

EVIDENZE SPERIMENTALI SULLA RISPOSTA CICLICA DI UNA SABBIA TRATTATA CON SILICE COLLOIDALE E SOGGETTA A SFORZO STATICO INIZIALE

G. Ciardi

Università degli Studi di Perugia
giovanni.ciardi@unipg.it

C. Madiai

Università degli Studi di Firenze
claudia.madiai@unifi.it

Sommario

L'iniezione di miscele a base di silice colloidale è considerata una fra le più promettenti tecniche di mitigazione del rischio di liquefazione sismica nei terreni incoerenti saturi. Nella nota sono presentati i risultati di una campagna sperimentale volta ad analizzare gli effetti della presenza di uno sforzo statico iniziale sul comportamento ciclico di una sabbia pulita trattata con una miscela di silice colloidale (5% in peso). In particolare, sono mostrati e discussi i risultati preliminari di prove triassiali cicliche non drenate condotte su provini ricostituiti e consolidati isotropicamente ed anisotropicamente, e soggetti ad uno sforzo di taglio ciclico di ampiezza prefissata. I risultati indicano che: i) la resistenza ciclica della sabbia trattata è sempre maggiore di quella della sabbia non trattata, indipendentemente dalla presenza o meno di uno sforzo statico iniziale; ii) la resistenza ciclica, sia per i provini trattati sia per quelli non trattati, aumenta all'aumentare dell'entità dello sforzo statico iniziale; iii) lo sviluppo di sovrappressione neutra sembra non dipendere né dal livello di sforzo statico iniziale né dall'entità dello sforzo ciclico applicato nel caso del terreno trattato, contrariamente a quanto avviene per il materiale non trattato.

1. Introduzione

La ricerca sull'utilizzo di miscele a base di silice colloidale per la mitigazione del rischio di liquefazione sismica in terreni incoerenti saturi ha conosciuto un forte sviluppo a partire dagli inizi del secolo corrente. Tali miscele, infatti, uniscono al vantaggio di una bassa viscosità iniziale (paragonabile a quella dell'acqua) – e quindi alla facilità di permeazione del terreno – la possibilità di formare un *gel* di silice dopo un certo tempo dalla miscelazione. Tale gel, formandosi nei vuoti interstiziali, limita il movimento dei singoli grani, modificando la risposta del terreno ed incrementandone, di fatto, la resistenza ciclica (e.g. Gallagher & Mitchell 2002; Gallagher et al. 2007; Porcino et al. 2011; Ciardi et al. 2020).

Nonostante siano stati esplorati molteplici aspetti del comportamento ciclico di terreni incoerenti trattati con silice colloidale (Ciardi et al. 2021) sia dal punto di vista delle esperienze di laboratorio (e.g. Díaz-Rodríguez et al. 2008; Porcino et al. 2011; Vrana et al. 2022), sia in termini di applicazioni pratiche (e.g. Rasouli et al. 2016), e nonostante siano state evidenziate alcune criticità nell'utilizzo di questo tipo di miscele – come, ad esempio, la tendenza ad un aumento della compressibilità in laboratorio (e.g. Georgiannou et al. 2017; Ciardi et al. 2019, 2020; Ciardi & Madiai 2021) – non sono presenti studi, ad oggi, in cui sia valutato l'effetto della presenza di uno sforzo statico iniziale sulla risposta ciclica di terreni stabilizzati con silice colloidale. È noto, infatti, che la presenza di uno sforzo statico iniziale può modificare in modo significativo la risposta ciclica di un terreno liquefacibile,

potendo produrre tanto un incremento quanto un decremento della sua resistenza ciclica (e.g. Vaid & Chern 1983; Yang & Sze 2011; Wei & Yang 2019). Di conseguenza, pare opportuno valutare l'effetto della presenza di uno sforzo statico iniziale – peraltro situazione frequentemente ravvisabile in prospettiva di un'applicazione pratica – anche sul comportamento ciclico di terreni incoerenti stabilizzati con silice colloidale.

La nota presenta i risultati di una serie di prove triassiali cicliche effettuate su campioni ricostituiti di una sabbia pulita non trattata, e trattata con una miscela a base di silice colloidale (5% in peso). Dopo aver illustrato le caratteristiche dei materiali utilizzati, il metodo di preparazione dei provini e le modalità di prova, sono presentati, confrontati e discussi i risultati ottenuti.

2. Programma sperimentale

2.1 Materiali

Il terreno utilizzato è una sabbia pulita, uniforme, principalmente silicea, con grani a forma sub-arrotondata, denominata S3. La sabbia ha gravità specifica $G_s = 2.65$, coefficiente di uniformità $U_c = 1.6$, diametro medio $D_{50} = 0.30$ mm ed indice dei vuoti massimo e minimo pari, rispettivamente, ad $e_{max} = 0.839$ ed $e_{min} = 0.559$.

La silice colloidale utilizzata è un prodotto disponibile in commercio, denominato MasterRoc© MP 325 (BASF SE). La miscela si presenta liquida, con una concentrazione iniziale di silice pari a $15\% \pm 1\%$; alla temperatura di 20°C , ha densità di 1.1 kg/L, $\text{pH} = 10 \pm 1$, e viscosità pari a 10 mPa·s. Per innescare il processo di gelificazione della miscela è necessario ridurre le forze repulsive agenti sulle particelle di silice; dette forze prevengono l'avvicinamento delle particelle stesse, quindi la formazione di *clusters*, e, in definitiva, di un gel. Il modo più semplice per innescare il processo di gelificazione consiste nel modificare la concentrazione di ioni presenti nella miscela. A tale scopo è stata utilizzata una soluzione salina (a base di cloruro di sodio, 10% in peso), da aggiungere alla miscela di silice colloidale. Un'ulteriore quantità di acqua distillata è aggiunta infine per ottenere uno specifico, predeterminato, tempo di gelificazione. La miscela finale così ottenuta risulta avere una concentrazione delle particelle di silice pari al 5% in peso della miscela, ed un tempo di gelificazione approssimativamente pari a 24h.

2.2 Preparazione dei provini e prove sperimentali

I provini, sia di terreno trattato sia non trattato, sottoposti alle prove triassiali, hanno dimensioni 50/100 mm (diametro/altezza) e sono stati preparati utilizzando la tecnica del *moist tamping* ad una densità relativa nominale pari al 30%. Secondo questa procedura, la sabbia asciutta, mescolata con acqua al 5% in peso, è disposta a strati all'interno di un forma-campione, e compattata in modo da ottenere lo stato di addensamento iniziale richiesto.

Nel caso di provini non trattati, il montaggio del campione è avvenuto direttamente sul piedistallo della cella triassiale. Nel caso di provini stabilizzati, per evitare l'ostruzione dei drenaggi con il gel al termine della gelificazione, è stata utilizzata una cella in plexiglass, di dimensioni e forma paragonabili a quelle della cella triassiale: una volta formato il campione sul piedistallo, si è applicata una modesta pressione di cella (20 kPa) per sostenere il campione durante la fase di *flushing* con anidride carbonica (30 min) e successiva iniezione, per gravità, della miscela stabilizzante. Chiusi i drenaggi, il campione è stato fatto maturare in cella per 4 giorni, prima di essere trasferito sulla cella triassiale vera e propria. Poiché un certo grado di disturbo potrebbe essere indotto nel campione per effetto della rimozione della pressione di cella e il conseguente trasporto in cella triassiale a fine maturazione, sono state misurate le dimensioni dei provini prima dell'iniezione e una volta ultimato il

posizionamento nella cella triassiale. In tutti i casi, la differenza è risultata $<0.1\%$, dimostrando come il disturbo indotto sia stato trascurabile.

Per tutti i tipi di provini – trattati e non trattati – è stata eseguita una saturazione di tipo convenzionale, con acqua in pressione. Per tutti i provini il coefficiente B di Skempton è risultato maggiore di 0.96. Tutti i provini sono stati soggetti, al termine della fase di saturazione, a consolidazione isotropa a pressione media efficace, $p' = (\sigma_a' + 2 \sigma_r') / 3$, pari a 100 kPa, essendo σ_a' e σ_r' la tensione assiale media efficace e la tensione radiale media efficace, rispettivamente. La presenza di uno sforzo statico iniziale è ottenuta, al termine della consolidazione isotropa, incrementando σ_a' , e riducendo, al contempo, σ_r' , in modo da mantenere p' costante. Il livello di anisotropia è quantificato tramite il rapporto $K_c = \sigma_a' / \sigma_r'$. In questo studio, sono presentati i risultati delle prove svolte per $K_c = 1.0, 1.3, 1.6$.

3. Risultati

Come già evidenziato in precedenti studi (e.g. Porcino et al. 2011; Ciardi et al. 2020, Pavlopoulou & Georgiannou 2020; Ciardi & Madi ai 2021), il meccanismo di collasso in sabbie sciolte trattate con silice colloidale è significativamente diverso da quello esibito da sabbie sciolte non trattate, a parità di condizioni di prova. Nello specifico, il raggiungimento della condizione $r_u = \Delta u / p_0' = 1$ (dove r_u è il rapporto di sovrappressione interstiziale, Δu è la sovrappressione neutra e p_0' la pressione media efficace di confinamento iniziale), non rappresenta, nel terreno trattato, una condizione di instabilità interna che prelude alla rottura, così come invece avviene per il terreno non trattato. Di conseguenza, per identificare coerentemente ed univocamente una condizione di rottura per provini trattati e non trattati, si è scelto di identificare la condizione di rottura con il primo ciclo intero conseguente alla condizione $\varepsilon_{DA} = 5\%$, essendo quest'ultima la deformazione assiale in doppia ampiezza misurata durante la prova. Solo nel caso di terreno non trattato la condizione $\varepsilon_{DA} = 5\%$ è praticamente coincidente con la condizione $r_u=1$, come è lecito attendersi dal comportamento di una sabbia sciolta una volta innescata la liquefazione iniziale (corrispondente alla prima occorrenza $r_u = 1$).

La Figura 1 mostra le curve di resistenza ciclica nel piano N_f - CSR, ottenute per i differenti valori di K_c considerati, essendo N_f il numero dei cicli a rottura e CSR lo sforzo di taglio ciclico applicato. Si osserva che, a parità di K_c , la curva di resistenza ciclica per il terreno trattato, risulta sempre al di sopra della curva per il terreno non trattato (come era lecito attendersi) e che, all'aumentare di K_c , le curve

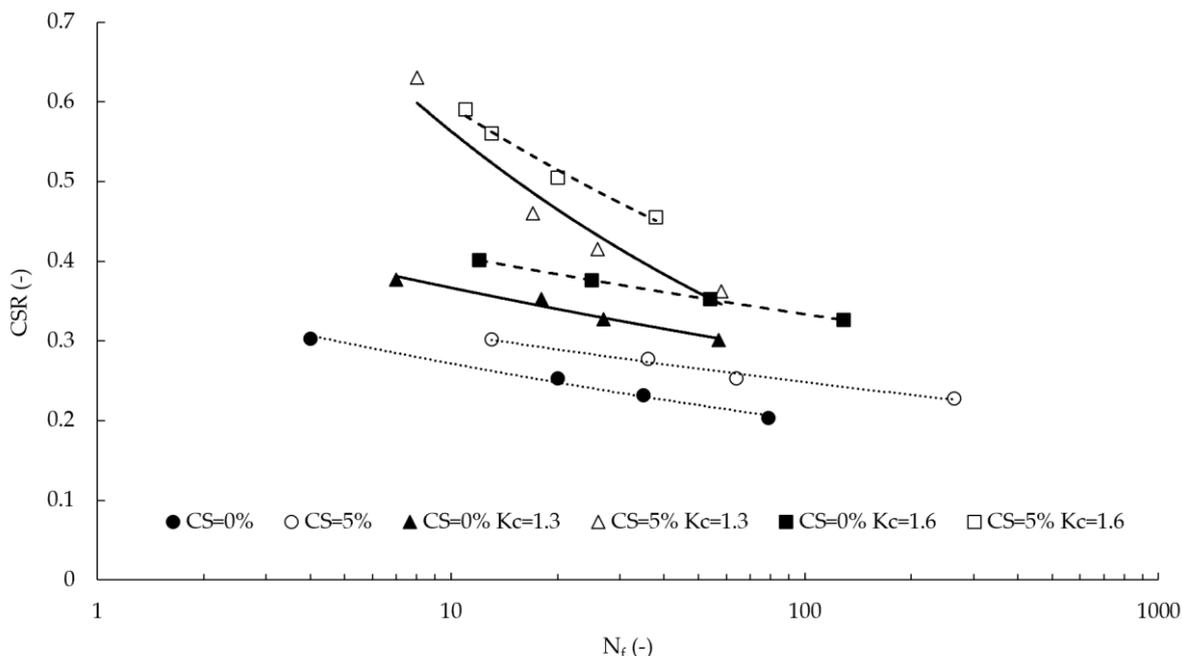


Fig 1. Curve di resistenza ciclica per terreno trattato e non trattato

del terreno trattato e non trattato sono posizionate via via più in alto. In definitiva, il trattamento con silice colloidale produce un incremento della resistenza ciclica che risulta legato al livello di anisotropia iniziale.

La Figura 2 mostra il rapporto tra la deformazione assiale in doppia ampiezza ϵ_{DA} e quella a rottura $\epsilon_{DA,f}$, in funzione del rapporto N/N_f , con N numero di cicli di carico, per tutti i provini testati. Si osserva come la forma delle curve sia significativamente diversa nel caso di terreno trattato e non trattato: per il terreno non trattato essa consegue all'incremento repentino di ϵ_{DA} per N tendente a N_f (all'approssimarsi della liquefazione iniziale). Nel caso di terreno stabilizzato, invece, ϵ_{DA} si sviluppa in modo significativo sin dai primi cicli di carico, per poi crescere in modo pressoché costante con N/N_f . Inoltre, mentre per il terreno naturale lo sviluppo di deformazione assiale, per valori simili di CSR, è influenzato da K_c (nello specifico: il repentino cambio di curvatura avviene per N/N_f maggiori, se K_c aumenta), tale tendenza non risulta evidente nel caso di terreno trattato, per cui il rateo di sviluppo di deformazione assiale ϵ_{DA} durante la sollecitazione ciclica sembra poco influenzato da K_c . Allo stesso modo, mentre le curve dipendono significativamente da CSR nel caso di terreno non trattato (all'aumentare di CSR aumenta il rateo di sviluppo di ϵ_{DA}), lo stesso non può dirsi per il terreno trattato.

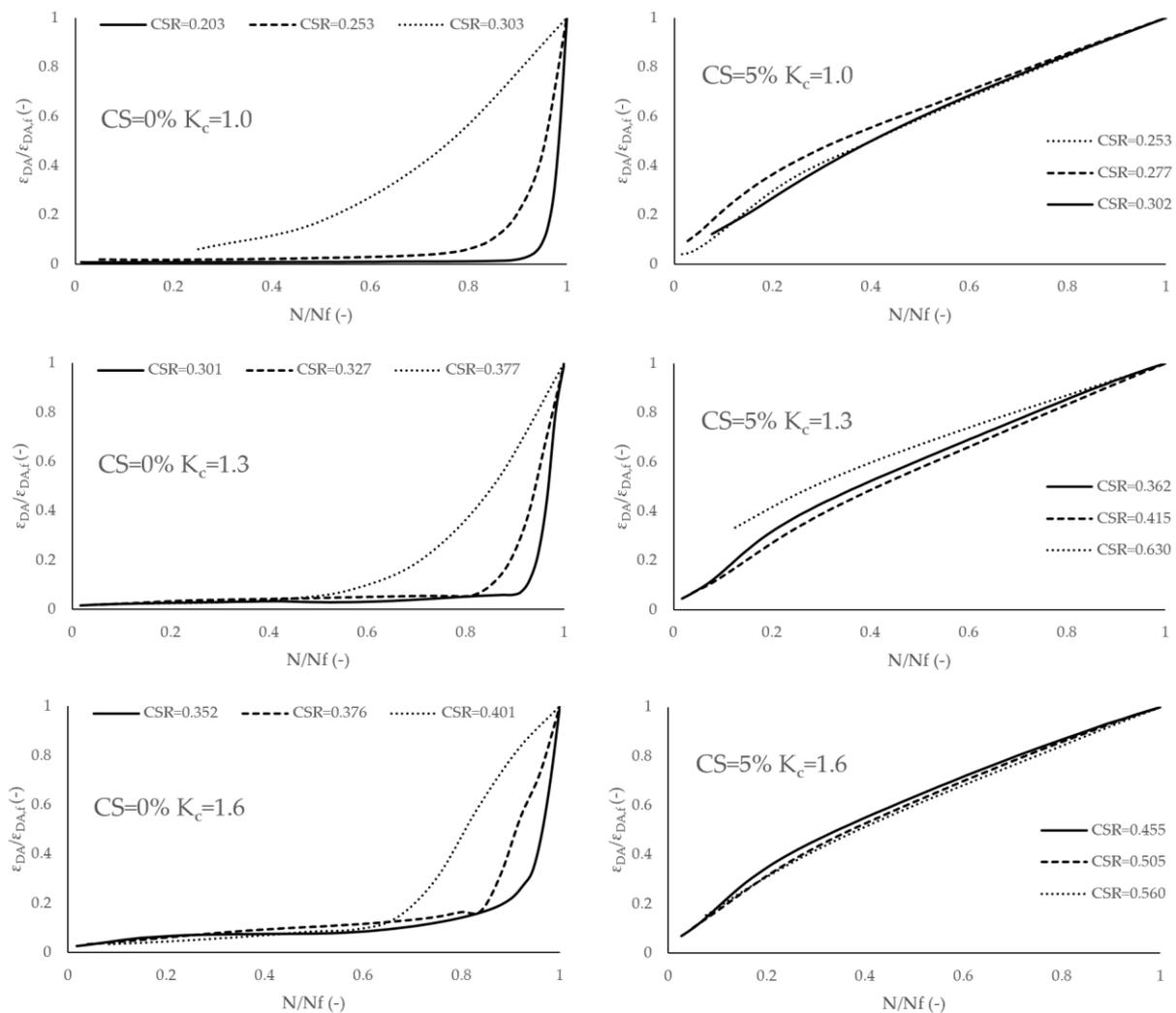


Fig 2. Rapporto $\epsilon_{DA}/\epsilon_{DAf}$ per terreno trattato (destra) e non trattato (sinistra)

La Figura 3 mostra l'andamento del residuo del rapporto di sovrappressione neutra, RPWP, inteso come il valore di r_u accumulato al termine dell' i -esimo ciclo, in funzione di N/N_f . Si osserva che, mentre il terreno non trattato esibisce un comportamento tipico di una sabbia sciolta, per il terreno trattato l'andamento di RPWP è simile a quello tipico di sabbie debolmente cementate (e.g. Porcino et al. 2015), caratterizzate da un più rapido sviluppo di sovrappressione neutra nei primi cicli di carico, seguito da una successiva progressiva stabilizzazione. Anche nel caso di RPWP valgono le medesime osservazioni fatte per $\varepsilon_{DA}/\varepsilon_{DA,f}$: la dipendenza delle curve da K_c e CSR è evidente nel caso di terreno naturale, mentre lo stesso non può dirsi nel caso di terreno stabilizzato con silice colloidale.

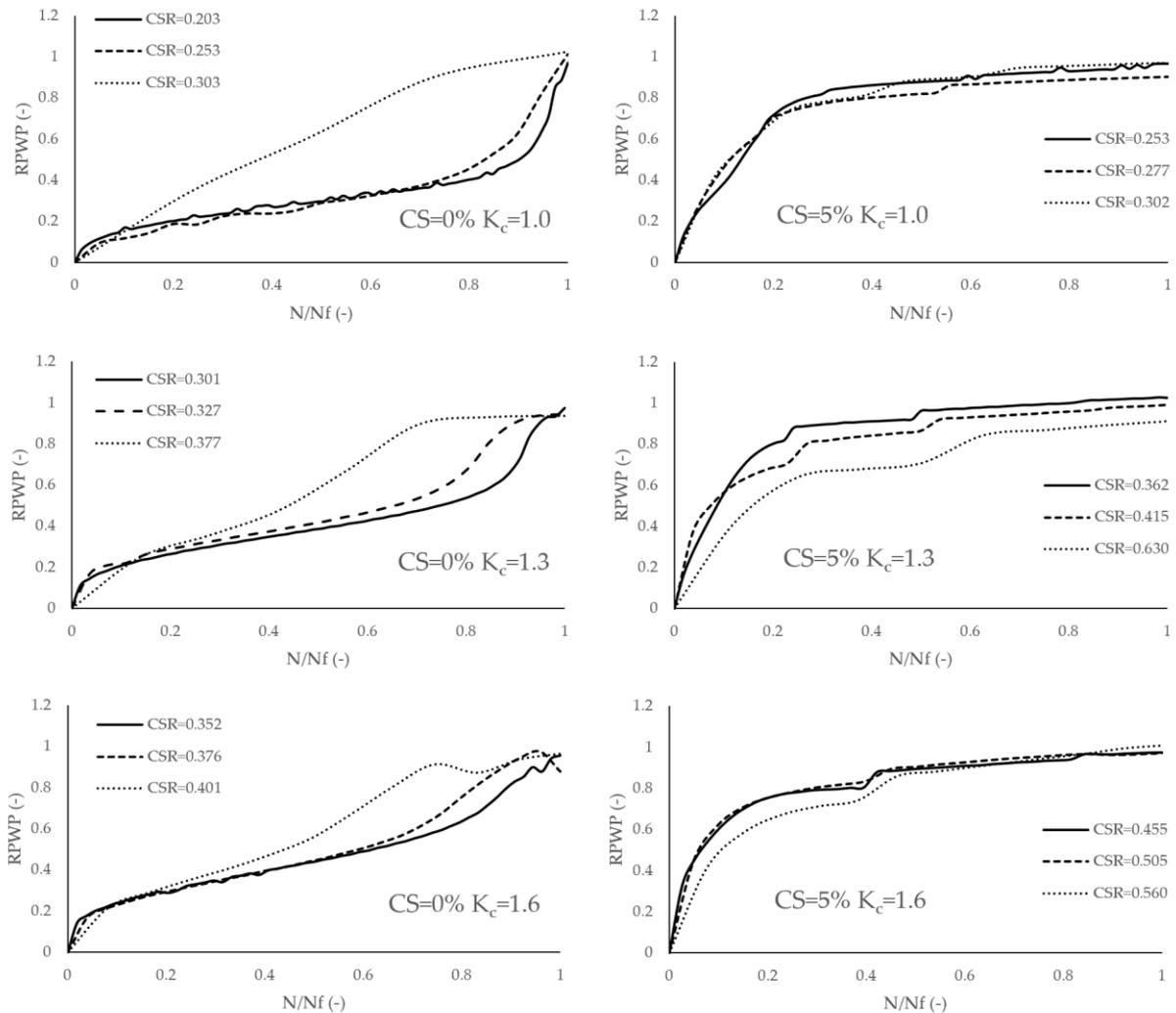


Fig 3. Residuo del rapporto di sovrappressione neutra per terreno trattato (destra) e non trattato (sinistra)

4. Conclusioni

Nello studio sono stati presentati alcuni risultati di prove triassiali cicliche non drenate per valutare l'effetto della presenza di uno sforzo statico iniziale sulla risposta ciclica di una sabbia sciolta trattata con una miscela di silice colloidale al 5% in peso. I risultati indicano che: i) la resistenza ciclica del terreno stabilizzato è sempre maggiore di quella del terreno non trattato, indipendentemente dal livello iniziale di sforzo statico imposto; ii) la sabbia trattata non esibisce una rottura per collasso a seguito dell'incremento delle sovrappressioni interstiziali, ma raggiunge una condizione critica per il superamento di una soglia (convenzionale) di deformazione accumulata; iii) lo sviluppo di

deformazione assiale in doppia ampiezza è significativamente diverso nel caso di sabbia trattata e non trattata: mentre per la sabbia trattata si ha un repentino sviluppo di deformazione all'approssimarsi della condizione di liquefazione iniziale (primo annullamento della tensione efficace media iniziale di confinamento), per la sabbia trattata la deformazione si sviluppa progressivamente durante tutti i cicli di carico, senza risentire del progressivo accumulo di sovrappressioni; iv) l'accumulo di deformazione assiale e di sovrappressione interstiziale nella sabbia non trattata è strettamente legato al valore dello sforzo statico iniziale e dello sforzo di taglio ciclico imposti durante la prova mentre lo stesso comportamento non si osserva per la sabbia trattata.

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.
- Ciardi G., Madiati C. (2021). "Effetti delle tecniche di ricostituzione dei provini sulla compressibilità e sulla resistenza ciclica di una sabbia trattata con silice colloidale". Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2021 – IARG2021_online.
- Ciardi, G., Vannucchi, G., Madiati, C. (2021). "Effects of Colloidal Silica Grouting on Geotechnical Properties of Liquefiable Soils: A Review", *Geotechnics*, 1(2), 460-491.
- Díaz-Rodríguez, J.A., Antonio-Izarraras, V.M., Bandini, P., & López-Molina, J.A. (2008). "Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout", *Canadian Geotechnical Journal*, 45(10), 1345-1355.
- Gallagher, P.M., Conlee, C.T., Rollins, K.M. (2007). "Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 186-196.
- 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.
- Georgiannou, V.N., Pavlopoulou, E.M., Bikos, Z. (2017). "Mechanical behaviour of sand stabilised with colloidal silica", *Geotechnical Research*, 4(1), 1-11.
- Pavlopoulou, E.M.E., Georgiannou, V.N. (2021). "Effect of colloidal silica aqueous gel on the monotonic and cyclic response of sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(11), 04021122.
- 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.
- Porcino, D., Marcianò, V., Granata, R. (2015). "Cyclic liquefaction behaviour of a moderately cemented grouted sand under repeated loading", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 36-46.
- Rasouli, R., Hayashi, K., Zen, K. (2016). "Controlled permeation grouting method for mitigation of liquefaction", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(11), 04016052.
- Vaid, Y.P., Chern, J.C. (1983). "Effect of static shear on resistance to liquefaction", *Soils and foundations*, 23(1), 47-60.
- Vranna, A., Tika, T., Papadimitriou A. (2022). "Laboratory investigation into the monotonic and cyclic behaviour of a clean sand stabilised with colloidal silica", *Géotechnique*, 72(5), 377-390.
- Wei, X., Yang, J. (2019). "Cyclic behavior and liquefaction resistance of silty sands with presence of initial static shear stress", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 122, 274-289.
- Yang, J., Sze, H.Y. (2011). "Cyclic behaviour and resistance of saturated sand under non-symmetrical loading conditions", *Géotechnique*, 61(1), 59-73.