

## **STUDIO DEL COMPORTAMENTO MECCANICO DI UNA SABBIA POTENZIALMENTE LIQUEFACIBILE TRATTATA CON MISCELE A DIVERSA CONCENTRAZIONE DI SILICE COLLOIDALE**

Erminio Salvatore

*Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale  
e.salvatore@unicas.it*

Giovanni Ciardi

*Università degli Studi di Firenze  
giovanni.ciardi@unifi.it*

Claudia Madiari

*Università degli Studi di Firenze  
claudia.madiari@unifi.it*

Giuseppe Modoni

*Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale  
modoni@unicas.it*

### **Sommario**

Il presente contributo mostra i risultati di una campagna sperimentale volta ad analizzare il comportamento meccanico di una sabbia potenzialmente liquefacibile trattata con miscela a ridotta concentrazione di silice colloidale. Il prodotto utilizzato è una miscela tricomponente composta da una sospensione acquosa di particelle nanometriche di silice, acqua ed una soluzione acquosa di cloruro di sodio; quest'ultima alterando il pH della miscela ne determina la gelificazione.

Dopo una prima campagna conoscitiva in cui i materiali di base sono stati caratterizzati individualmente per mezzo di prove fisiche e meccaniche, campioni sabbiosi sono stati ricostituiti in laboratorio e successivamente trattati con due diverse tecniche: mediante pluviazione asciutta e successiva iniezione a bassa pressione della miscela di nanosilice, oppure per pluviazione umida all'interno della miscela di trattamento. I provini, confezionati a differenti densità iniziali e trattati con sospensioni a diversa concentrazione di nanosilice sono stati poi sottoposti a prove di permeabilità, scissometriche, triassiali monotoniche drenate e triassiali cicliche di liquefazione.

I risultati delle prove, confrontati con quelli ottenuti sulla sabbia non trattata, mostrano come la nanosilice colloidale possa essere adottata con profitto per ridurre la suscettibilità alla liquefazione delle sabbie sciolte.

### **1. Introduzione**

La liquefazione sismica dei depositi sabbiosi ha prodotto negli anni ingenti danni a strutture ed infrastrutture causando gravi perdite economiche (*e.g.* Niigata, 1964 - Anchorage, 1964 - Kocaeli, 1999 - Christchurch, 2011 - Emilia Romagna, 2012). Sebbene il fenomeno determini raramente perdite di vite umane, il suo impatto sulle attività antropiche, città, distretti industriali e reti di servizi può segnare profondamente intere comunità per lunghi periodi.

Allorquando l'azione sismica è sufficientemente importante e le condizioni di drenaggio sono impedito dalle particolari condizioni *in-situ* (*e.g.* strati confinanti poco permeabili), le sovrappressioni interstiziali possono crescere sino ad eguagliare lo stato tensionale totale agente nel materiale. In

queste situazioni gli sforzi ai contatti tra i grani si annullano ed il terreno perde completamente la sua capacità di resistere a sforzi di taglio. Se a quest'eventualità si associa la presenza di strutture in superficie, si determinano deformazioni non omogenee che possono sfociare in cedimenti differenziali non tollerabili dalla struttura stessa.

Per mitigare gli effetti del fenomeno, sono state proposte negli anni numerose tecniche di miglioramento dei terreni sabbiosi. Inclusioni rigide singole o a geometria cellulare realizzate con la tecnica del jet-grouting, soil mixing o delle colonne di ghiaia (D'Appolonia, 1953), sono comunemente adottate per by-passare gli strati liquefacibili. Allo scopo di addensare il terreno e quindi ridurre la sua tendenza a sviluppare sovrappressioni per azioni cicliche, si può ricorrere invece alle tecniche di addensamento dinamico (Mayne, 1984), vibratorio (Kirsch and Kirsch, 2016) o mediante esplosioni (Prugh, 1963).

Una tecnica alternativa è quella di introdurre nel sottosuolo un legante con lo scopo di ridurre la mobilità dei grani e di fornire una resistenza a taglio aggiuntiva al contatto tra di essi. Le iniezioni a bassa pressione di miscele cementizie o di prodotti chimici (Karol, 1968) rappresentano un'alternativa molto attraente rispetto alle tecniche tradizionali potendo essere utilizzate al di sotto di edifici esistenti senza agire direttamente sulla struttura ed arrecare disturbo.

In particolare, i prodotti a base di silice colloidale consistono in una sospensione acquosa di particelle di silice con diametro compreso tra i 2nm e 100nm. Data la bassa viscosità, comparabile con quella dell'acqua, il prodotto può essere iniettato facilmente a bassa pressione anche in terreni a permeabilità relativamente bassa (*e.g.* sabbie fini) e percorrere lunghe distanze. Alla sospensione è normalmente aggiunto un attivatore salino che determina la formazione di un gel che riempie i pori dello scheletro solido del terreno. Anche se questi materiali vengono comunemente utilizzati come rapida contromisura a venute d'acqua negli scavi in sotterraneo (*e.g.* Traldi and Levanto, 2016) o come barriere impermeabile contro i contaminanti (*e.g.* Persoff *et al.*, 1994), pochi sono gli studi volti al loro utilizzo per la mitigazione della suscettibilità a liquefazione delle sabbie. Inoltre, gli studi in letteratura sono limitati a miscele con elevata concentrazione di silice (>5% in peso) (*e.g.* Gallagher & Mitchell, 2002; Diaz *et al.*, 2008). Il presente contributo rappresenta invece la fase preliminare di uno studio volto ad ottimizzare la tecnica rendendola tecnicamente ed economicamente più conveniente.

Allo scopo, dopo aver caratterizzato individualmente la sabbia di riferimento ed il prodotto a base di nanosilice per mezzo delle comuni prove geotecniche di laboratorio (peso specifico, granulometria, etc.), campioni ricostituiti a densità relative differenti e trattati con miscele a diversa concentrazione di nanosilice, sono stati sottoposti a prove triassiali monotoniche drenate e cicliche non drenate. Lo studio è stato condotto trattando il materiale con due tecniche differenti, per permeazione della miscela a bassa pressione dal basso verso l'alto dei campioni, oppure pluviano il materiale sabbioso direttamente all'interno della sospensione di nanosilice colloidale. I risultati, comparati con quelli ottenuti sulla sabbia non trattata hanno permesso di studiare l'efficacia della tecnica nel ridurre la suscettibilità a liquefazione delle sabbie.

## **2. I materiali**

### *- Sabbia*

La sabbia utilizzata per la sperimentazione è la sabbia di Fossanova FO-25, una sabbia silicea ( $\text{SiO}_2 > 90-96\%$ ) commercializzata da Sibelco S.p.A. ed estratta dalla cava di Fossanova (LT). Il particolare assortimento granulare testato, denominato S3, è stato ottenuto per vagliatura come passante al setaccio 0.425 mm e trattenuto al 0.180 mm. In tal modo si ottiene un materiale privo di una significativa frazione fine e con una distribuzione granulometrica affine a quella dei terreni maggiormente liquefacibili. Analisi fisiche precedentemente svolte presso il Laboratorio di Geotecnica e Strade dell'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale (Chiaro, 2007) hanno misurato una gravità specifica pari 2.65, coefficiente di uniformità pari a 1.6, diametro medio delle particelle pari a 0.303 mm ed indice dei vuoti massimo e minimo pari rispettivamente a 0.821 e 0.476.

- *La nanosilice*

Il prodotto utilizzato per il trattamento dei campioni è una sospensione colloidale con contenuto in peso di nanosilice del 15% e viscosità di 10mPa s prodotta da BASF Chemicals con il nome di MasterRoc MP 325.

Così come commercializzata, le cariche negative che rivestono la superficie delle nanoparticelle di silice ne impediscono l'aggregazione e la sospensione persiste in forma colloidale. Quando viene aggiunta una soluzione acquosa al 10% in peso di NaCl, la concentrazione ionica del composto viene alterata ed il colloide si destabilizza innescando la formazione di un *gel* che rimane stabile nel tempo (Yonekura, 1996) la cui *resistenza* dipende dalla concentrazione di silice impiegata ed il tempo di gelificazione è inversamente proporzionale alla quantità di reagente impiegato.

### 3. Studio del tempo di gelificazione

Essendo un aspetto fondamentale per una futura applicazione della tecnica *in-situ*, il tempo di gelificazione del prodotto è stato studiato per mezzo del cosiddetto "jar test" (Persoff; 1999). Campioni di prodotto, confezionati con differenti proporzioni di sospensione silicea ed attivante sono stati preparati in contenitori cilindrici e lasciati stagionare alla temperatura di 20°C. Si è considerato che la sospensione aveva raggiunto lo stato di gel quando capovolgendo i contenitori, non mostrava deformazioni a vista apprezzabili.

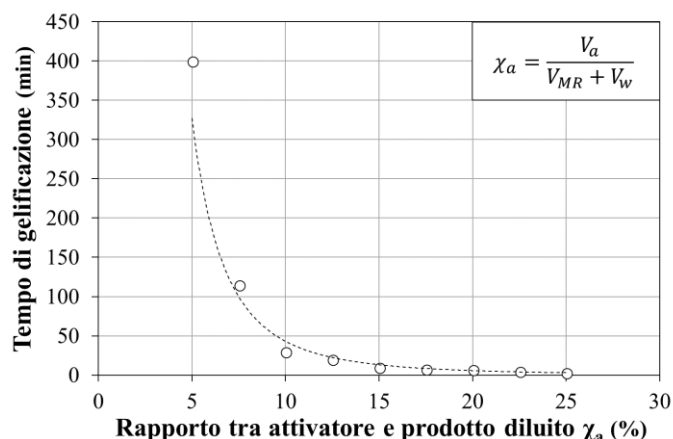


Fig. 1. Curva di gelificazione del MasterRoc MP325  
 ( $V_a$ : volume dell'attivatore,  $V_{MR}$ : volume di prodotto,  $V_w$ : volume di acqua).

### 4. Studio del tempo di maturazione dei campioni

Allo scopo di monitorare lo sviluppo della reazione di gelificazione e di fissare il tempo di maturazione dei campioni per le successive prove meccaniche, campioni sabbiosi sono stati ricostituiti per pluviazione all'interno di contenitori cilindrici in vetro ( $Dr_0=40\%$ ), trattati con iniezioni a bassa pressione di miscele a contenuto di silice differente (Tabella 1) e testati con un'apparecchiatura scissometrica da laboratorio a tempi di stagionatura crescenti (da 3 ore a 28 giorni).

Tabella 1. Composizione delle miscele utilizzate per trattare i campioni soggetti a prova scissometrica.

ID	MasterRoc MP325 (%)	Acqua (%)	Attivatore (%)	$w_s$ (%)
1	25.00	58.30	16.70	3.75
2	16.70	66.60	16.70	2.51
3	8.30	75.00	16.70	1.25

In Figura 2 vengono riassunti i valori di resistenza misurati per le varie miscele nel tempo e comparati con quella della sabbia non trattata (cerchio pieno). Si nota una veloce crescita della resistenza che raggiunge un plateau in corrispondenza dei 28 giorni di stagionatura. Poiché circa il 75% della resistenza ultima viene attinta entro il 5° giorno di maturazione, questo tempo è stato assunto come periodo di stagionatura standard per i test riportati nei paragrafi successivi. Si nota inoltre come la resistenza al taglio dipenda in maniera significativo dal quantitativo di silice iniettata.

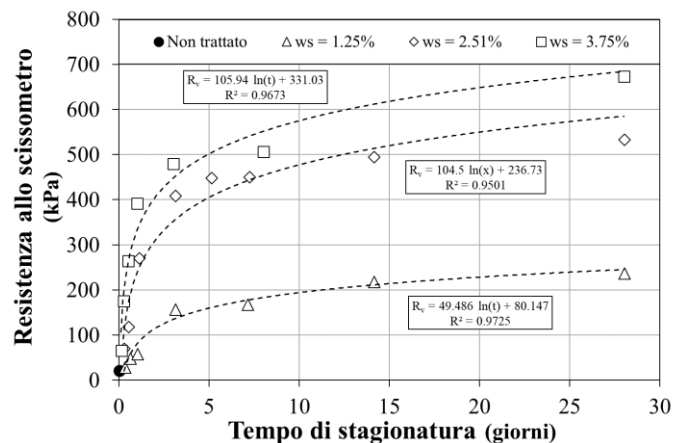


Fig. 2. Risultati delle prove scissometriche.

## 5. Prove di permeabilità

Essendo la permeabilità un indicatore dei cambiamenti a livello microstrutturale indotti da trattamento, sono state eseguite prove di permeabilità sia sul terreno non trattato che trattato. Essendo lecito aspettarsi nei due casi valori molto differenti della grandezza, le prove sul materiale vergine sono state eseguite in condizioni di carico costante, mentre quelle sul materiale trattato a carico variabile.

In Figura 3a sono riportati i risultati delle prove di permeabilità su terreno non trattato all'aumentare della densità relativa, mentre in Figura 3b si confrontano per la medesima densità relativa ( $Dr_0=27\%$ ) i valori di permeabilità di un campione non trattato e di tre campioni trattati con miscele al 2% di nanosilice. In particolare, si osserva come anche una bassa percentuale di nanosilice contribuisca a ridurre di tre ordini di grandezza la permeabilità del terreno naturale.

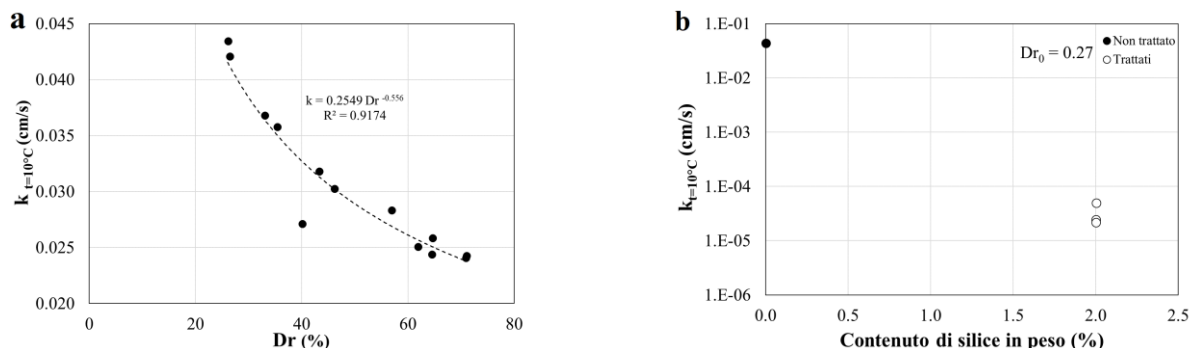


Fig. 3. Risultati delle prove di permeabilità sul terreno naturale (a) e sul terreno trattato ( $ws=2\%$ ) (b).

## 6. Prove triassiali

Sono state eseguite due serie di prove triassiali sia su campioni trattati che non trattati: monotoniche drenate per valutare gli effetti del trattamento sulla resistenza e sul comportamento volumetrico del materiale e cicliche non drenate per verificare l'efficacia della tecnica nei confronti della liquefazione.

Entrambe le campagne sono state realizzate su campioni realizzati con due procedure differenti, la prima più votata alla riproducibilità dei campioni in termini di porosità iniziale ha previsto la pluviazione della sabbia direttamente all'interno della sospensione di trattamento ( $Dr_0=20\%$ ). La seconda più adatta a riprodurre le condizioni di sito, ha previsto dapprima il confezionamento del campione all'interno del formacampione per pluviazione secca ( $Dr_0=30\%$ ) o per battitura di strati successivi ( $Dr_0=60\%$ ) e solo successivamente l'iniezione a bassa pressione della miscela dal basso verso l'alto del provino.

- *Prove monotoniche drenate*

In Figura 4.a sono riportati nei classici piani  $q$ - $\varepsilon_q$  ed  $\varepsilon_p$ - $\varepsilon_q$  ( $q$ : invariante di tensione deviatorica,  $\varepsilon_p$ : deformazione volumetrica ed  $\varepsilon_q$ : deformazione distorsionale) i risultati delle prove triassiali monotoniche drenate realizzate a 100kPa di confinamento. I risultati ottenuti rivelano come il trattamento conferisca al materiale un notevole incremento in termini di resistenza di picco. Di contro, il trattamento sembra non alterare il valore di resistenza residua del materiale sia per i campioni inizialmente sciolti che densi. Infine, si nota come all'aumentare del contenuto di nanosilice si esalti la tendenza a dilatare del terreno, sia in termini assoluti che incrementali. La Figura 4.b mostra invece il confronto tra i risultati della medesima tipologia di prove, ma condotte su campioni trattati con la stessa concentrazione di nanosilice ( $w_s=5.0\%$ ) a tempi di stagionatura differenti (5 e 15 giorni). Si evince come la stagionatura determini un incremento sia della resistenza di picco che residua del materiale.

- *Prove cicliche non drenate*

Si riportano infine i risultati di due campagne di prove cicliche di liquefazione eseguite su provini realizzati per pluviage ( $Dr_0=30\%$ ) o tamping ( $Dr_0=60\%$ ) e successivamente trattati per iniezione a bassa pressione di miscele con contenuto di nanosilice del 5%. Le prove sono state eseguite dopo 5 giorni di stagionatura alla tensione di confinamento costante di 100kPa per differenti valori del cyclic stress ratio (CSR in Equazione 1) monitorando il numero di cicli necessari all'insorgere del fenomeno della liquefazione, assunta in corrispondenza di un rapporto di sovrappressione ( $r_u$  in Equazione 2) almeno pari a 0.9.

$$CSR = \frac{q}{2 \sigma'_{v0}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} \quad (\text{Eq. 2})$$

L'analisi dei risultati riportati in Figura 5 mostra come il trattamento aumenti la resistenza del terreno nei rispetti della liquefazione diminuendo la tendenza del materiale ad accumulare sovrappressioni neutre.

## 7. Discussione e conclusioni

Il presente studio mira all'analisi dell'efficacia delle iniezioni a bassa pressione di sospensioni acquose a ridotta concentrazione di nanosilice colloidale per la mitigazione della suscettibilità alla liquefazione delle sabbie.

I test condotti hanno mostrato come il trattamento, insieme ad una drastica riduzione della permeabilità e ad una maggiore tendenza a dilatare del materiale, produca per ridotti tempi di stagionatura un miglioramento della resistenza di picco rispetto a quella della sabbia non trattata che si estende anche a quella residua per tempi di maturazione più lunghi. In condizioni cicliche non drenate, tale miglioramento ha come effetto una minore tendenza all'accumulo di sovrappressioni con il numero di cicli di carico. Ulteriori prove saranno dedicate allo studio della durabilità del trattamento.

I risultati ottenuti, unitamente al ridotto impatto ambientale della nanosilice, candidano la tecnica ad essere efficacemente adottata nella riduzione della propensione a liquefare dei terreni sabbiosi in un ampio panorama di situazioni tecniche.

## Bibliografia

Chiaro, G., 2007. *Experimental analysis of the compaction of granular materials*. MSc. Civ. Eng. Thesis, University of Cassino, Italy.

D'Appolonia, E., 1954. *Symposium on dynamic testing of soils*. s.l.:ASTM International.

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.

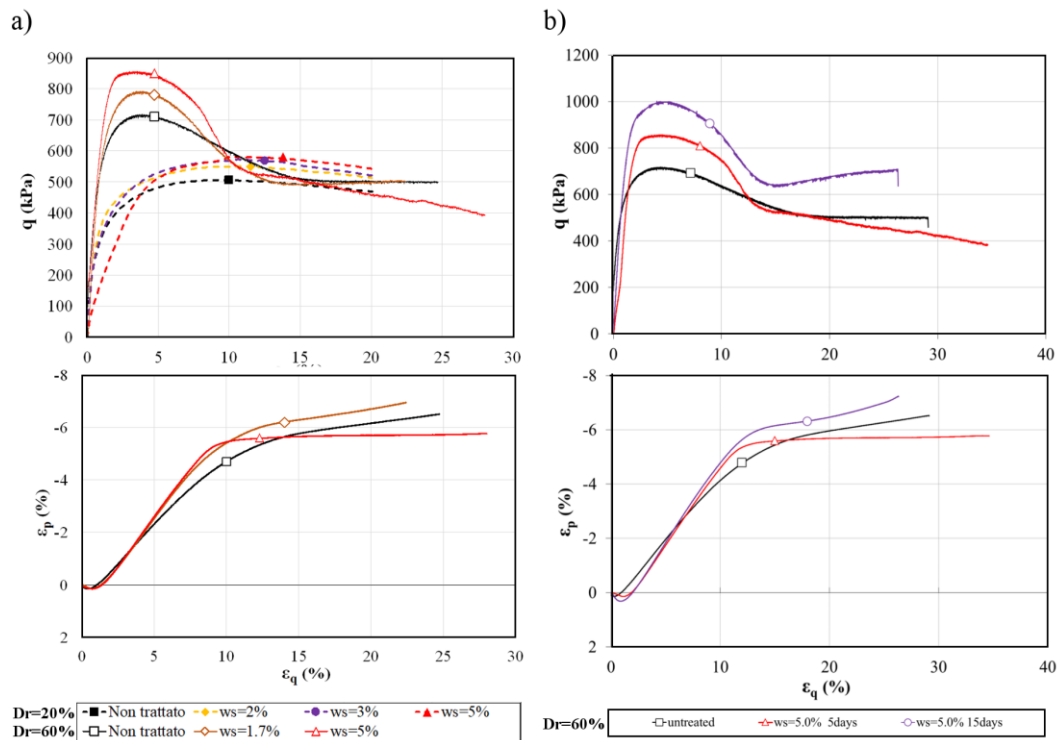


Fig. 4 Risultati delle prove triassiali monotoniche drenate.

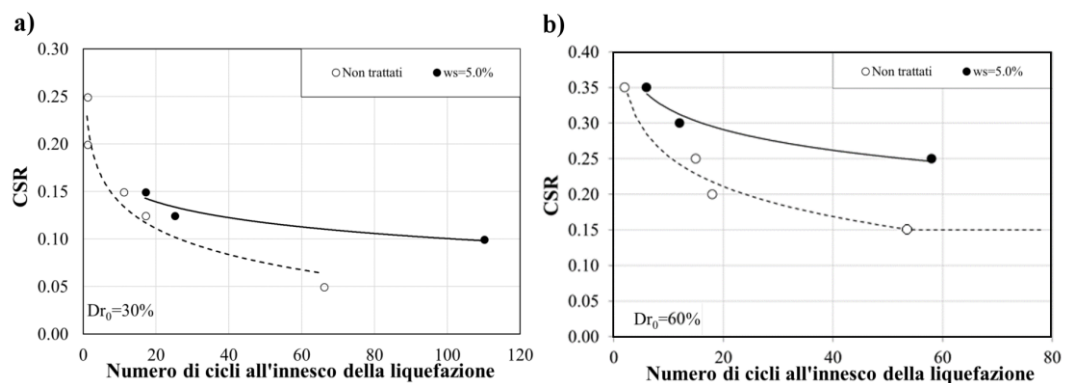


Fig. 5 Risultati delle prove triassiali cicliche non drenate.

Gallagher, P.M. and 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(9): 1017-1026.

Karol, R. H., 1968. Chemical grouting technology. *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Volume 94, pp. 175-204.

Kirsch K. and Kirsch F., *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods*, Second Edition, CRC press, 234 pp.

Mayne, P. W., Jones Jr, J. S. & Dumas, J. C., 1984. Ground response to dynamic compaction. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 110(6), pp. 757-774.

Persoff, P., Apps, J., Moridis, G., and Whang, J. M. (1999). Effect of dilution and contaminants on sand grouted with colloidal silica. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(6): 461-469.

Prugh, B. J., 1963. Densification of soils by explosive vibrations. *Journal of the Construction Division*, 89(C01).

Traldi, D. & Levanto, P., 2016. Metodi innovativi per il consolidamento e l'impermeabilizzazione in sottoterraneo. *Ingegno*, Volume 47.

Yonekura, R. (1996). The developing process and the new concepts of chemical grout in Japan. *Proc. 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, JP:889-901*.