

CARATTERISTICHE DI RIGIDEZZA ALLE PICCOLISSIME DEFORMAZIONI DI SABBIE CEMENTATE ARTIFICIALMENTE

Daniela Porcino

*Università Mediterranea di Reggio Calabria
danirla.porcino@unirc.it*

Vincenzo Marcianò

*Università Mediterranea di Reggio Calabria
vincenzo.marciano@unirc.it*

Sommario

La nota riporta i risultati di un programma sperimentale volto ad investigare gli effetti di un debole livello di cementazione sulla rigidezza al taglio iniziale delle sabbie. La tecnica sperimentale adottata prevede l'impiego dei "Bender elements" montati in cella triassiale. Nel corso di prove di compressione isotropa a differenti livelli tensionali sono state effettuate misure della velocità di propagazione delle onde di taglio su provini ricostituiti di sabbia del Ticino cementati artificialmente e, per confronto, sui provini non cementati nelle stesse condizioni di stato iniziale. I risultati hanno evidenziato come l'influenza di deboli legami di cementazione sia quella di determinare un incremento del modulo di taglio iniziale (ΔG_0) pari mediamente al 20% rispetto a quello calcolato per provini non cementati, sostanzialmente indipendentemente dalla tensione media efficace applicata; inoltre, l'effetto della cementazione indotta dal trattamento risulta equivalente, in termini di caratteristiche di deformabilità alle piccolissime deformazioni, ad una densificazione del terreno pari al 75%.

Introduzione

In molti problemi geotecnici, l'effetto della cementazione, che induce una componente di coesione nei terreni granulari, rappresenta uno dei fattori dominanti sulla risposta meccanica dei terreni, alla stessa importanza dei parametri basilari della Meccanica dei terreni, quali la porosità iniziale e la storia di carico (Leroueil e Vaughan, 1990). In particolare, la presenza di deboli o moderati livelli di cementazione è ricorrente nei depositi naturali su pendii, anche ad elevata pendenza o lungo le coste.

Tenendo conto delle difficoltà associate al prelievo di campioni indisturbati a debole o moderato grado di cementazione, gli studi sperimentali sul comportamento di tali materiali sono generalmente condotti in laboratorio su provini cementati artificialmente.

In tale contesto, l'impiego del parametro G_0 , ovvero modulo di taglio iniziale, estremamente sensibile agli effetti della cementazione si rivela utile ai fini della individuazione ed identificazione dei materiali cosiddetti strutturati, anche in presenza di deboli legami di cementazione (Lee et al., 2010a, 2010b). Ciò spiega il crescente interesse rivolto negli ultimi anni in letteratura allo studio del comportamento dei terreni cementati alle piccolissime deformazioni (Rinaldi & Santamarina, 2008; Spencer & Rix, 2008; Mohsin & Airey, 2008; Yang & Salvati, 2010).

La presente nota riporta i risultati di prove di laboratorio mediante l'utilizzo di "bender elements" in cella triassiale, per la misura della velocità di propagazione delle onde di taglio su provini di sabbia cementati artificialmente in laboratorio. Allo scopo di indurre un debole livello di cementazione è stata utilizzata, quale agente cementante, una soluzione a base di

silicato di sodio. Le misure sono state eseguite al variare della tensione efficace di confinamento in prove di compressione isotropa, al fine di investigare l'effetto della tensione efficace di confinamento sulla rigidità iniziale. Inoltre, la risposta dei provini cementati sciolti è stata confrontata con quella dei provini non cementati ma densi, al fine di verificare l'effetto di una densificazione del terreno.

Preparazione dei provini e procedura sperimentale di prova

Un aspetto importante da evidenziare è che influenza significativamente l'affidabilità e l'accuratezza dei risultati di prove di laboratorio su campioni cementati artificialmente è rappresentato dal metodo di preparazione dei provini, che deve garantire buone condizioni di uniformità e ripetitività (Ismail et al., 2000).

Le prove con bender elements sono state condotte su provini cementati e non cementati di sabbia del Ticino; le proprietà fisiche della sabbia utilizzata e le condizioni di prova sono riportate in tabella 1.

Tabella 1. Proprietà fisiche della sabbia utilizzata e condizioni di prova.

Parametro	G_s	D_{50} (mm)	U_c	FC (%)	e_{max}	e_{min}	p' (kPa)	D_r (%)
	2.68	0.56	1.45	0.26	0.905	0.559	10-300	45, 75

I provini non cementati di sabbia, di altezza pari a 140 mm e diametro 70 mm, sono stati ricostituiti mediante il metodo della deposizione pluviale ad un prefissato stato di addensamento (D_r) iniziale. Nel caso dei provini cementati, dopo la fase di deposizione della sabbia all'interno di una mould, venivano applicati un flusso di CO_2 e, successivamente, un flushing di acqua deaerata, allo scopo di rimuovere l'aria all'interno del provino. Successivamente, una soluzione a base di silicato di sodio (con reagente inorganico) veniva fatta circolare dal basso verso l'alto ("flushing") attraverso il campione. I provini erano poi lasciati all'interno della mould per un tempo ("curino time") di riferimento fissato in 24 ore; successivamente essi erano liberati dalla mould (figura 1) senza indurre il minimo disturbo e posizionati nel piedistallo alla base della cella triassiale.

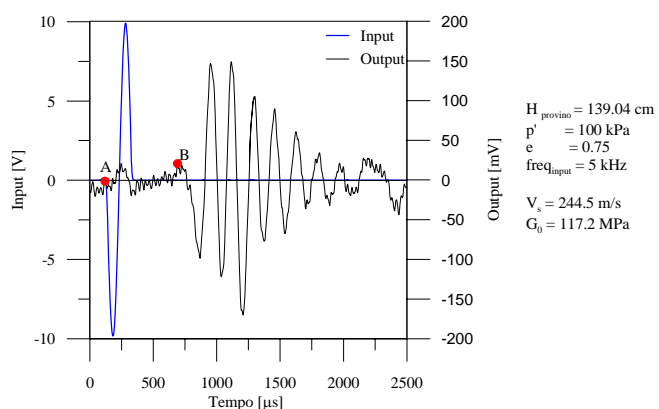


Figura 1. Vista dei provini cementati artificialmente dopo preparazione

Figura 2. Esempio di un segnali di input e di output registrati relativi ad un provino cementato sciolto ($p' = 100$ kPa).

La procedura di preparazione dei provini cementati adottata nella presente ricerca ha consentito di riprodurre provini con buone caratteristiche di ripetitività, come evidenziato dai risultati di prove di compressione semplice non confinata (UCS) eseguite su numerosi

campioni. Tali prove hanno fornito un valore medio della resistenza al picco q_{UCS} pari a 75 kPa.

La fase di saturazione dei provini cementati era realizzata mediante l'applicazione di una back-pressure pari a 300 kPa mantenuta per un tempo di dodici ore e, successivamente, i provini erano assoggettati ad una fase di compressione isotropa.

Per la misura della velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) sono stati utilizzati trasduttori piezoelettrici posti alla base (bottom) e nel ripartitore del carico (top) della cella.

La distanza tra i due trasduttori (L) ed il tempo (t) richiesto dall'onda necessario a percorrere la distanza L erano utilizzate per il calcolo di $V_s=L/t$. Per la stima del tempo di propagazione dell'onda attraverso i provini si è fatto riferimento al metodo del primo arrivo (Viggiani & Atkinson, 1995; Brignoli et al., 1996).

La frequenza del segnale di input è stata opportunamente selezionata ($f=5$ kHz) in modo da ridurre l'incertezza nell'individuazione del tempo di primo arrivo.

Risultati sperimentali

La figura 3a mostra la variazione della velocità di propagazione delle onde di taglio con la tensione media efficace di confinamento (p') misurati su provini cementati e non cementati sciolti della sabbia del Ticino.

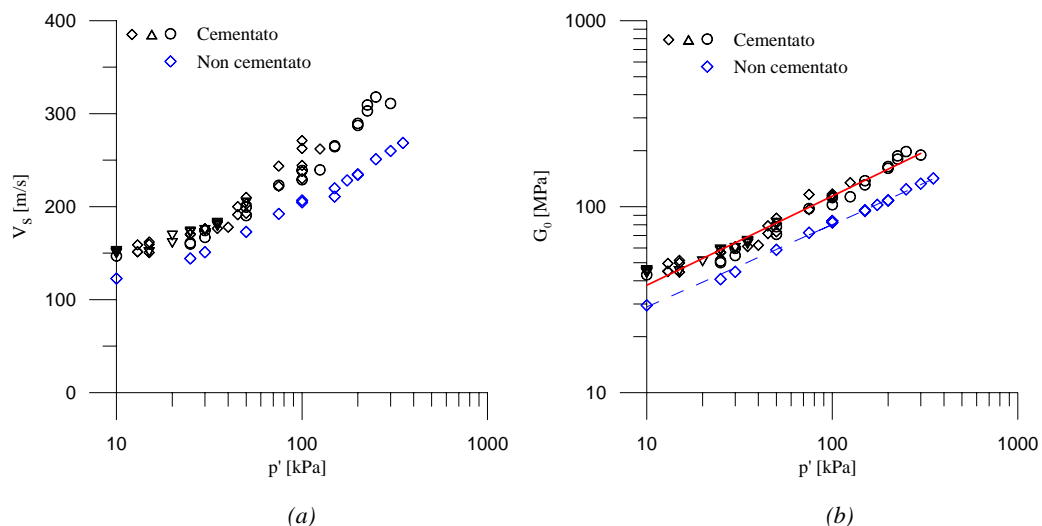


Figura 3. Misure di velocità di propagazione delle onde di taglio V_s e del modulo iniziale G_0 eseguite su provini cementati e non cementati ($D_r = 45\%$).

Nel caso dei provini cementati si osserva un incremento della velocità delle onde di taglio dovuto alla cementazione, rispetto ai valori misurati sui corrispondenti provini non cementati.

La conoscenza del modulo di taglio iniziale attraverso la misura della velocità di propagazione delle onde elastiche nei terreni può essere ottenuta dalla relazione:

$$G_0 = \rho_{sat} \cdot V_s^2 \quad (1)$$

essendo $\rho_{sat}=\gamma_{sat}/g$ la massa per unità di volume del terreno saturo.

Nel caso dei provini non cementati i risultati sperimentali sono stati interpolati utilizzando una legge di variazione:

$$G_{0, non\ cem} = A \cdot F(e) \cdot \left[\frac{p'}{p_a} \right]^n = A \cdot e^{-1.3} \cdot \left[\frac{p'}{p_a} \right]^n \quad (2)$$

in cui p_a è la pressione media efficace di riferimento (98 kPa) ed $F(e)$ funzione dell'indice dei vuoti (e). I parametri ottenuti sulla base delle misure di V_s sui provini non cementati sono i seguenti: $n=0.44$ ed A (costante di rigidità)=239.

L'incremento del modulo di taglio iniziale dovuto alla cementazione, ΔG_0 , è in generale funzione di diversi fattori quali (tipo di agente cementante e livello di cementazione, livello tensionale efficace, indice dei vuoti, curing-time) (Saxena et al., 1988).

I risultati ottenuti nel presente studio sui provini cementati sciolti (fig. 3b) mostrano che tale incremento del modulo di taglio iniziale, mediamente pari al 20%, è praticamente indipendente dalla tensione efficace media applicata.

Tale modello di comportamento è stato osservato sperimentalmente anche da altri autori (Saxena et al., 1988; Acar & El-Tahir, 1986) su provini debolmente cementati, indipendentemente dal tipo di agente cementante utilizzato.

Analizzando in dettaglio la figura 3b, in un intervallo tensionale più limitatato ($p' < 100$ kPa), è possibile individuare due tratti con pendenze leggermente differenti: il primo tratto (meno pendente del secondo) evidenzia una minore influenza della tensione media efficace sul modulo di taglio iniziale.

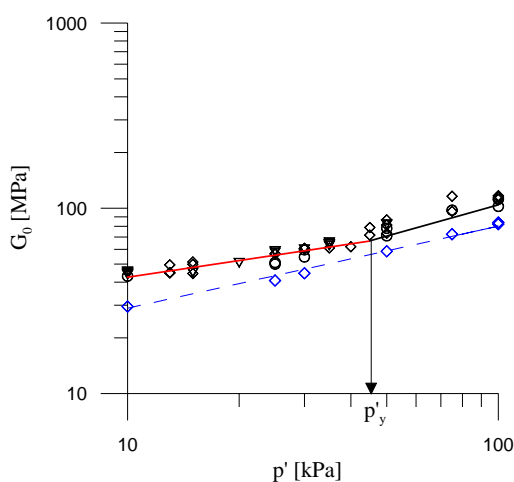


Figura 4. Variazione del modulo di taglio iniziale G_0 relativo ai provini cementati e non cementati sciolti ($D_r = 45\%$) per $p' < 100$ kPa.

Il passaggio da un tipo di comportamento ad un altro è segnato dalla tensione di snervamento (p'_y) corrispondente alla destrutturazione del materiale (Yun & Santamarina, 2005; Rinaldi & Santamarina, 2008). Tale soglia aumenta all'aumentare del livello di cementazione per cui nel caso di provini debolmente cementati, essa appare più difficilmente individuabile.

Tenendo conto anche delle caratteristiche di compressibilità volumica riportate in figura 5b, tale soglia tensionale è stata individuata nell'intervallo compreso tra 35 e 45 kPa (v. fig. 4).

L'andamento del modulo di compressibilità volumica ($K' = dp'/d\varepsilon_{vol}$) con il livello tensionale mostrato in figura 5b è coerente con quanto riportato da altri autori per terreni compressibili, quali ad esempio sabbie carbonati che cementate (Huang & Airey, 1998).

Al fine di verificare l'effetto della densificazione sui valori di rigidità iniziale, sono state eseguite prove con bender elements in fase di compressione isotropa su provini non cementati a differente stato di addensamento iniziale.

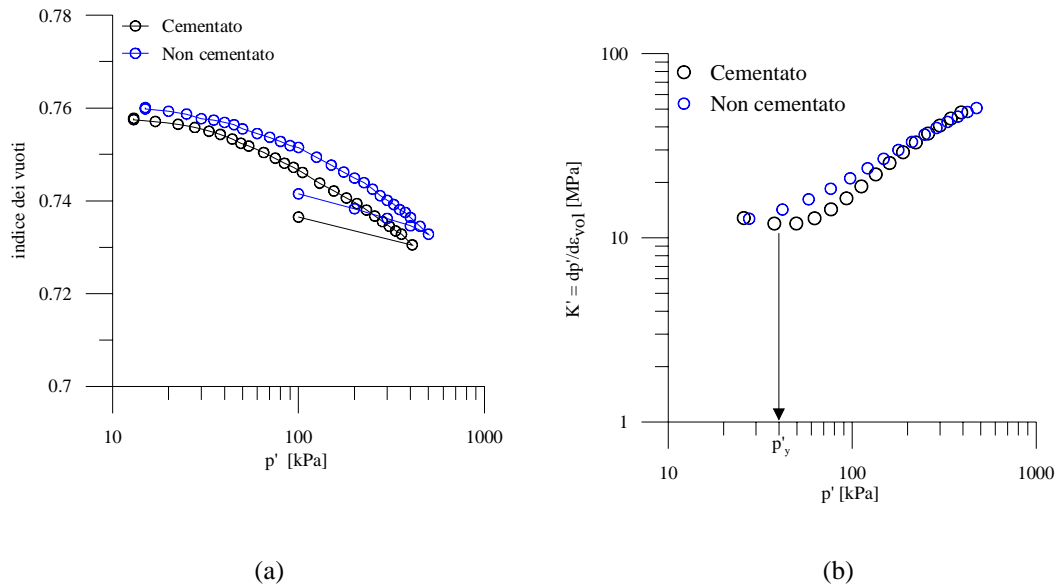


Figura 5. Risultati di prove di compressione isotropa eseguite su provini cementati e non cementati sciolti

Tali misure sono state poi confrontate con quelle relative ai provini cementati sciolti. I risultati ottenuti (fig. 6) hanno evidenziato come gli effetti prodotti dalla cementazione (per il tipo e livello di cementazione indotto) risultano equivalenti ad una densificazione del terreno, corrispondente ad una densità relativa iniziale pari al 75%.

La buona corrispondenza di comportamento tra provini cementati sciolti e non cementati densi è stata osservata sperimentalmente dagli autori anche in terreni di caratteristiche di resistenza alla liquefazione ciclica in prove di taglio semplice e triassiali non drenate cicliche (Porcino et al., 2011). Tali risultati appaiono interessanti dal punto di vista pratico, poiché le tradizionali tecniche di miglioramento dei terreni impiegate per la mitigazione del rischio di liquefazione sismica sono basate sulla densificazione del terreno.

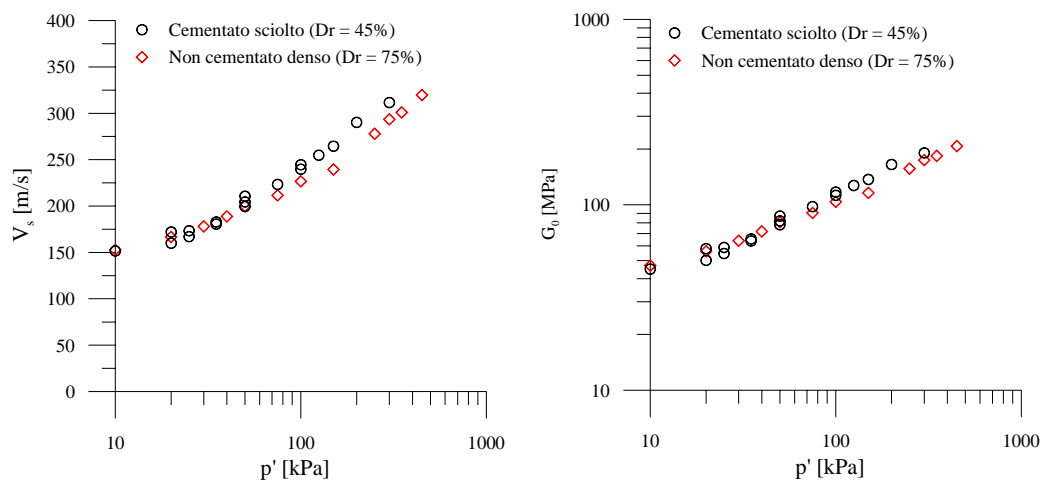


Figura 6. Modulo di taglio iniziale G_0 ottenuto da prove con bender elements in cella triassiale su provini cementati sciolti e non cementati densi

Conclusioni

Misure della velocità di propagazione delle onde di taglio nei terreni sono state condotte su provini cementati artificialmente e non cementati della sabbia del Ticino mediante l'impiego di bender elements in cella triassiale, al fine di investigare l'influenza di una debole cementazione sulle caratteristiche di rigidità iniziale.

Le principali conclusioni che si possono trarre dalla presente ricerca sono:

- i valori del modulo di taglio alle piccolissime deformazioni aumentano per effetto di una debole cementazione e, oltre una soglia tensionale ($p'_y \cong 35-45$ kPa), la legge di variazione del modulo G_0 con il livello tensionale è simile a quella osservata su provini non cementati. Tale tensione di snervamento corrispondente all'inizio della fase di decementazione è stata individuata anche sulla base delle caratteristiche di compressibilità volumica.
- i valori di V_s relativi ai provini cementati sciolti ($D_r=45\%$) si accordano bene con quelli ottenuti sperimentalmente su provini non cementati ma densi ($D_r=75\%$), evidenziando una buona corrispondenza di comportamento tra gli effetti di densificazione e quelli indotti dal trattamento impiegato.

Bibliografia (Riferimenti principali)

- Brignoli, E.G.M., Gotti, M., Stokoe, K.H.II. (1996). Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 19(4), 384-397.
- Huang J.T. e Airey, D.W. (1998). Properties of artificially cemented carbonate sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(6), 492-499.
- Lee, M.J., Choo, H. e Kim, J. (2010a). Effect of artificial cementation on cone tip resistance and small strain shear modulus of sand. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1-9.
- Lee, M.J., Choi, Y.M., Kim, M.T., e Lee. W.J. (2010b). Evaluation of cementation effect of sand using cone resistance. *Proceedings 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*, May 9-11, 2010, Huntington Beach, California, 2(2-10).
- Leroueil, S., e Vaughan, P.R. (1990). The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique*, 40(3), 467-488.
- Mohsin, A.K.M. e Airey, D.W. (2008). Using G_{max} measurements to monitor degradation of an artificially cemented sand. In: Burns, Mayne and Santamarina (eds) *Proceedings the fourth International Symposium on Deformation characteristics of Geomaterials*, IS-ATLANTA 2008, 21-24 September 2008, Atlanta, Georgia, USA.
- Porcino, D., Marciànò V., Granata, R. (2011). Undrained cyclic response of a silicate-grouted sand for liquefaction mitigation purposes. Accettato per la pubblicazione su *Geomechanics and Geoengineering: an International Journal*.
- Rinaldi, V.A., e Santamarina, J.C. (2008). Cemented Soils: Small Strain Stiffness. In: Burns, Mayne and Santamarina (eds), *Proceedings fourth International Symposium on Deformation characteristics of Geomaterials*, IS-Atlanta 2008, 21-24 September 2008, Atlanta, Georgia, USA., 1, 267-273.
- Saxena, S.K., Avramidis, A.S., Reddy, K.R. (1987). Dynamic moduli and damping ratios for cemented sands at low strains. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(2), 353-368.
- Viggiani G. e Atkinson, J.H. (1995). Interpretation of bender element tests. *Geotechnique*, 45(1), 149-154.