

IL CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI MEDIANTE FAST DEEP MIXING

R. Papa, M. Ramondini

*Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale, Università degli Studi di
Napoli Federico II*

rafpapa@unina.it; ramondin@unina.it

Sommario

Il miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione rappresenta sempre più una tendenza verso la quale si spingono i progettisti, soprattutto negli interventi di recupero delle strutture esistenti, in quanto con essi si riesce ad ottenere un giusto compromesso tra efficacia e costi. Tra i vari trattamenti disponibili i più diffusi sono sicuramente quelli colonnari che si differenziano sia per i materiali utilizzati nelle iniezioni (cementi, resine, silicati...) sia per la modalità di esecuzione del trattamento (miscelazione meccanica, iniezione a pressione, miscelazione ed iniezione).

In questa nota si riferisce di una nuova tecnica di trattamento colonnare, Fast Deep Mixing, derivata dalla tecnica tradizionale DMM (Deep-Mixing-Method). Tra i vantaggi di questa nuova tecnica particolare rilievo assume la ridotta dimensione delle attrezzature utilizzate che la rende, di fatto, adatta ad interventi di consolidamento in sottofondazione.

1 Introduzione

Il trattamento dei terreni mediante miscelazione profonda (DMM: Deep Mixing Method), è una particolare tecnica finalizzata a migliorare le caratteristiche meccaniche ed idrauliche del terreno miscelando lo stesso insieme ad un legante e/o ad altri materiali che vengono introdotti in forma secca o in forma umida (boiaccia). Attualmente sono disponibili differenti metodi di miscelazione profonda, ognuno dei quali è conosciuto con un proprio nome in funzione di come viene iniettato il legante (metodo secco e metodo umido) e di come viene eseguita la miscelazione. L'adozione di tale tecnica è però limitata principalmente dalla necessità di operare con attrezzature di notevole ingombro che ne impediscono di fatto l'utilizzo per interventi in sottofondazione, in zone urbane o in siti di difficile accesso. Al fine di superare questi limiti, è stata sviluppata una nuova attrezzatura di dimensioni ridotte (fig. 1) capace di operare in qualsiasi contesto e condizioni, caratterizzata inoltre da una notevole velocità di esecuzione, da cui l'acronimo Fast Deep Mixing (FDM).

2 Fast Deep Mixing

La tecnica di miscelazione profonda del terreno, FDM, messa a punto dalla P.I.G.I. srl Costruzioni e Fondazioni deriva in parte dalla tecnica tradizionale DMM. L'attrezzatura FDM permette di realizzare in breve tempo colonne di terreno trattato di diametro variabile tra 150 e 600 mm, sia inclinate che verticali (la tecnica tradizionale consente di realizzare solo colonne verticali), caratterizzate da limitati consumi di legante (boiaccia di cemento) ed elevata omogeneità del trattamento lungo la verticale.

Il trattamento può essere realizzato indipendentemente sia in terreni a grana fina che a grana grossa, grazie alla possibilità di regolazione di diversi fattori quali la velocità di rotazione, avanzamento e risalita, la pressione di iniezione della boiaccia ed il volume di iniettato. Infatti, nello sviluppo dell'attrezzatura, oltre a prestare particolare attenzione alle dimensioni delle

perforatrici è stata posta particolare attenzione anche alla versatilità ed alla produttività della stessa. Analogamente alla tecnica tradizionale, anche in questo caso possono essere inserite armature nelle colonne consolidate nei casi in cui occorra affidare all'intervento anche ad una funzione strutturale. La geometria degli utensili è stata definita, tenendo conto della natura del materiale da consolidare, in maniera da ottimizzare sia il consumo del legante sia l'energia di miscelazione, al fine di ottenere un buon grado di omogeneità del trattamento lungo le colonne realizzate (fig. 2).



Figura 1. Attrezzatura utilizzata per il FDM



Figura 2. Colonne di terreno consolidato: a) terreni a grana grossa; b) terreni a grana fina; c) terreni di riporto

3 Siti sperimentali

Al fine di validare la tecnica FDM sono stati realizzati una serie di campi sperimentali nell'ambito di diversi siti di intervento su problematiche diverse, quali stabilizzazione del piede di gabbioni; stabilizzazione di rilevati stradali; consolidamento delle fondazioni di strutture esistenti; consolidamento del terreno a tergo di muri di sostegno, nonché su terreni di natura diversa. Per ciascuno dei campi sperimentali sono state eseguite prove sia in sito che in

laboratorio: nella presente nota si riferisce solo dei risultati ottenuti sul campo sperimentale di Benevento, ubicato in un sito il cui sottosuolo è costituito da terreni a grana fina normalconsolidati, la cui coltre superficiale si presenta alterata e leggermente preconsolidata, con la presenza di una modesta coesione. Nella tabella 1 sono riportate le caratteristiche fisico meccaniche dei terreni in sito prima del trattamento determinate sulla base di prove triassiali eseguite presso il laboratorio del DIGA.

SITO	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	φ'	I_p
Benevento						
coltre alterata	19.91	16.36	26.9	16.3	15.9	0.322
argilla marrone	20.60	17.55	26.9	0	26.5	

Tabella 1. Caratteristiche fisiche medie dei terreni studiati

La sperimentazione è consistita nella realizzazione di una serie di colonne del diametro di 400mm disposte con maglia 600x600mm utilizzando una miscela costituita da cemento ed acqua in rapporto A/C=0.5. Durante la perforazione sono stati iniettati circa 20 litri di boiaccia per metro lineare di trattamento di cui 10 litri in fase di avanzamento e 10 litri in fase di risalita. Per controllare l'evoluzione del consolidamento nel tempo è stato eseguito un monitoraggio degli effetti del trattamento mediante la misura della variazione della rigidezza media del banco attraverso prove dinamiche di superficie con tecnica MASW (Evangelista et al., 2011). Le misure sono state eseguite prima del trattamento e successivamente a 3, 7, 15 e 28gg. I risultati ottenuti mostrano un significativo incremento della rigidezza già a 7gg, (il trattamento è stato eseguito nel mese di luglio con temperature non inferiori a 32°C), con piccoli incrementi successivi (fig. 3).

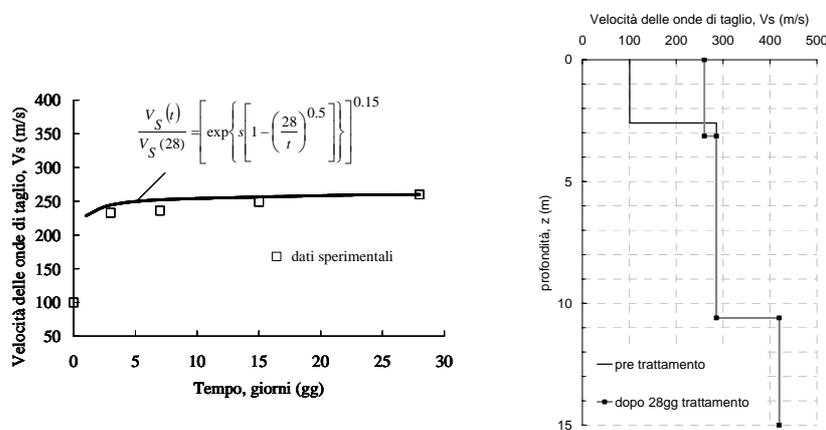


Figura 3. Rigidezza del terreno trattato in funzione del tempo di maturazione (Evangelista et al., 2011)

In laboratorio, a maturazione delle colonne avvenuta (28gg) sono state prelevate della carote dalla zona trattata. Su di esse sono state eseguite:

- prove di compressione uni assiale (ELL);
- prove di compressione triassiale consolidate non drenate (TX-CIU);
- prove di compressione edometrica (EDO);
- prove di taglio diretto (DS).

Nel seguito verranno riassunti i risultati più significativi finora raggiunti.

4 Risultati sperimentazione

I valori delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei campioni sottoposti a prova sono riportati nella tabella 2; le percentuali medie di pasta di cemento (*cls*) risultano variabili tra il 13 e 25% ed il valore del peso secco per unità di volume del terreno trattato, (γ_d), risulta sempre molto prossimo a quello del terreno naturale (v. tab. 1); pertanto il trattamento non comporta un aumento sostanziale della tensione verticale efficace in sito e, quindi, dei cedimenti nel tempo.

Campione	prof. mt	γ_d KN/m ³	σ_c kPa	ϵ_{ar} %	σ_c medio kPa	ϵ_{ar} medio %	% cls	% cls media
ELL 1	0.00-2.50	19.60	1534.8	1.0	3683.0	0.6	2.5	13.1
ELL 2		18.86	2230.3	0.7				
ELL 3		18.70	3621.4	1.1				
ELL 4		17.91	1636.8	0.3				
ELL 5		17.65	2471.5	0.4				
ELL 6		16.29	6157.8	0.2				
ELL 7		16.03	8128.5	0.4				

Campione	prof. mt	γ_d KN/m ³	p'_r kPa	q_r kPa	ϵ_{ar} %	% cls	% cls media
TX-CIU 1	0.00-2.50	16.43	1458.4	4075.3	2.3	22.4	25.1
TX-CIU 2		16.41	1221.9	3365.7	0.7	22.5	
TX-CIU 3		15.86	1219.1	3357.4	3.1	23.7	
TX-CIU 4		16.23	1548.2	4044.7	0.7	23.8	
TX-CIU 5		15.89	984.9	2354.8	3.9	26.5	
TX-CIU 6		15.75	2127.5	5482.6	1.4	27.6	
TX-CIU 7		15.59	2115.2	5445.6	1.6	28.9	

Tabella 2. Caratteristiche fisico-meccaniche significative; ELL: prove monoassiali; TX-CIU: prove triassiali.

In fig. 4 sono rappresentati i risultati delle prove di compressione uniassiale in funzione della percentuale di boiaccia. Si può notare che, come era da attendersi, le resistenze crescono in funzione di tale parametro anche se non in modo uniforme. Ciò probabilmente è da mettere in relazione alla natura delle colonne trattate in questi terreni a grana fine in cui vengono a formarsi come dei macroelementi resistenti con comportamento fragile, tipo sabbia-ghiaia cementata, per i quali l'innesco della rottura è influenzata dai difetti strutturali (fig. 5). Tale ipotesi sembrerebbe confermata dai risultati delle prove di compressione triassiale rappresentati nel piano q-p' (fig. 6). Da tali diagrammi si osserva che i campioni trattati sono caratterizzati da un deciso aumento del termine attritivo mentre il termine coesivo aumenta ma meno marcatamente rispetto al valore dei campioni di terreno indisturbato, confermando l'ipotesi di aggregazione delle particelle di argilla in macroelementi.

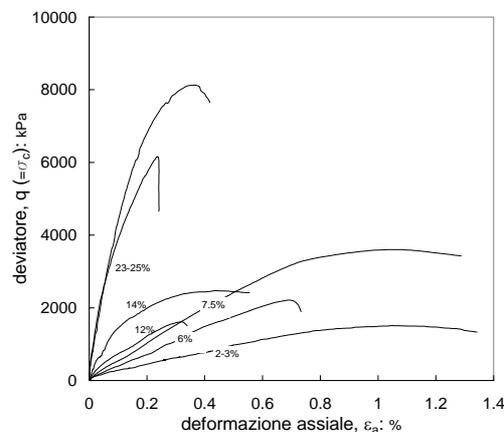


Figura 4. Resistenza da prove di compressione uniassiale ELL in funzione della percentuale di boiaccia



Figura 5. Rottura provino

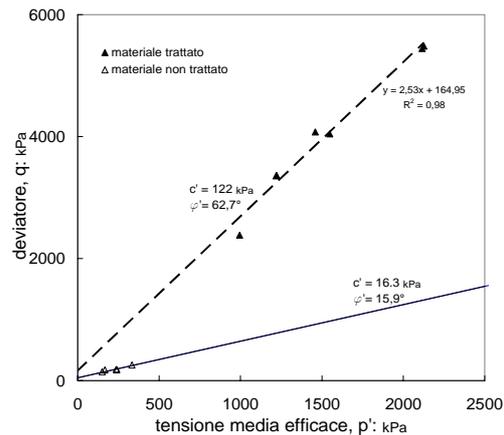


Figura 6. Resistenza da prove di compressione triassiale TX-CIU

Infine, in fig. 7 sono riportati i risultati delle prove edometriche eseguite su campioni naturali e trattati. I campioni naturali prelevati nella coltre alterata tendono ad avere un comportamento simile, con valori del coefficiente C_c pari 0.20; dopo il trattamento si osserva una riduzione di tale parametro di circa un ordine di grandezza con C_c pari a circa 0.07, con valori decrescenti all'aumentare del contenuto in boiaccia. Per quanto riguarda i campioni naturali prelevati nella formazione di base, essi sono caratterizzati da un valore del coefficiente C_c inizialmente pari 0.02; dopo il trattamento si osserva un effetto quasi trascurabile con valori di C_c pari a circa 0.018, (tab. 4). Quanto osservato nei provino prelevati nella formazione di base è confermato dai risultati delle prove MASW (fig. 3), che mostrano valori delle rigidezze prima e dopo il trattamento praticamente invariati.

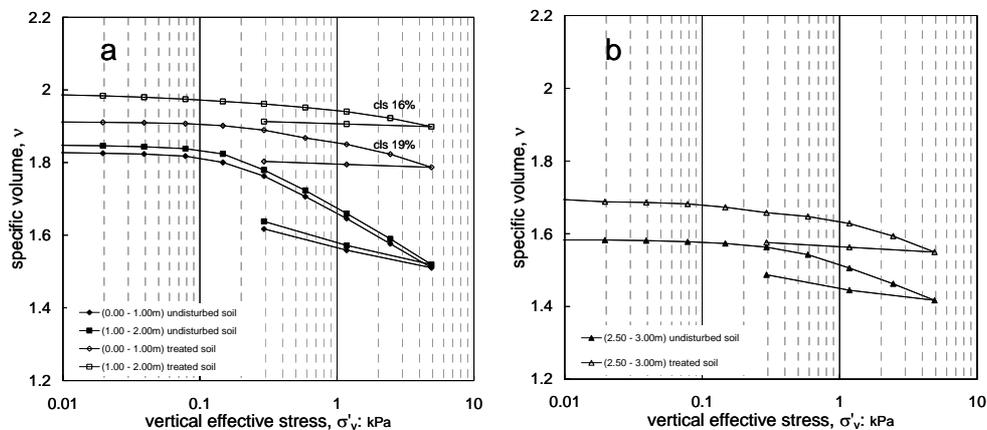


Figura 7. Prove di compressione edometrica EDO. a) coltre alterata; b) formazione di base.

Campione	profondità m	γ_d KN/m ³	e	Cs	Cc	% c
OED 1	0.00-2.50	14.05	0.915	0.016	0.082	16.2
OED 2		13.53	0.988	0.009	0.067	18.8
OED 3	2.00-3.00	12.94	0.332	0.010	0.018	26.6

Tabella 4. Caratteristiche fisico-meccaniche significative; EDO: prove edometriche.

5 Conclusioni e sviluppi futuri

La tecnica di trattamento descritta nella presente nota mette in evidenza la possibilità di applicazione del consolidamento mediante deep mixing anche per cantieri di dimensioni limitate o di difficile accessibilità, che rappresentano quasi sempre le condizioni negli interventi di risanamento di fondazioni o opere di sostegno. La sperimentazione eseguita ha mostrato l'efficacia della tecnica di trattamento proposta nei terreni a grana fina per i quali si osserva un deciso aumento delle caratteristiche di resistenza e di rigidità rispetto al terreno naturale ma con meccanismi di sviluppo che sembrano, allo stato attuale, sostanzialmente legati alla formazione di macroelementi che possono muoversi l'uno rispetto l'altro; ciò comporta che l'aumento della resistenza si risente prevalentemente sul termine attritivo, mentre la coesione cresce meno rispetto a quella del materiale indisturbato.

Attualmente la P.I.G.I. srl sta portando avanti un'ulteriore evoluzione della attrezzatura per permettere l'applicazione della tecnica per il consolidamento dei terreni al di sotto di strutture di fondazione limitando l'interazione con queste ultime. La nuova tecnologia consentirà la realizzazione di preforni di dimensioni limitate nelle fondazioni (diam. max 100mm) con successivo allargamento della zona trattata sotto la fondazione (diam. max. 300mm) al fine di ridurre al minimo il danneggiamento delle armature esistenti.

Bibliografia

- Evangelista L., d'Onofrio A., Silvestri F., Santucci de Magistris F., 2011. Un'applicazione della tecnica sperimentale MASW per il controllo del consolidamento dei terreni. Atti XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica. Napoli, 2011.
- Hansbo S., Massarsch K.R., 2005. Standardisation of Deep Mixing Methods. Proc. Int. Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances.
- Okumara T., 1996. Deep Mixing method of Japan. Proc. Int. Conference on Ground Improvement Geosystems, 879-887. Tokyo.
- Papa R. and Ramondini M., 2011. Il consolidamento dei terreni mediante fast deep mixing. Atti XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica.. Napoli, 2011.
- Porbaha A., 1998. State of the art in deep mixing technology. Part II. Application. Ground improvement, 2, 125-139.
- Porbaha A., 1998. State of the art in deep mixing technology. Part IV. Design Considerations. Ground improvement, 3, 111-125.
- Poulos H.G., Carter J.P., Small J.C., 2001, Foundation and retaining structures – research and practice, Proc. XV ICSMFE, Istanbul, 1-80
- Terashi M., 2003. The state of practice in deep mixing methods. Proc. Of the 3rd International Conference, Grouting and Ground Treatment, New Orleans, 25-49.
- Yang D.S., 1997. Deep Mixing. In situ ground improvement, reinforcement and treatment: a twenty year update and a vision for the 21st century. Ground Reinforcement Committee, American Society of Civil Engineers, Geo-Institute Conference, Logan, UT, pp. 130-150.