.

Gli ulteriori sviluppi della ricerca riguardano la validazione di tale modello di generazione proposto per altri materiali e differenti condizioni di stato iniziale e di prova.

Principali riferimenti bibliografici

- Pan K, Yang ZX. (2018). “Effect of initial static shear on cyclic resistance and pore pressure generation of saturated sand”. *Acta Geotechnica*, 13, 473-487.
- Porcino D, Caridi G, Malara M, Morabito E. (2006). “An automated control system for undrained monotonic and cyclic simple shear tests”. In: DeGroot DJ, DeJong JT, Frost JD, Baise LG, editors. *Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*, Reston: American Society of Civil Engineering; 2006, p. 185-190.
- Seed HB, Martin PP, Lysmer J. (1975). “The generation and dissipation of pore-water pressures during soil liquefaction”. Univ. of California, Berkeley, CA: Geotechnical Report No. EERC 75-26.
- Seed HB. (1983). “Earthquake-resistant design of earth dams”. In: Howard TR (ed.). *Proc. of the Symp. on Seismic Design of Earth Dams and Caverns*, Philadelphia: American Society of Civil Eng., New York; p.41-64.
- Sivathayalan S, Ha D. (2011). “Effect of static shear stress on the cyclic resistance of sands in simple shear loading”. *Canadian Geotechnical Journal*, 48: 1471-1484.
- Yang J, Sze HY. (2011). “Cyclic behaviour and resistance of saturated sand under non-symmetrical loading conditions”. *Géotechnique*, 61, 59-73.