

COMPORTAMENTO IN ESERCIZIO DI CHIODI INSTALLATI IN TERRENI PIROCLASTICI

G. Di Fonzo, M. Ramondini

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

giada.difonzo@unina.it; ramondin@unina.it

Sommario

La tecnica della chiodatura del terreno (*soil-nailing*), per il sostegno di fronti di scavo o di pendii in condizioni limiti di sicurezza, è molto utile e vantaggiosa per gli ambienti urbani e di forte pregio ambientale in cui le opere di sostegno tradizionali non possono essere utilizzate.

La chiodatura del terreno utilizza elementi di rinforzo di tipo passivo, detti appunto chiodi (*nail*), che vengono installati nel terreno, cementati o a diretto contatto con il terreno stesso, con una spaziatura alquanto ridotta; i chiodi vengono infine collegati mediante delle reti o dei rivestimenti, non portanti, che assolvono la sola funzione di conferire continuità nella distribuzione degli sforzi e di proteggere il fronte dall'erosione superficiale.

Il massimo contributo resistente che tali rinforzi sono in grado di trasferire al terreno è funzione della massima resistenza allo sfilamento che, sebbene stimabile mediante formulazioni empiriche, viene correttamente determinata da prove di sfilamento; detta resistenza è funzione delle caratteristiche del terreno, dell'interfaccia terreno rinforzo, dello stato tensionale e della tecnica di installazione.

In questa nota si riferisce sul comportamento in esercizio osservato nel corso di prove in sito su chiodi installati in terreni piroclastici naturali e migliorati.

1. Introduzione

Il rinforzo dei terreni con l'utilizzo di chiodi passivi è molto vantaggioso tanto per l'esecuzione di scavi in area urbana quanto soprattutto per la stabilizzazione di coltri piroclastiche in condizioni limite di sicurezza.

In particolare molto frequente nelle nostre zone costiere è la presenza di una coltre piroclastica, al di sopra di una falesia tufacea, con pendenze comprese tra i 50° e i 70° che predispongono il materiale sciolto a frane di tipo scorrimento/crollo, soprattutto per effetto di imbibizione dei terreni stessi a seguito di eventi meteorici particolarmente intensi che ne annullano l'aliquota di resistenza coesiva.

La tecnologia della chiodatura del terreno, *soil nailing*, ben si presta a risolvere queste potenziali condizioni di instabilità in terreni sciolti ed ha il notevole pregio di essere particolarmente adatta alle lavorazioni in parete che spesso si rendono necessarie in questi ambienti costieri.

Il fattore chiave nella progettazione delle opere in *soil nailing* è la conoscenza dei meccanismi di mobilitazione dell'attrito all'interfaccia terreno-rinforzo, da cui dipende il massimo contributo resistente che tali rinforzi sono in grado di trasferire al terreno; le prove di sfilamento, in sito così come in laboratorio, sono molto utili a tal fine (Di Fonzo et al., 2011). Le ricerche sperimentali descritte in letteratura evidenziano in generale come le caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre e la tecnica di installazione giochino un ruolo determinante sull'efficacia della tecnica, insieme evidentemente a tutti i parametri intrinseci

(distribuzione granulometrica e mineralogia) e di stato (stato tensionale, indice dei pori, grado di saturazione) del terreno (Jewell et al.1990, Junaideen et al. 2004, Chu e Yin 2005, Di Fonzo, 2008,Flora et al.2011).

La nota tratta l'interpretazione dei risultati di prove di sfilamento su chiodi installati in terreni piroclastici, ed in terreni piroclastici trattati. In quest'ultimo caso la prova di sfilamento ha anche permesso di ricavare informazioni utili riguardo l'effetto del trattamento eseguito sul terreno.

2. Attività sperimentale

Si riferisce di due prove di sfilamento eseguite l'una su un costone nell'isola di Ischia e l'altro in un sito ubicato nell'isola di Ventotene.

2.1 Modalità di allestimento delle prove di sfilamento

Le prove di sfilamento sono state eseguite a carico controllato: la sollecitazione di trazione è stata applicata in testa alla barra con una pompa oleodinamica manuale controllando il livello di pressione tramite un manometro meccanico a bagno d'olio.

I chiodi sono stati strumentati con tre comparatori centesimali in testa, per la misura degli spostamenti ed un micrometro per la misura degli spostamenti della piastra di contrasto; il carico applicato è stato invece misurato con il manometro collegato al pistone (v. figura 1)

Per ciascun livello di carico la forza applicata è stata mantenuta costante per un periodo di tempo pari a 60' con misura della deformazione a 0'-2'-4'-8'-15'-30' ovvero fino a quando la velocità di deformazione non risulti inferiore all'1%



Figura 1- Allestimento prova di sfilamento in parete

2.2 Il sito di Ischia

Dal punto di vista litostratigrafico sul costone oggetto di intervento sono presenti, procedendo dall'alto verso il basso:

- Lave trachitiche a blocchi molto fratturate;
- Depositi piroclastici sciolti.

Questi ultimi a prevalente grana fine (cineriti e siltiti), includono livelli più grossolani, con granulometria di sabbie ghiaiose fino a divenire veri e propri conglomerati di spessore decimetrico. Detti terreni in alcuni livelli sono caratterizzati da intensi legami coesivi, che lo fanno apparire a tratti come tufo pozzolanico, anche se i legami possono ridursi fino ad annullarsi per effetto di significative variazioni del contenuto d'acqua. Quest'ultimo terreno è stato oggetto dell'intervento di consolidamento mediante chiodatura, il cui comportamento è

stato testato con una prova di sfilamento. Per quanto attiene la caratterizzazione fisico meccanica dei terreni, sulla base delle conoscenze disponibili si è assegnato alle pozzolane superiori un valore del peso dell'unità di volume pari a 14.5 kN/m^3 ed un valore dell'angolo di attrito ϕ pari a 30° .

La prova di sfilamento, a carico controllato, è stata eseguita su una barra in acciaio Anchor Road R32 Termic autoproforante, cementata in un foro di diametro pari a 70 mm avente una lunghezza di 5 metri. Su questa barra è stata eseguita una prova di sfilamento, per la verifica della resistenza al taglio mobilitata all'interfaccia, pertanto si è raggiunto il valore limite di resistenza allo sfilamento.

2.3 Il sito di Ventotene

Per quanto riguarda il sito di Ventotene, il consolidamento con chiodi è stato utilizzato per la stabilizzazione di un muro in pietra di tufo costituente il rivestimento di un terrapieno pozzolanico, con taglio verticale di altezza pari a 4 metri, prospiciente il Porto Romano. L'alta valenza archeologica, paesaggistica ed ambientale della zona non permetteva la realizzazione di opere di sostegno tradizionali. Al fine pertanto di garantire la stabilità del terrapieno è stato progettato un intervento di consolidamento con chiodi unitamente al trattamento del terreno stesso con *deep mixing* che ha permesso di ridurre notevolmente la lunghezza dei rinforzi della parete, in quanto a tergo del terrapieno a circa 2.5 metri ci sono delle cavità e delle cisterne in tufo di epoca romana che in alcun modo potevano essere interessate dalle chiodature.

Il terreno piroclastico, caratterizzato mediante prove di laboratorio fisico meccaniche, ha un peso dell'unità di 15 kN/m^3 , un valore dell'angolo di attrito ϕ pari a 30° ed un valore di coesione di 10 kPa, che si annulla per imbibizione.

Tale terreno è stato trattato con la tecnica di miscelazione profonda del terreno, FDM, che deriva in parte dalla tecnica tradizionale DMM (Papa et al.2011a e b); i valori di resistenza a compressione uni assiale, sono in accordo con la sperimentazione eseguita su terreni piroclastici, e variabili tra $8.7 \div 10.6 \text{ MPa}$ (v. figura 2).

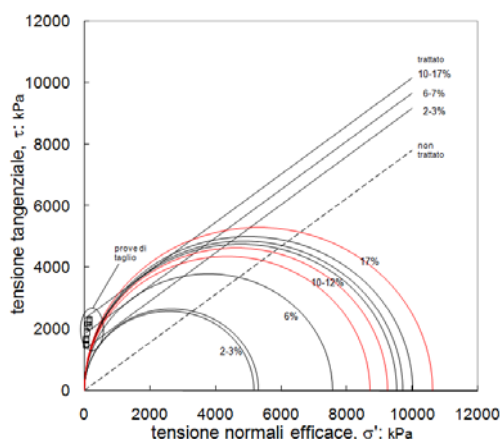


Figura 2- Resistenza a taglio per terreni pozzolani trattati con FDM (Papa et al.2011 modificato): in rosso i cerchi a rottura delle tre prove monoassiali eseguite per i terreni di Ventotene.

La prova di sfilamento, a carico controllato, è stata eseguita su una barra in acciaio FeB450c $\Phi 32$, cementata in un foro di diametro pari a 70 mm avente una lunghezza di 1.4 metri.

Su questa barra, è stata eseguita una prova di sfilamento, per la verifica della resistenza a

taglio offerta dal terreno trattato con *deep mixing* in condizioni di esercizio; la prova non è stata portata a rottura ma è stata raggiunta solo la sollecitazione in esercizio per cui erano stati dimensionati i chiodi.

3. Risultati della prove di sfilamento

Come già detto in precedenza il chiodo ad Ischia è stato cementato nella piroclastite ad una profondità di circa 6 metri, mentre per il caso di Ventotene il chiodo è stato realizzato nel terreno trattato con *deep-mixing*. I risultati in termini di tensione tangenziale media mobilitata all'interfaccia q_s , definita come:

$$q_s = \frac{T}{\pi DL} \quad (1)$$

dove T è la massima sollecitazione di trazione (v. tabella I), L e D sono rispettivamente la lunghezza del chiodo ed il diametro della perforazione, sono riportati in figura 3.

Sito	D (mm)	L (m)	T (kN)
Ischia	70	5.0	240
Ventotene	70	1.4	135

Tabella I – Sollecitazione di trazione massimo applicato ai chiodi

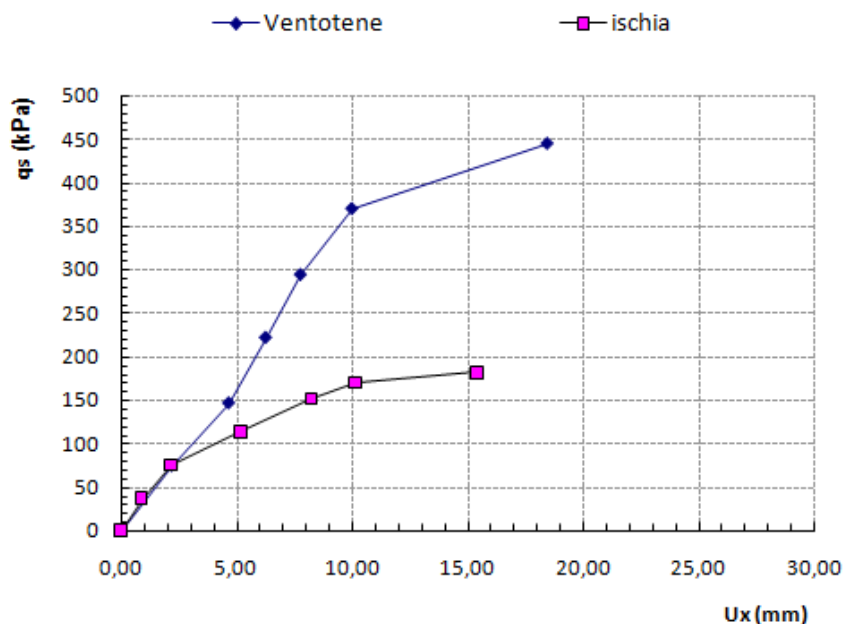


Figura 3 - Risultati delle prove di sfilamento eseguite in sito

Esprimendo il valore della tensione tangenziale media mobilitata all'interfaccia τ come:

$$\tau = \sigma'_v \tan \delta + c \quad (2)$$

si possono stimare le caratteristiche dell'interfaccia, considerata quale la superficie di contatto tra il chiodo (cementato) ed il terreno circostante (naturale o trattato), in termini di resistenza attritiva ($\tan\delta$) e di coesione c . Nell'ipotesi che:

$$\tan \delta = \tan \varphi \quad (3)$$

i valori della coesione stimata all'interfaccia sono riportati in tabella II.

Prove	σ_v (kPa)	$\varphi=\delta$	L (m)	T_{exe} (kN)	τ_{ult} (kPa)	c (kPa)
Ischia	87	30°	6	240	182	132
Ventotene	40	32°	1.4	135	439	414

Tabella II – Risultati delle prove di sfilamento in sito

4. Osservazioni sul comportamento in esercizio

Come anticipato nel paragrafo 2.2, la prova di sfilamento eseguita nel sito di Ischia, ha portato a rottura l'interfaccia chiodo - terreno; la resistenza al taglio ultima mobilitata all'interfaccia è risultata pari a circa 180kPa (v. tabella II).

La prova eseguita sul chiodo installato nel sito di Ventotene, trattandosi di una prova di collaudo, ha permesso invece di sollecitare il chiodo fino ad un valore di 1.5 volte la forza di esercizio per cui era stato dimensionato; per queste condizioni di carico, il valore della resistenza al taglio all'interfaccia mobilitata raggiunge valori prossimi a 440kPa.

La prima evidenza sperimentale è che per un rinforzo cementato a gravità, anche in un terreno piroclastico in cui si considera la condizione di totale saturazione, come nel caso di Ischia, all'interfaccia terreno – rinforzo si mobilita per effetto della cementazione un'aliquota di resistenza coesiva notevole; pertanto ai fini progettuali appare troppo cautelativo non considerare tale aliquota resistiva.

In termini di aliquota di resistenza coesiva, ricavata dall'eq.(2), il valore della coesione per il terreno trattato con FDM è 3 volte superiore rispetto a quello non trattato.

Si ritiene doveroso osservare che per terreni così trattati, le prove di laboratorio mostrano un incremento in termini di coesione, nella resistenza al taglio, variabile tra 1.5÷2.5MPa in funzione della percentuale di pasta di cemento utilizzata nel trattamento.

Trattandosi di un trattamento colonnare discontinuo, per tenere conto della spaziatura tra le colonne di terreno trattato, nella pratica si stimano i parametri di resistenza equivalenti (medi pesati sulle aree) in termini di angolo di attrito e di coesione per 1 m² di terreno trattato; la resistenza equivalente sarà costì funzione del diametro della colonna, della spaziatura oltre che della tipologia di trattamento.

Nel sito di Ventotene è stata realizzata una geometria di trattamento di 4 colonne $\varphi 400$ ogni m²; pertanto i valori di resistenza equivalente del terreno trattato sono risultati pari a $\varphi_{eq}=32^\circ$ e $c_{eq}=756\text{kPa}$.

La resistenza all'interfaccia rinforzo - terreno, per terreni coesivi può essere espressa come:

$$q_s = \alpha c \quad (4)$$

trascurando dunque il contributo resistente attritivo (Ostermayer, 1975).

Nel nostro caso, considerando la coesione equivalente calcolata in funzione del tipo di trattamento $c_{eq}=756\text{kPa}$, e utilizzando un coefficiente $\alpha=0.8$, valore minimo indicato in letteratura per i chiodi cementati che tiene conto della possibilità che la cementazione non sia stata ben eseguita (Jewell,1990), la resistenza massima al taglio mobilitata all'interfaccia risultava pari a 605kPa .

Dai risultati ottenuti dalle prove in sito è possibile ricavare una stima di prima approssimazione del coefficiente α per rinforzi cementati in terreni trattati con FDM con geometria e caratteristiche innanzi indicate:

$$\alpha = \frac{q_s}{c_{eq}} = 0.7 \quad (5)$$

che tiene conto della discontinuità del trattamento.

5. Conclusioni e sviluppi futuri

Questi primi dati relativi a elementi di rinforzo utilizzati in terreni cementati hanno permesso di evidenziare l'utilità, nella progettazione di interventi di consolidamento con chiodi passivi, di eseguire prove di sfilamento per definire l'effettivo contributo resistente dell'interfaccia e dunque ottimizzare in fase di progettazione.

Facendo prove con diverse geometrie del trattamento si ha in animo di verificare l'andamento del coefficiente α in funzione proprio di tali geometria.

Bibliografia

- Chu, L.M., and Yin, J.H. 2005. *A laboratory device to test the pull-out behavior of soil nails*. Geotechnical Test. J., Vol.28, No.5, pp. 1-15.
- Di Fonzo G., Flora A., Lirer S., 2011. *Interventi di consolidamento dei terreni: tecnologie e scelte di progetto*. Relazione Generale. Atti XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica. Napoli, 2011.
- Di Fonzo, G. (2008). *Analisi sperimentale e numerica del comportamento meccanico di chiodi infissi in una pozzolana non satura*. Ph.D Thesis.
- Flora A., Lirer S., 2011. *Studio sperimentale dei meccanismi di interazione terreno – rinforzo durante le prove di sfilamento*. Atti XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica. Napoli, 2011.
- Jewell, R.A. (1990). *Review of theoretical models for soil nailing*. Proc. Int. Reinforced Soil Conf. A. McGrown, K. Yeo, and K.Z. Andrawes, eds., Glasgow, U.K., pp.265-275.
- Junaideen, S.M., Tham, L.G., Law, K.T., Lee, C.F. and Yue, Z.Q. 2004. *Laboratory study of soil-nail interaction in loose completely decomposed granite*. Can.Geotech.J., 41(2), 274-286.
- Ostermayer, H. 1975. *Construction, carrying behavior and creep characteristics of ground anchors*. Conf. of Diaphragm walls and Anchorages. London. Sept.74, The Institution of Civil Engineers, pp. 141- 151.
- Papa R. and Ramondini M., 2011 a. *Il consolidamento dei terreni mediante fast deep mixing*. Atti XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica.. Napoli, 2011.
- Papa R. and Ramondini M., 2011b. *Il consolidamento dei terreni mediante fast deep mixing*. Incontro Annuale Ricercatori di Geotecnica.Torino,4-6 luglio 2011.