

EFFETTI DELLE TECNICHE DI RICOSTITUZIONE DEI PROVINI SULLA COMPRESSIBILITA' E SULLA RESISTENZA CICLICA DI UNA SABBIA TRATTATA CON SILICE COLLOIDALE

Giovanni Ciardi

Università degli Studi di Firenze - DICEA

giovanni.ciardi@unifi.it

Claudia Madiati

Università degli Studi di Firenze - DICEA

claudia.madiati@unifi.it

Sommario

L'utilizzo di gel di silice colloidale (CS) in terreni potenzialmente liquefacibili si è dimostrato efficace come tecnica di mitigazione nei confronti della liquefazione sismica. Poiché la maggior parte delle ricerche presenti in letteratura su questo argomento si basa su esperienze di laboratorio su provini ricostituiti, lo scopo principale del presente lavoro è di analizzare gli effetti di due tecniche di ricostituzione sulla compressibilità e sulla resistenza ciclica del materiale trattato con CS. Sono state perciò svolte prove triassiali cicliche non drenate su provini di sabbia a granulometria uniforme trattati con una miscela di silice al 5% in peso, ricostituiti mediante la tecnica del moist tamping e della pluviazione. Dall'analisi del comportamento dei provini in fase di consolidazione isotropa emerge che il terreno trattato ha una maggiore compressibilità e che le sovrappressioni interstiziali si dissipano molto più lentamente rispetto al terreno non trattato, indipendentemente dalla tecnica di preparazione utilizzata. I risultati sperimentali mostrano inoltre che la resistenza ciclica dei provini preparati con moist tamping è maggiore di quella dei provini preparati per pluviazione, e che a sua volta quest'ultima è maggiore della resistenza ciclica del terreno non trattato.

1. Introduzione

In anni recenti, l'utilizzo di miscele d'iniezione a base di silice colloidale in terreni potenzialmente liquefacibili ha assunto un ruolo sempre più importante fra le tecniche innovative di miglioramento dei terreni nei confronti della liquefazione sismica. Tali miscele, formate da una soluzione di particelle di nano-silice in base acquosa e da un catalizzatore della reazione di indurimento (solitamente, una soluzione elettrolitica), presentano una viscosità iniziale di poco superiore a quella dell'acqua, e ciò ne favorisce la messa in opera in termini di lavorabilità e iniettabilità; una volta indurite, formano un *gel* di silice capace di migliorare la risposta del terreno soggetto a condizioni di carico sia statico sia ciclico (e.g. Gallagher & Mitchell, 2002; Porcino et al., 2011; Ciardi et al., 2020; Salvatore et al., 2020). Tuttavia, alcune caratteristiche del materiale trattato tra cui, in particolare, la diversa compressibilità rispetto al materiale non trattato (Towhata 2008; Ciardi et al. 2020; Triantafyllos et al., 2021), non sono state, ad oggi, sufficientemente analizzate.

Nonostante il trattamento a base di silice colloidale sia già stato utilizzato con successo per applicazioni in sito in terreni liquefacibili (Rasouli et al., 2016), la maggior parte delle ricerche svolte in passato è basata sui risultati di prove sperimentali di laboratorio condotte su provini ricostituiti di terreno (limo)sabbioso; tra queste, le prove triassiali cicliche risultano le più utilizzate. Dai risultati di prove cicliche di laboratorio emerge che la resistenza ciclica del terreno trattato è sempre maggiore di quella del terreno non trattato, ed aumenta al crescere del contenuto di silice inizialmente diluito nella

miscela e del tempo di maturazione, ovvero del tempo che intercorre fra la gelificazione della miscela all'interno dei pori del terreno e la successiva fase di prova (Ciardi et al., 2020; Salvatore et al., 2020; Vranna et al., 2020). Ricerche recenti hanno evidenziato che il gel di silice colloidale è più compressibile dell'acqua e che il terreno trattato è più compressibile di quello non trattato. Tali risultati sono stati ottenuti con diverse tipologie di prove, tra cui prove edometriche (Ciardi et al., 2019, 2020), prove triassiali (Triantafyllos et al., 2021), prove di compressibilità della miscela stabilizzante prima della gelificazione (Vranna et al., 2020) o prove di compressione semplice del puro gel (Towhata, 2008).

È noto che per una data tipologia di prova ciclica, la tecnica di ricostituzione dei provini ne influenza la risposta, potendo portare a significative differenze in termini di resistenza (Mulilis et al., 1977). Ad oggi, la maggior parte delle ricerche esistenti su terreni trattati con nano-silice, soggetti a prove triassiali cicliche, è basata su due distinte tecniche di ricostituzione dei provini: *pluviazione* e *moist tamping* modificati. La prima consiste nel posizionare il terreno asciutto all'interno di un forma-campione (ad esempio con l'ausilio di un imbuto), preventivamente e parzialmente riempito con la soluzione stabilizzante ancora in fase liquida; tale procedura simula la deposizione in acqua del terreno e rende il provino saturo della miscela, ma non è rappresentativa delle condizioni di sito, in cui la soluzione viene di fatto iniettata all'interno del mezzo poroso. La seconda, invece, consiste nel disporre il terreno umido in strati all'interno di un forma-campione, compattando ciascuno strato per ottenere l'indice dei vuoti iniziale desiderato e successivamente iniettando la miscela all'interno del campione; tale procedura simula l'iniezione in sito, e di contro non garantisce la totale presenza del gel all'interno dei pori.

Dal momento che, ad oggi, non esistono studi che mostrano i risultati dello stesso tipo di prova effettuata su provini della stessa sabbia trattati con silice colloidale e preparati con metodi differenti, lo scopo principale del presente lavoro è di valutare gli effetti delle 2 tecniche appena descritte sulla compressibilità e sulla resistenza ciclica del materiale trattato. Ciò consentirà di interpretare in maniera critica i risultati delle ricerche esistenti e di rendere più agevole il confronto tra i risultati di differenti studi. A questo scopo, sono state condotte prove triassiali cicliche non drenate su una sabbia pulita, sciolta, e trattata con una miscela di nano-silice al 5% (in peso). Gli effetti della presenza del gel sulla compressibilità del materiale trattato sono studiati analizzando la fase di consolidazione isotropa, preventiva alla fase di applicazione dello sforzo di taglio ciclico. I risultati delle prove eseguite sul materiale ricostituito con le due diverse tecniche sono confrontati con quelli ottenuti con lo stesso tipo di prove, condotte su provini di terreno non trattato ricostituiti con la tecnica del moist tamping.

2. Materiali e metodi

Il materiale studiato è una sabbia silicea (S3) a granulometria uniforme, caratterizzata da gravità specifica $G_s=2.65$, coefficiente di uniformità $U=1.6$, diametro medio delle particelle $D_{50}=0.30$ mm, ed indice dei vuoti massimo e minimo pari a 0.839 e 0.559, rispettivamente (DIN 18126 (DIN, 1996)); il materiale è classificato come SP (USCS). In accordo con la vigente normativa italiana (NTC18), la curva granulometrica della sabbia analizzata ricade interamente all'interno della fascia che identifica i terreni potenzialmente liquefacibili per $U<3.5$ (Fig. 1).

La miscela stabilizzante utilizzata per

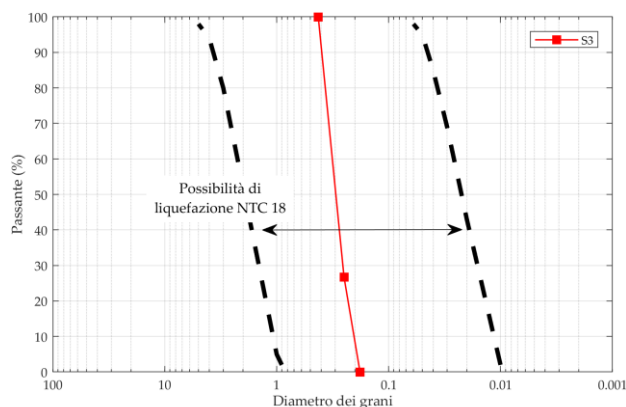


Fig. 1 Curva granulometrica della sabbia analizzata

il trattamento del terreno è composta da una soluzione di silice colloidale (MasterRoc® MP 325, BASF SE, contenuto iniziale di silice in peso pari al $15\pm 1\%$), diluita con acqua distillata e con una soluzione salina di cloruro di sodio (NaCl al 10% in peso), in modo tale che la concentrazione di silice risultante sia pari al 5% in peso ed il tempo di gelificazione sia di 24 h. Tutti gli esperimenti sono stati condotti a temperatura ambiente ($20 \pm 1^\circ\text{C}$).

I provini utilizzati hanno dimensioni 50/100 mm (diametro/altezza); il tempo di maturazione è stato fissato in 5 gg, considerando l'inizio della fase di taglio ciclico (4 gg considerando il montaggio dei provini in cella triassiale e la fase di saturazione, come descritto più avanti). Tutti i provini sono stati preparati ad una densità relativa obiettivo, da raggiungere al termine della consolidazione, pari a 30%.

2.1 Pluviazione

Per i provini di terreno trattato preparati per pluviazione (in seguito, “provino Pv”), si è utilizzato un forma-campione posto su un apposito piedistallo, uguale a quello della cella triassiale ma esterno ad essa, per evitare l'intasamento dei drenaggi di base da parte del gel. Una volta adesa la membrana alle pareti del forma-campione, quest'ultimo viene parzialmente riempito con la miscela stabilizzante liquida; successivamente, una quantità prefissata di sabbia asciutta è disposta (*pluviata*) all'interno mediante un imbuto. Le pareti del forma-campione sono vibrato delicatamente per ottenere il valore prefissato di indice dei vuoti. Al termine, un disco in plexiglass dotato di valvola di chiusura è posto in testa al provino, stendendosi sopra la membrana e sigillando il campione. Trascorso il tempo di maturazione, il provino è delicatamente trasferito sulla base della cella triassiale, procedendo alle successive fasi di prova secondo modalità convenzionali, come descritto più avanti (par. 2.3).

La tecnica della pluviazione non è stata utilizzata per la preparazione di provini di terreno non trattato.

2.2 Moist tamping

Per i provini preparati con la tecnica del moist tamping (in seguito, “provino MT”), si è utilizzata una apposita cella cilindrica, impiegata in passato per lo studio della conducibilità idraulica del terreno trattato e non trattato (Ciardi et al., 2020). I provini sono preparati disponendo, per strati successivi, la sabbia resa umida aggiungendovi il 5% in peso di acqua distillata; ogni strato (5 in totale) è compattato per ottenere il valore richiesto di indice dei vuoti iniziale. Per compensare l'effetto di densificazione aggiuntiva prodotta dagli strati soprastanti, si è utilizzata una tecnica di sotto-compattazione (gli strati hanno densità relativa crescente dal basso verso l'alto, in modo che il valore medio sull'altezza del provino sia pari al valore obiettivo). In testa al provino è disposto un cilindro in PVC munito di drenaggio. Una volta rimosso il forma-campione, la cella è riempita d'acqua distillata ed è applicata una pressione di confinamento (nel caso specifico pari a 20 kPa). Al termine, eseguito un lavaggio preventivo del campione con CO₂ seguito dal passaggio di acqua, la miscela di silice è iniettata per gravità dal basso verso l'alto, attraverso i canali di drenaggio della base cella e del disco di testa. La procedura di iniezione è considerata completa qualora, all'uscita del drenaggio superiore, sia raccolta una quantità di miscela pari ad almeno 5 volte il volume dei vuoti del campione. Chiusi i drenaggi, il campione viene fatto ‘maturare’ confinato alla pressione di cella iniziale, prima di essere trasferito in cella triassiale.

La tecnica del moist tamping è stata utilizzata anche per preparare provini di terreno non trattato; in questo caso si è operato direttamente in cella triassiale, seguendo una procedura di montaggio convenzionale (in tal caso non è presente la fase di iniezione della miscela).

2.3 Prove triassiali cicliche

Le prove triassiali cicliche sono state condotte secondo una procedura standard: 1) saturazione, 2) consolidazione isotropa, 3) fase di taglio ciclico. La fase di saturazione (con acqua distillata e disaerata) è stata effettuata incrementando a gradini la pressione di cella e la contropressione

interstiziale, mantenendo nel campione una pressione efficace di circa 10 kPa. La contropressione applicata è stata pari a 300 kPa, mantenuta per 24 h. Sono stati così ottenuti valori del coefficiente B di Skempton maggiori di 0.96. Tutti i provini sono stati consolidati ad una pressione efficace media di consolidazione (p_0') pari a 100 kPa. La fase 2) si è ritenuta conclusa quando l'incremento delle pressioni interstiziali, una volta chiuso il drenaggio, è risultato inferiore allo 0.5% di p_0' trascorsi 30 min dalla chiusura del drenaggio.

Si sono effettuate prove a sforzo controllato utilizzando un'apparecchiatura con attuatore elettromeccanico (Controls), applicando carichi sinusoidali di ampiezza prefissata ad una frequenza di 0.1 Hz in condizioni di drenaggio impedito. Convenzionalmente la rottura del terreno (trattato e non) è stata identificata dalla condizione $\varepsilon_{DA}=5\%$, con ε_{DA} deformazione assiale in doppia ampiezza. Se per il terreno non trattato tale condizione è immediatamente conseguente al raggiungimento della liquefazione iniziale, caratterizzata da un valore del rapporto di sovrappressione interstiziale (rapporto fra la sovrappressione interstiziale sviluppata durante la prova e p_0') $r_u=1.0$, per cui di fatto il numero di cicli per cui si verificano le condizioni $\varepsilon_{DA}=5\%$ e $r_u=1.0$ è sostanzialmente lo stesso, nel terreno trattato la condizione $r_u=1.0$ può non essere raggiunta e, in ogni caso, essa non prelude a manifestazioni di collasso tipiche delle sabbie sciolte (par. 3.2), per effetto dell'azione stabilizzante offerta dal gel.

3. Risultati

3.1 Consolidazione isotropa e compressibilità

La Fig. 2 mostra i risultati della fase di consolidazione isotropa per tre provini di sabbia trattata e non trattata. In Fig. 2a e 2b sono riportate, rispettivamente, in funzione della radice quadrata del tempo, la variazione di volume registrata, corrispondente al volume d'acqua entrante/uscente ΔV (positiva per flusso uscente dal campione) e il rapporto U_d fra la sovrappressione neutra al tempo t e quella all'istante iniziale t_0 . Come si evince dalla Fig. 2a, il terreno trattato risulta più compressibile di quello non trattato. Inoltre, mentre per la sabbia non trattata la dissipazione della sovrappressione iniziale è pressoché istantanea, U_d decresce molto più lentamente per il terreno trattato, assimilandone il comportamento a quello di un terreno coesivo (Fig. 2b). La maggiore compressibilità rilevata per il terreno trattato potrebbe rappresentare un limite per le applicazioni in sito del trattamento a base di silice colloidale (ad es. per gli effetti indotti dai cedimenti sulle strutture eventualmente presenti).

3.2 Comportamento sotto carico ciclico e resistenza ciclica

Nella Figura 3 è mostrato a titolo di esempio la risposta alla sollecitazione ciclica di un provino MT non trattato (Fig. 3a), di un provino Pv trattato (Fig. 3b) e di un provino MT trattato (Fig. 3c) nei piani $p'-q$, $N-r_u$, $N-\varepsilon$, dove p' è la pressione efficace media di confinamento, q lo sforzo deviatorico applicato, N il numero di cicli di carico, ε è la deformazione assiale, e CS è il contenuto di silice

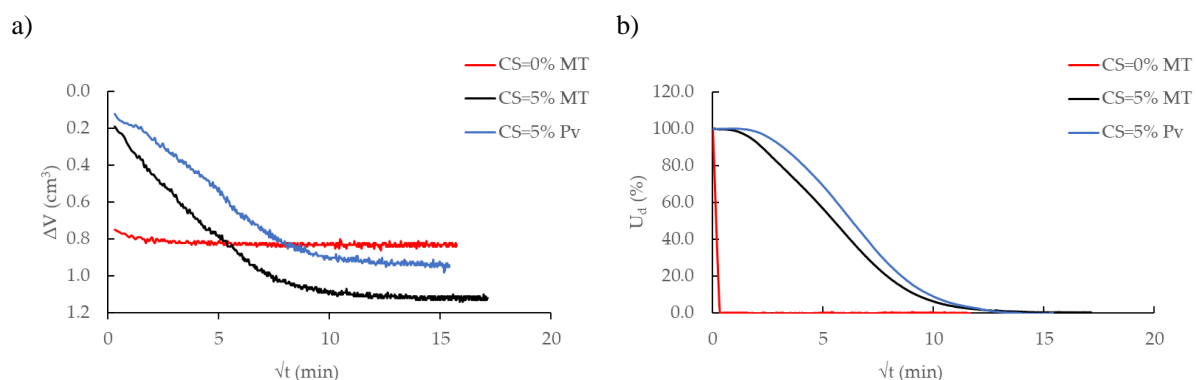


Fig. 2 Fase di consolidazione isotropa: variazione di volume (a) e sovrappressione interstiziale dissipata (b)

colloidale. I tre provini riportati in Fig. 3 sono soggetti ad uno sforzo di taglio ciclico completamente alternato di entità simile.

Il provino MT non trattato (Fig. 3a) esibisce un comportamento tipico delle sabbie sciolte: al crescere del numero di cicli di carico, il progressivo sviluppo di Δu positive (r_u crescente) provoca una riduzione delle tensioni efficaci, e quindi di p' . La deformazione assiale ε oscilla intorno allo zero prima del sopraggiungere di una condizione di instabilità, pressoché identificabile in $r_u \approx 0.8$; tale condizione anticipa la liquefazione iniziale ($r_u = 1.0$), alla quale è associato uno sviluppo significativo di ε . La condizione $\varepsilon_{DA} = 5\%$ segue immediatamente la condizione $r_u = 1.0$ ($N = 19$).

I provini di terreno trattato, Pv (Fig. 3b) ed MT (Fig. 3c), esibiscono un comportamento significativamente diverso. In entrambi i casi, r_u cresce più rapidamente, rispetto al terreno non trattato, stabilizzandosi su un valore prossimo all'unità. Parallelamente, ε cresce in modo non trascurabile sin dai primi cicli di carico, e in modo asimmetrico rispetto allo zero, verso la zona di estensione. Tali comportamenti sono congruenti con i risultati descritti in ricerche precedenti (Gallagher & Mitchell, 2002; Porcino et al., 2011; Ciardi et al., 2020). In definitiva, il comportamento del materiale trattato e non trattato è significativamente diverso: nella sabbia trattata (Fig. 3b e 3c), ε non cresce in modo improvviso a seguito del significativo incremento di r_u , come invece accade nella sabbia non trattata (Fig. 3a), ma aumenta progressivamente. A valori di r_u che competono, nella sabbia non trattata, ad una situazione di instabilità prossima alla rottura, non corrisponde, nella sabbia non trattata, lo stesso sviluppo repentino di ε . È da notare inoltre che, a parità di sforzo ciclico applicato, il numero dei cicli per portare a rottura il provino MT trattato è maggiore di quello richiesto per il provino Pv, e che quest'ultimo è a sua volta maggiore del numero di cicli a rottura per il provino MT non trattato.

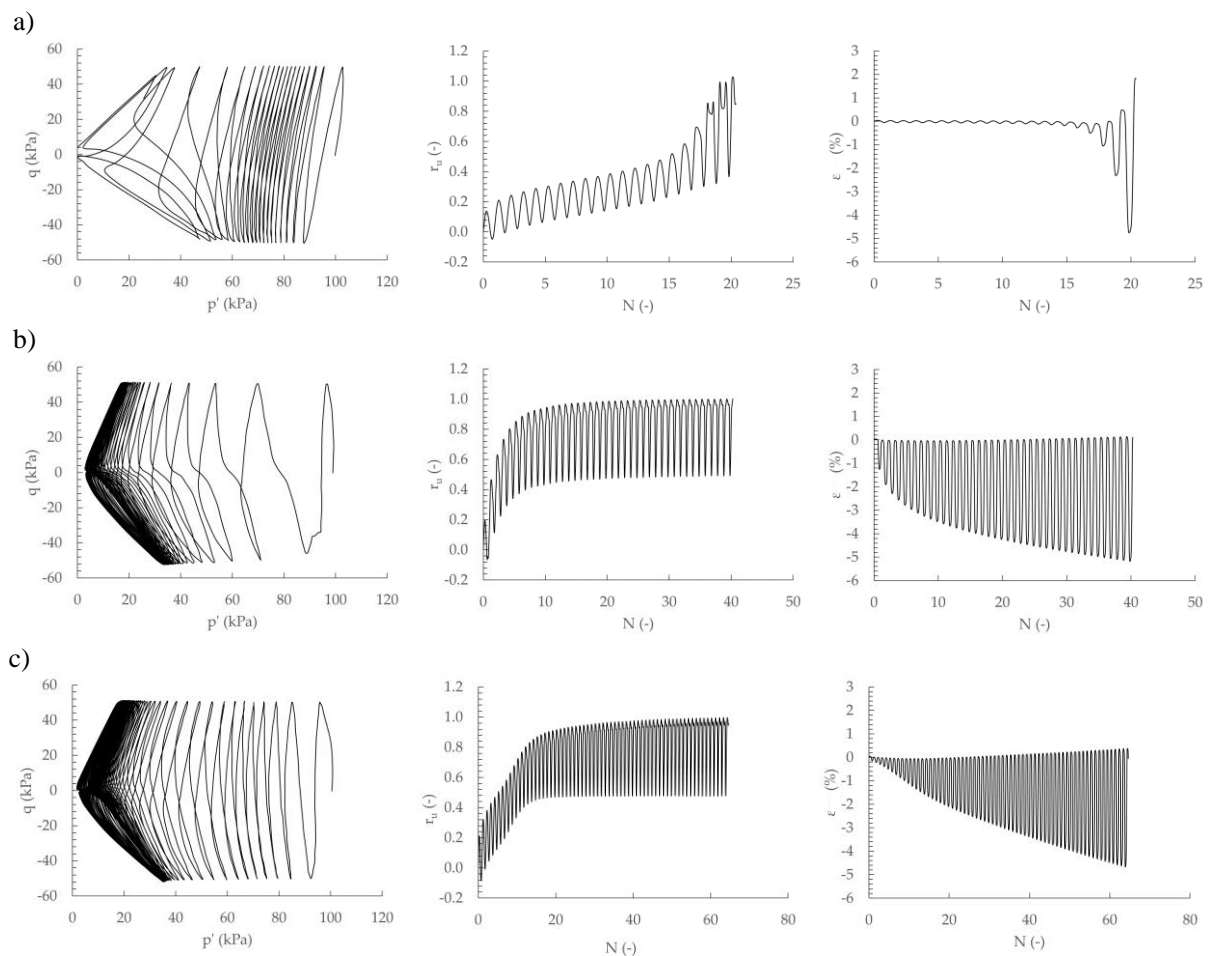


Fig. 3 Fase di taglio ciclica: sabbia non trattata (a), sabbia trattata (provino Pv) (b), sabbia trattata (provino MT) (c).

La Figura 4 mostra i risultati delle prove cicliche per provini MT non trattati, MT e Pv trattati, sintetizzati nel piano $\log(N_f)$ -CSR, dove N_f è il numero di cicli di carico a rottura e CSR (*Cyclic Stress Ratio*) è il rapporto fra sforzo di taglio massimo applicato e p_0' . Nel grafico sono inoltre riportate le curve di resistenza ciclica ottenute per

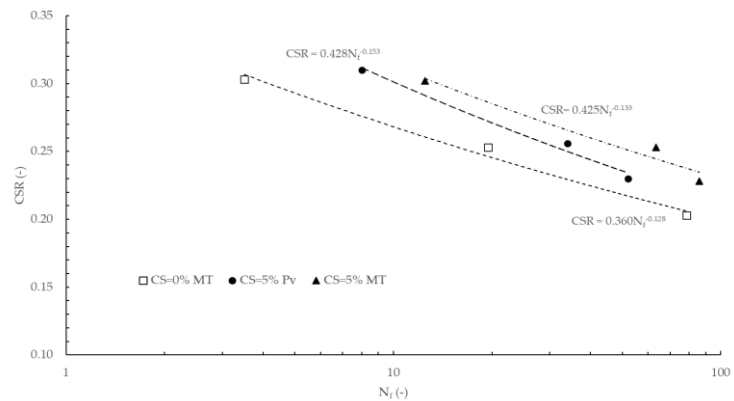


Fig. 4 Curve di resistenza ciclica

interpolazione dei dati sperimentali con legge di potenza. Definita la resistenza ciclica, R_{cyc} , come il valore di CSR per di $N_f=15$, si osserva che $R_{cyc}(\text{MT trattato})=0.30 > R_{cyc}(\text{Pv trattato})=0.28 > R_{cyc}(\text{MT non trattato})=0.25$; ciò implica che, a parità di sforzo ciclico applicato, N_f cresce per effetto del trattamento e che la resistenza ciclica dei provini trattati ricostituiti MT è superiore a quella dei provini ricostituiti Pv.

4. Conclusioni

I risultati dello studio presentato dimostrano che: 1) la resistenza ciclica R_{cyc} del terreno trattato è maggiore di quella del terreno non trattato, indipendentemente dalla tecnica di preparazione dei provini; 2) R_{cyc} dei provini MT è maggiore dei provini Pv; 3) il comportamento sotto carico ciclico è diverso per materiale trattato e non trattato; 4) i provini (MT e Pv) mostrano una compressibilità maggiore del terreno trattato rispetto al terreno non trattato e tempi di consolidazione sensibilmente più lunghi.

Bibliografia

- Ciardi G., Bardotti R., Vannucchi G., Madiati C. (2019). "Effects of highdiluted colloidal silica grout on the mechanical behavior of a liquefiable sand". Proc. 7th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Roma, 1820-1827.
- Ciardi G., Bardotti R., Vannucchi G., Madiati C. (2020). "Effects of high-diluted colloidal silica grouting on the behaviour of a liquefiable sand", *Geotechnical Research*, 7, 193-208.
- Gallagher P.M., Mitchell J.K. (2002). "Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 1017-1026.
- Mulilis J. P., Seed H. B., Chan C. K., Mitchell J. K., Arulanandan K. (1977). "Effects of sample preparation on sand liquefaction", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103, 91-108.
- Porcino D., Marcianò V., Granata R. (2011). "Undrained cyclic response of a silicate-grouted sand for liquefaction mitigation purposes", *Geomechanics and Geoengineering*, 6, 155-170.
- Rasouli R., Hayashi K., Zen K. (2016). "Controlled permeation grouting method for mitigation of liquefaction", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142, 04016052.
- Salvatore E., Modoni G., Mascolo M.C., Grassi D., Spagnoli G. (2020). "Experimental Evidence of the Effectiveness and Applicability of Colloidal Nanosilica Grouting for Liquefaction Mitigation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146, 04020108.
- Towhata I. (2008). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Triantafyllos P. K., Georgiannou V. N., Pavlopoulou, E. M., Dafalias Y. F. (2021). "Strength and dilatancy of sand before and after stabilisation with colloidal-silica gel", *Géotechnique*, ahead of print.
- Vranna, A., Tika, T., Papadimitriou A. (2020). "Laboratory investigation into the monotonic and cyclic behaviour of a clean sand stabilised with colloidal silica", *Géotechnique*, ahead of print.