

INFLUENZA DEL PROCEDIMENTO DI CEMENTAZIONE DEI TUBI INCLINOMETRICI SULLE MISURE

Simeoni L., Bosco G.

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Università degli Studi di Trento.

SOMMARIO

Si descrivono alcuni casi di impiego delle misure inclinometriche per lo studio dei cinematismi di frana in tre pendii naturali con diversa morfologia e caratterizzati da una copertura quasi sempre in moto su un substrato roccioso. Gli inclinometri analizzati sono stati cementati con procedimenti diversi in funzione delle caratteristiche dei terreni attraversati: metodo tradizionale di iniezione di boiaccia di cemento in risalita dal fondo foro; riempimento dall'alto con ghiaia miscelata a cemento; iniezioni successive di boiaccia di cemento e riempimento dall'alto con ghiaia. Per i tre pendii si dispone anche di rilievi topografici per cui è possibile valutare l'affidabilità delle misure inclinometriche confrontandole pure con gli spostamenti di superficie. Dall'analisi delle misure inclinometriche è possibile esprimere una valutazione sull'efficacia dei procedimenti di cementazione utilizzati ed individuare i procedimenti di cementazione più idonei in dipendenza delle specifiche situazioni geotecniche e finalità delle misure.

Parole chiave: inclinometro, frana, cementazione, spostamenti.

1 INTRODUZIONE

Le misure inclinometriche sono utilizzate con crescente frequenza nella determinazione e controllo di spostamenti orizzontali dei sistemi geotecnici. A partire dai primi esempi di impiego, dedicati al controllo della stabilità dei pendii, la tecnica si è diffusa in altri campi, ad esempio il controllo di opere di sostegno, per studiare l'interazione fra la struttura ed i terreni a tergo, il controllo di manufatti e terreni sotto l'avanzamento di uno scavo sotterraneo, la verifica di verticalità di elementi strutturali, ed in generale laddove interessi l'interazione fra le opere ed i terreni in presenza di spostamenti orizzontali (Dunnicliff J., 1993).

Di conseguenza, nel corso degli anni sono aumentate le applicazioni e sono stati sviluppati nuovi strumenti, anche sotto la spinta delle continue innovazioni elettroniche ed informatiche. Al confronto sono stati trascurati, invece, molti aspetti strettamente esecutivi, sebbene di rilievo per l'affidabilità delle misure e, quindi, per il processo di interpretazione del fenomeno in esame.

Ad esempio, merita tuttora specifica attenzione la scelta del tipo e delle modalità esecutive del riempimento, che è utilizzato per rendere il tubo inclinometrico solidale al terreno. In dipendenza delle caratteristiche di tale

riempimento può modificarsi la risposta del mezzo circostante, che può risultare irrigidito ovvero indebolito. Nei due casi, la misura inclinometrica non rappresenta puntualmente il comportamento del sistema geotecnico.

Con riferimento a questo aspetto, nel contributo si descrivono tre applicazioni dei rilievi inclinometrici per il controllo degli spostamenti dei pendii. L'attenzione si concentra sugli effetti che la cementazione del tubo inclinometrico potrebbe avere sulle misure. Tenendo conto delle caratteristiche dei terreni attraversati dagli inclinometri e dei dati di rilievi topografici, è possibile sviluppare utili considerazioni sull'affidabilità delle misure, quindi sul procedimento esecutivo impiegato per la cementazione. Le misure sono state eseguite con la stessa sonda SisGeo S232SV30, avente un passo tra i carrelli delle rotelle di 500 mm, ma in tubi installati con differenti tipi di cementazione in funzione delle caratteristiche dei terreni attraversati.

2 STRUMENTAZIONE E MISURE

L'inclinometro è certamente lo strumento più largamente utilizzato per l'individuazione dei movimenti

di un deposito di terreno ed, in particolare, per il rilievo degli spostamenti orizzontali in un numero discreto di punti ubicati a differenti profondità. L'inclinometro si compone di un tubo inclinometrico, che viene installato mediante cementazione in un foro verticale, e di una sonda inclinometrica, che viene fatta scorrere entro il tubo. Il tubo ha una sezione trasversale circolare con quattro scanalature longitudinali, dette guide, poste a 90°. All'interno delle guide scorrono le rotelle della sonda che sono montate su due carrelli distanziati generalmente di 500 mm. Tale distanza prende il nome di passo. La sonda è comunemente attrezzata con due sensori che agiscono su due piani, A e B, tra loro perpendicolari e che forniscono un segnale elettrico proporzionale al seno dell'angolo di inclinazione della sonda rispetto alla verticale. Il piano A è il piano contenente le rotelle, il piano B quello ad esso perpendicolare.

Mediante semplici relazioni trigonometriche, è possibile calcolare, ad ogni profondità di misura, lo scostamento del carrello superiore rispetto alla verticale passante per il carrello inferiore. La ripetizione di queste misure ad intervalli di profondità pari al passo consente di ricostruire il profilo del tubo inclinometrico. Dalla ripetizione delle misure in tempi diversi è possibile calcolare la variazione del profilo, che si fa corrispondere agli spostamenti orizzontali del terreno (Simeoni L. e Mongiovi L., 2007).

Le misure inclinometriche sono affette da errori accidentali e sistematici (Mikkelsen P.E., 2003; Simeoni L., 2006) ed occasionalmente possono includere errori grossolani. Tra gli errori sistematici, il più rilevante è l'errore di scostamento dallo zero, che generalmente è eliminato elaborando coppie di misure eseguite nelle guide diametralmente opposte. Tuttavia, anche eseguendo tale operazione, può permanere un errore sistematico residuo, che è riconoscibile ed eliminabile annullando gli spostamenti nel tratto di tubo installato nella porzione di terreno ritenuta stabile (Pincen B. e Blondeau F., 1978). Se invece l'errore sistematico non è rimosso, esso si amplifica con il numero di passi durante il calcolo dello spostamento integrale dalla base del tubo al piano di campagna (Mikkelsen P.E., 2003).

L'affidabilità delle misure inclinometriche dipende perciò da entrambe le sue componenti principali: il tubo e la sonda. Per mezzo della cementazione, il tubo deve essere solidale al terreno circostante e deve alterare meno possibile lo stato deformativo del terreno. In altre parole, l'inclinometro deve essere altamente conforme. Le caratteristiche della sonda devono garantire che gli errori sistematici ed accidentali siano di entità più piccola possibile. È buona prassi verificare l'affidabilità delle misure rendendo ridondante il sistema di misura e verificando la coerenza con altre misure che descrivono lo stesso fenomeno geotecnico (Simeoni et al., 2008).

3 CASI STUDIO

Si analizzano le misure inclinometriche di sette inclinometri installati in tre differenti pendii ubicati nelle

province di Bolzano e Trento (Figura 1): 1. il pendio interagente con la galleria Castelrotto dell'Autostrada A22; 2. il pendio interagente con il viadotto Micheletti dell'Autostrada A22; 3. il pendio interagente con un fabbricato ad uso di civile abitazione in località Ponte Arche del comune di Lomaso (TN). Il riempimento dei sette inclinometri è stato eseguito in tre differenti modi: con il metodo tradizionale di iniezione di boiaccia di cemento in risalita dal fondo foro; mediante riempimento dall'alto con ghiaia miscelata a cemento; mediante successive iniezioni di boiaccia di cemento e riempimento dall'alto con ghiaia.

Di seguito si descrivono le condizioni di stabilità dei tre pendii e le modalità di installazione degli inclinometri di cui successivamente si analizzano le misure.



Figura 1. Ubicazione dei siti dei tre casi studio. 1: pendio interagente con la galleria Castelrotto dell'Autostrada A22; 2: pendio interagente con il viadotto Micheletti dell'Autostrada A22; 3: pendio interagente con un fabbricato ad uso di civile abitazione.

3.1 Pendio Castelrotto

Tra il km 64+500 e il km 65+500 dell'Autostrada del Brennero in provincia di Bolzano, 2,5 milioni di metri cubi di terreno si muovono con una velocità media di 1 cm/anno. Essi sono costituiti da detriti di tufo ed ignimbrite immersi in una matrice limoso argillosa (Simeoni L. e Mongiovi L., 2007).

Dal 1997, il pendio è monitorato periodicamente mediante misure inclinometriche manuali e dal 2001 è in funzione un sistema automatico di misura con sette inclinometri fissi, le cui sonde sono ubicate in corrispondenza della superficie di scivolamento (profondità variabile da 23 m al piede a 63 m a monte), negli stessi fori in cui si eseguono le misure manuali. Nel 2004, il sistema di misura con gli inclinometri è stato reso

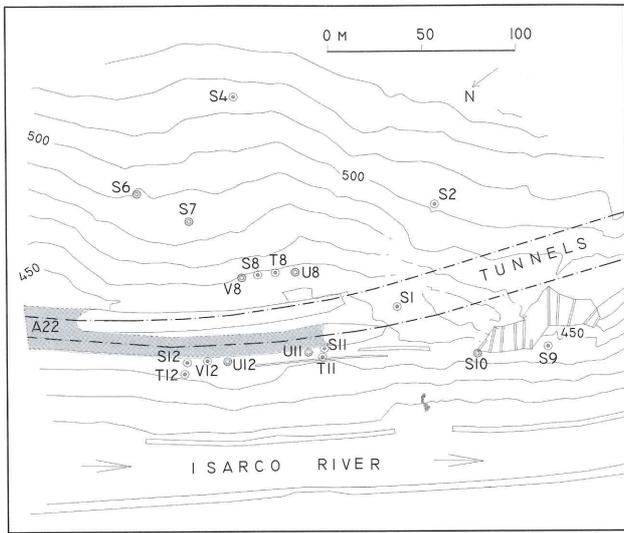


Figura 2. Ubicazione dei fori di sondaggio nel pendio interagente con la galleria Castelrotto dell'Autostrada A22.

ridondante mediante misure topografiche con Stazione Totale (Simeoni L. e Benciolini G.B., 2007).

Gli inclinometri installati nel 1997 sono indicati in Figura 2 con le sigle S1, S2, S4, S8, S9, S11 e S12. Nel 2001 gli inclinometri S8, S11 e S12 non erano più utilizzabili a causa delle elevate deformazioni raggiunte in corrispondenza della superficie di scivolamento e sono stati sostituiti con i nuovi inclinometri T8, T11 e T12. Successivamente nell'inclinometro T12 non sono stati

rilevati spostamenti in corrispondenza dell'attesa superficie di scivolamento e pertanto nel 2004 è stato sostituito con il nuovo inclinometro V12.

Il substrato stabile, posto al di sotto della superficie di scivolamento, è generalmente costituito da tufo, da moderatamente a poco fessurato. Fa eccezione la porzione di piede del pendio, in corrispondenza degli inclinometri S11, T11, S12, T12 e V12, dove il terreno in movimento scorre su un deposito di terreni alluvionali con granulometria variabile dalle sabbie limose ai blocchi.

Gli inclinometri denominati con la lettera "S" e quelli con la lettera "T" sono stati installati mediante iniezione di boiacca dal fondo foro, senza la supervisione degli autori; l'inclinometro V12, profondo 40 m, è stato installato mediante riempimento dall'alto con ghiaia miscelata a secco a cemento. Infatti, inizialmente il riempimento è stato eseguito con boiacca di cemento, che però si è completamente dispersa attraverso le fessure e cavità presenti nel deposito alluvionale. Si è quindi optato per l'utilizzo di sabbia e ghiaia, mescolata con cemento. Da 40 a 24 m di profondità è stata utilizzata sabbia grossolana, molta della quale è andata a riempire le cavità della roccia. Infatti, a 24 m, anziché riempire il foro, tutta la sabbia veniva persa nelle cavità. Per questo si è deciso di utilizzare materiale più grossolano. Da 24 a 3 m il foro è stato riempito con ghiaia a pezzatura compresa tra 5 e 8 mm. Gli ultimi 3 m sono stati riempiti gettando prima un po' di boiacca di cemento sul ghiaino e poi riempiendo il foro con calcestruzzo fine. Durante l'installazione il foro era asciutto.

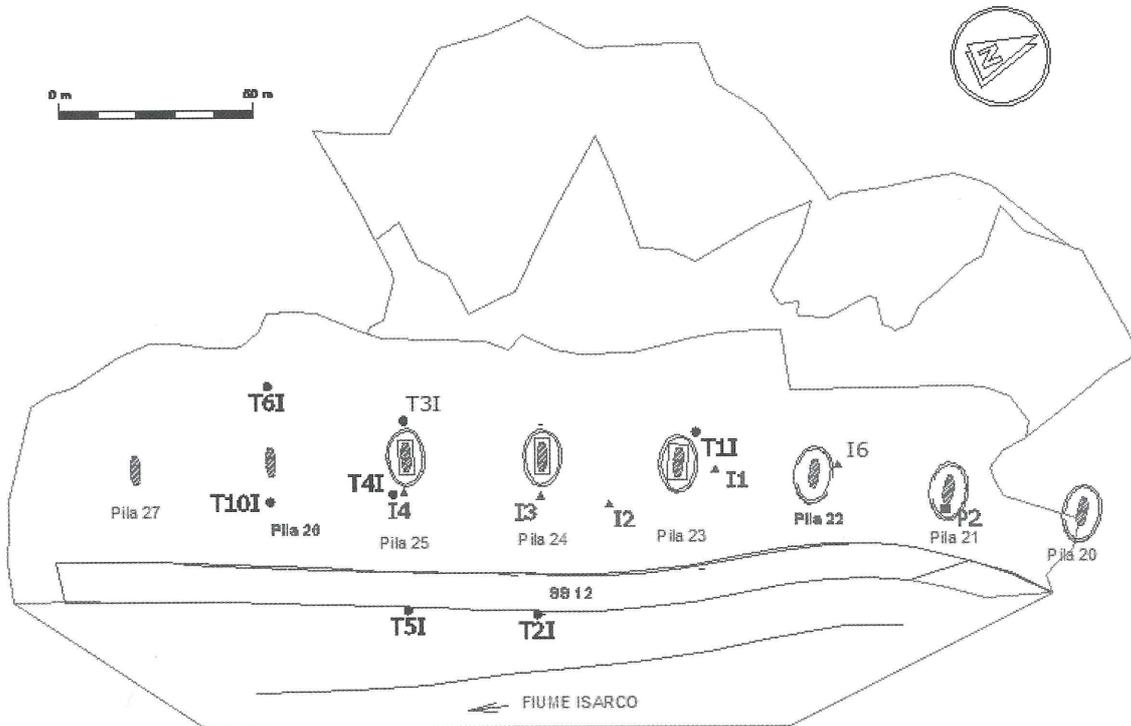


Figura 3. Ubicazione degli inclinometri installati nel pendio interagente con il viadotto Micheletti dell'Autostrada A22. Gli inclinometri "I" sono stati installati nel 1993; gli inclinometri "T" nel 2009.

3.2 Pendio Micheletti

Dal 1988 la Società Autostrada del Brennero esegue il monitoraggio degli spostamenti delle pile 21, 22, 23, 24, 25 e 26 del viadotto Micheletti 2, situate nel tratto compreso tra le progressive 70+680 e 70+990 dell'Autostrada del Brennero (Figura 3). Il monitoraggio è stato effettuato con differenti tecniche topografiche; dal 2004 è eseguito mediante Stazione Totale posizionata su due capisaldi installati sul versante opposto. Le pile hanno una fondazione su plinti ed i fusti, alti circa 35 m, sono isolati dal terreno circostante mediante pozzi alti circa 10 m.

Le misure topografiche evidenziano uno spostamento della base delle pile verso valle ed una rotazione delle stesse verso monte, con la conseguenza che lo spostamento dell'impalcato del viadotto è di piccolissima entità, se non addirittura trascurabile. La velocità massima di spostamento della base delle pile si ha in corrispondenza della pila 24 ed è di circa 1 cm/anno (Tombolato et al., 2009). Dal 1993 si eseguono misure negli inclinometri installati in prossimità delle pile e sul bordo della strada statale al piede del pendio. Gli inclinometri indicati in Figura 3 con la lettera "I" sono stati installati nel 1993 mediante iniezione di boiaccia da fondo foro, senza la supervisione degli autori; gli altri, indicati con la lettera "T", sono stati installati nel 2009 in presenza degli autori. L'inclinometro T4I è stato eseguito in prossimità del precedente inclinometro I4, che non era più ispezionabile. Le misure inclinometriche hanno consentito l'individuazione di una superficie di scivolamento alla profondità di 3-4 m sotto le basi dei plinti di tutte le pile. Nelle pile 22, 23 e 24 è stato riconosciuto anche uno scivolamento in corrispondenza della base e localmente sono stati riconosciuti spostamenti in corrispondenza dei pozzi.

Il volume in movimento è costituito da terreno sciolto di deposito di falda ed alluvionale. Generalmente sono sabbie con ghiaia limose o debolmente limose, contenenti occasionalmente blocchi di roccia. Il substrato è costituito da ignimbriti da molto a poco fessurate. Tutti gli inclinometri raggiungono il substrato roccioso fessurato e durante l'installazione degli inclinometri "T" è risultato difficile riempire il foro con la boiaccia di cemento a causa dell'elevata permeabilità dell'ammasso roccioso. Per questo motivo si è proceduto nel seguente modo. Il tubo inclinometrico è stato calato in foro con due canne di iniezione: una con l'estremità a fondo foro ed una a circa metà tubo o, comunque, al di sopra del tetto del substrato roccioso. Dalla canna profonda è stata inizialmente eseguita l'iniezione di boiaccia. In alcuni casi la miscela è momentaneamente risalita fino al piano di campagna per poi disperdersi tra le fessure dell'ammasso roccioso. Quindi si è proceduto alzando il rivestimento e gettando dall'alto il ghiaio e poi altra boiaccia, utilizzando la cannetta d'iniezione più superficiale o quando intasata iniettando direttamente dall'alto. Questa stessa operazione è stata ripetuta più volte fino a raggiungere il piano di campagna.

3.3 Pendio Ponte Arche

Nel febbraio 2008, una porzione del pendio in sponda destra del Fiume Sarche, a monte della S.S. 337 del Caffaro in località Ponte Arche, nel Comune di Lomaso, è stata interessata da un dissesto. Il movimento, che si è sviluppato nel corso di alcuni giorni, in occasione di prolungate ed intense precipitazioni, ha coinvolto la coltre superficiale a monte di un edificio in fase di costruzione. Il dissesto si è manifestato, dapprima, con la formazione di fratture e gradini sul piano di campagna, visibili su una superficie di 600 m² circa, estesa lungo un fronte di 125 m circa. In seguito, si verificarono locali scivolamenti e colamenti dei terreni fini di copertura, costituiti da limi argillosi e sabbiosi e caratterizzati da spessori massimi di 4-6 m circa. Questa coltre ricopre una formazione di marne calcaree, che affiora sul letto del fiume (Figura 4).

A valle dell'area di frana, il profilo originario era stato inciso con una paratia di micropali tirantati (autunno 2006), in modo da ricavare l'area di imposta della platea. La struttura ha una parete piena lato terra, discosta da tale paratia, un livello parcheggi sotto il piano stradale e due a

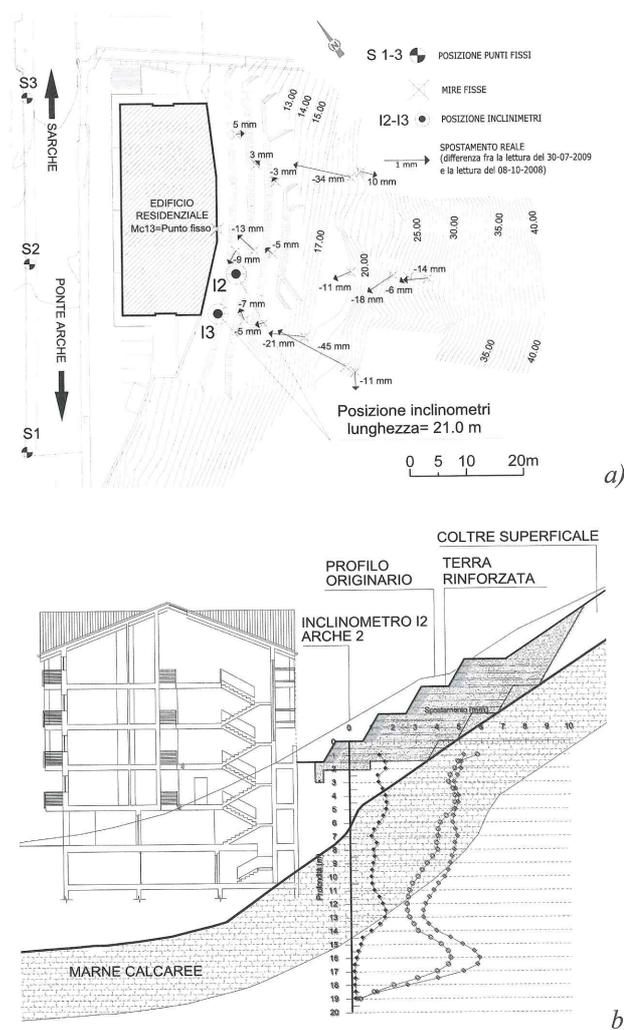


Figura 4. Pendio Ponte Arche. a) Planimetria post operam con indicazione dei tubi inclinometrici e delle mire per rilievo topografico; b) sezione passante per l'inclinometro I2.

luce solo lungo la S.S. ed il Fiume Sarca. All'atto della frana le strutture erano ultimate, eccetto la copertura lignea, ed era in corso la divisione degli ambienti. A causa dei colamenti, ampi volumi dei terreni superficiali hanno riempito parte dello spazio fra la paratia e la struttura.

Per controllare l'evoluzione del dissesto ed anche per verificare l'efficacia degli interventi di stabilizzazione in programma, sono stati installati due inclinometri, I1 (Arche 1 ed Arche 3; aprile 2008) e I2 (Arche 2; agosto 2008), entrambi lunghi 20 m. I fori attraversano la coltre, per spessori compresi fra 7 m (I1) e 5 m (I2) circa, e si immorsano nella formazione di marne calcaree.

Gli interventi per bloccare i movimenti hanno compreso la perforazione di dreni suborizzontali dagli ambienti al livello strada, la rimozione di ampi volumi della coltre, sostituiti con terreni granulari rinforzati, la realizzazione di trincee drenanti lungo il pendio ed al piede.

In seguito a tali lavori è stato necessario asportare la sommità del tubo I1, per tale motivo denominato I3. Il tubo I2 è stato installato al piede del pendio, sulla berma di valle della terra rinforzata, che è attraversata insieme al sottostante dreno per uno spessore di 1.5 m circa.

Dopo l'esecuzione degli interventi, gli spostamenti del piano di campagna misurati con i rilievi topografici sono risultati molto piccoli e dell'ordine del millimetro.

4 ESECUZIONE ED ELABORAZIONE DELLE MISURE INCLINOMETRICHE

Le misure inclinometriche sono state sempre eseguite dal basso nelle guide A1 e A3, ad intervalli di 50 cm, pari al passo della sonda. Negli inclinometri T4I, Arche2 e Arche3 le misure sono state eseguite su tutte e quattro le guide, vale a dire anche nelle guide A2 e A4. Le misure sono state elaborate nel modo convenzionale (Simeoni L. e Mongiovì L., 2007), rigettando i rilievi per i quali le semisomme di controllo sono risultate errate. Le misure sulle quattro guide, laddove disponibili, sono state elaborate in quattro differenti modi: modo 13, misure A1-A3, B1-B3 di sonda biassiale (modo convenzionale); modo 24, misure A2-A4, B2-B4 di sonda biassiale; modo AA, misure A1-A3, A2-A4 di sonda monoassiale; modo BB, misure B1-B3, B2-B4 di sonda monoassiale. Per esigenze di brevità, in questo lavoro si riportano i risultati rappresentati soltanto in termini di spostamenti integrali calcolati dalla base di ciascun tubo inclinometrico. La bidimensionalità degli spostamenti è riportata in termini di modulo e azimuth rispetto al Nord magnetico (Cooper M.R., 2000).

5 SPOSTAMENTI INCLINOMETRICI

5.1 Inclinometri S12, T12 e V12

In Figura 5 sono riportati gli spostamenti integrali calcolati in modo convenzionale per gli inclinometri S12, T12 e V12. Gli spostamenti dell'inclinometro S12 si riferiscono all'intervallo di tempo agosto 1997-novembre

2000, quelli del T12 a dicembre 2000-aprile 2004, quelli del V12 a luglio 2004-ottobre 2006. L'elaborazione delle misure dell'inclinometro S12 evidenzia chiaramente una superficie di scivolamento alla profondità di circa 24 m con spostamenti nella direzione di circa 40° anteriori rispetto al Nord. L'azimuth degli spostamenti è coerente con la direzione di immersione del pendio, è confermata dalla direzione degli spostamenti rilevati negli altri tubi inclinometrici e successivamente dalla direzione degli spostamenti topografici. Gli spostamenti calcolati con le misure dell'inclinometro T12 presentano un andamento irregolare sia in termini di modulo sia, seppur in misura minore, di azimuth. Tale andamento è chiaramente incoerente con il cinematismo in atto nel pendio giacché non permette di individuare la superficie di scivolamento. Si osserva inoltre che l'andamento irregolare degli spostamenti non è in relazione con la posizione dei giunti del tubo inclinometrico, indicati in grafico mediante i simboli riportati ad intervalli di 3 m dalla base del tubo. Anche gli spostamenti dell'inclinometro V12 non evidenziano la superficie di scivolamento. In questo caso l'andamento degli spostamenti è più regolare, con modulo pressoché crescente dalla base del tubo ed azimuth di circa 5° anteriori.

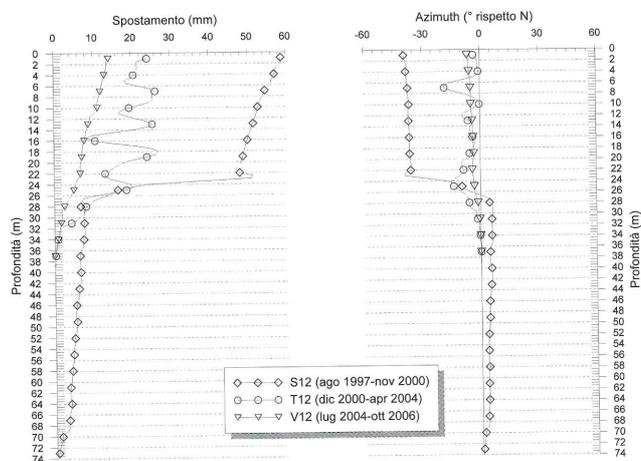


Figura 5. Spostamenti integrali degli inclinometri S12, T12 e V12 nel pendio Castelrotto. Elaborazione delle misure con il metodo convenzionale.

5.2 Inclinometri I4 e T4I

In Figura 6 sono riportati gli spostamenti integrali calcolati per gli inclinometri I4 e T4I, rispettivamente per un periodo di 5 mesi e di 5 mesi e mezzo.

Dall'elaborazione di tutte le misure di spostamento si riconosce che la velocità media di spostamento del pendio è rimasta inalterata dal 1993, quando è iniziato il monitoraggio (Tombolato et al., 2009). Di conseguenza gli spostamenti misurati con i due inclinometri dovrebbero essere praticamente uguali. Nei grafici di Figura 6 si nota, invece, che nell'inclinometro T4I sono evidenti spostamenti intorno a 18 m e intorno a 7 m di profondità, mentre per l'inclinometro I4 questo non è chiaramente

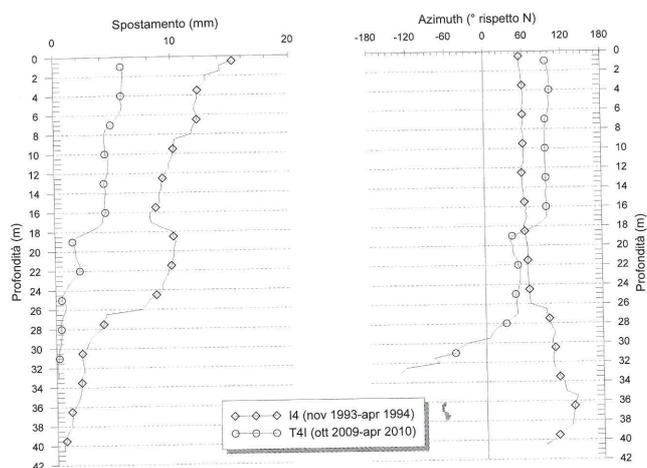


Figura 6. Spostamenti integrali degli inclinometri I4 e T4I nel pendio Micheletti. Elaborazione delle misure con il metodo convenzionale.

definito.

Nell'inclinometro T4I le misure sono state eseguite su tutte e quattro le guide e sono state elaborate nei quattro modi precedentemente descritti. In Figura 7 sono riportati i grafici degli spostamenti integrali determinati con i quattro metodi.

Si osserva che, indipendentemente dal metodo, sono evidenti le localizzazioni degli spostamenti alle due profondità, ma cambiano i moduli e gli azimuth degli spostamenti integrati fino al piano di campagna. Tale discrepanza deriva dalla propagazione di errori sistematici che non è stato possibile eliminare perché non sono risultati riconducibili alle tipologie individuate da Mikkelsen (2003).

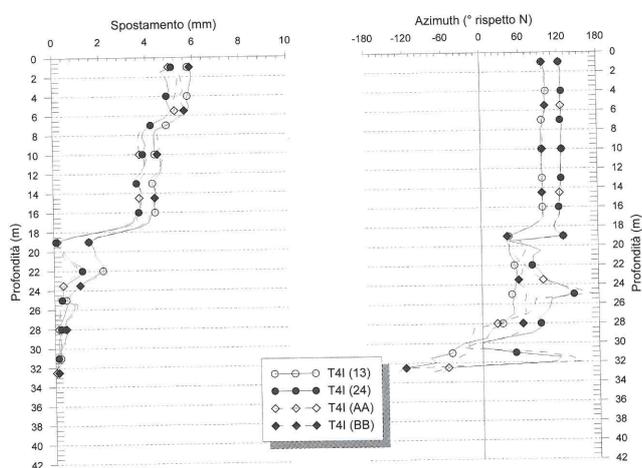


Figura 7. Spostamenti integrali dell'inclinometro T4I nel pendio Micheletti elaborati con i quattro metodi.

In questi casi si suggerisce di integrare gli spostamenti soltanto negli intervalli di profondità in cui questi si localizzano, perché in tal modo l'effetto dell'errore sistematico è meno importante. Ad esempio, per la localizzazione più profonda riportata in Figura 7, gli

spostamenti integrati nell'intervallo di profondità 17.0÷18.5 m con i quattro modi di sonda biassiale e monoassiale differiscono al massimo di 0.1 mm in modulo e 4° in azimuth (Tabella 1). Tali differenze sono confrontabili con i valori di precisione degli spostamenti.

Tabella 1. Spostamenti integrati nell'intervallo 17.0-18.5 m nell'inclinometro T4I

Misure elaborate	Modulo (mm)	Azimuth (°N)
A1-A3, B1-B3 (13)	3.4	116
A2-A4, B2-B4 (24)	3.3	119
A1-A3, A2-A4 (AA)	3.4	120
B1-B3, B2-B4 (BB)	3.3	116

5.3 Inclinometro Arche2

La Figura 8 riporta i grafici degli spostamenti integrali calcolati nell'inclinometro Arche2 da marzo 2009 a giugno 2010. Come per l'inclinometro T4I, tutti i quattro modi di elaborazione forniscono lo stesso andamento degli spostamenti, con differenze di meno di due millimetri nel modulo al piano di campagna e di oltre 20° nell'azimuth. Anche in questo caso si può perciò ipotizzare la propagazione di un errore sistematico durante il processo di integrazione, che tuttavia non inficia la distribuzione degli spostamenti. È però inverosimile che lo spostamento massimo si localizzi proprio alla base del tubo inclinometrico fondata nel substrato roccioso ed è curioso che tale spostamento coinvolga esattamente lo spezzone di tubo di 3 m.

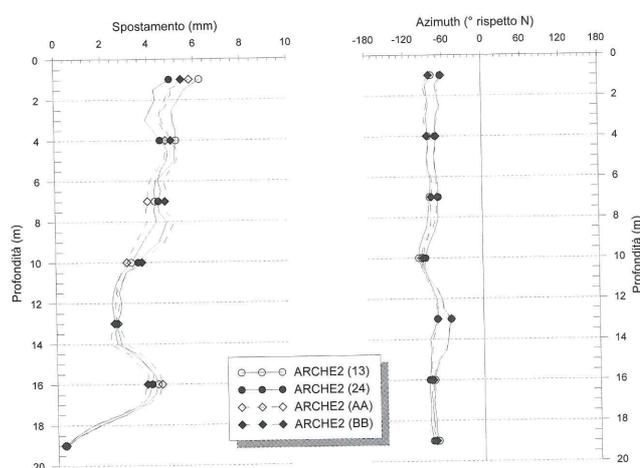


Figura 8. Spostamenti integrali dell'inclinometro Arche2 elaborati con i quattro metodi.

5.4 Inclinometro Arche3

La Figura 9 riporta i grafici degli spostamenti integrali calcolati nell'inclinometro Arche3 da marzo 2009 a

giugno 2010. A differenza dell'inclinometro Arche2, i quattro modi di elaborazione forniscono andamenti diversi degli spostamenti, sia in termini di modulo che di azimuth. In questo caso perciò non è possibile individuare un andamento certo degli spostamenti che, comunque, non evidenzia una localizzazione in un preciso intervallo di profondità.

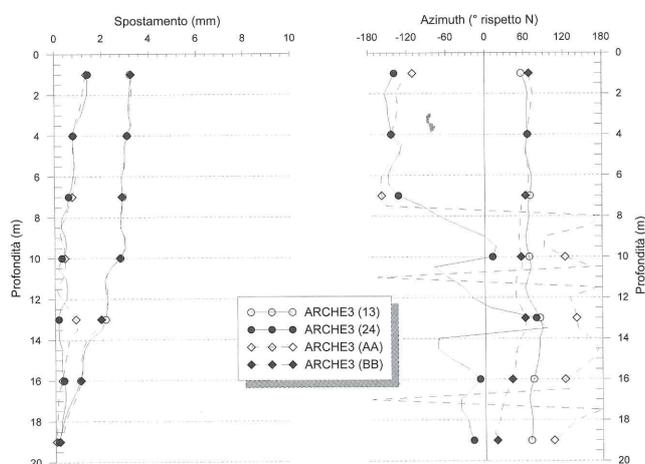


Figura 9. Spostamenti integrali dell'inclinometro Arche3 elaborati con i quattro metodi.

6 INTERPRETAZIONE E CONCLUSIONI

Gli esempi di spostamenti inclinometrici descritti in questo lavoro prendono in considerazione tubi che sono stati resi solidali al terreno circostante in tre differenti modi: con il metodo tradizionale di iniezione di boiaccia di cemento in risalita dal fondo foro (tubi S12, T12, I4, Arche 2 e Arche 3); a secco mediante riempimento dall'alto con ghiaia miscelata a cemento (tubo V12); mediante successive iniezioni di boiaccia di cemento e riempimento dall'alto con ghiaia (tubo T4I). In tutti i casi i tubi sono stati fondati in un substrato stabile, di roccia o deposito alluvionale, che possiede una discreta permeabilità e, di conseguenza, favorisce la dispersione della miscela iniettata.

Il tipo di cementazione, più che le caratteristiche meccaniche del tubo inclinometrico, definisce la conformità dell'inclinometro, vale a dire la capacità dello strumento di rilevare gli spostamenti che realmente avvengono nel terreno. A tale scopo è fondamentale che il riempimento sia continuo lungo tutta la lunghezza del tubo (non deve contenere cavità) e il materiale di cementazione possieda caratteristiche di rigidità il più possibile analoghe a quelle del terreno circostante. Una maggiore conformità si traduce in una riduzione del tempo trascorso affinché lo strumento sia in grado di descrivere il reale cinematisma in atto nel pendio.

Sulla base delle succitate considerazioni e con riferimento agli esempi descritti, si possono fare i seguenti commenti.

Due dei quattro tubi inclinometrici cementati mediante iniezione di boiaccia da fondo foro presentano un

andamento degli spostamenti integrali piuttosto irregolare sia con riferimento al modulo sia all'azimuth (inclinometri T12 e Arche2). Tale andamento può essere spiegato ammettendo che il riempimento non sia continuo, ma presenti alcune cavità che attribuiscono al tubo maggiori gradi di libertà di deformazione. L'effetto può essere amplificato quando la disomogeneità della cementazione trova corrispondenza con la distribuzione dei giunti degli spezzoni di tubo inclinometrico (Arche2).

L'andamento regolare degli spostamenti integrali dell'inclinometro V12 (cementato a secco con una miscela di ghiaia e cemento) fa intuire che in questo caso il riempimento sia continuo. L'inclinometro, però, in oltre due anni di monitoraggio, non è stato in grado di rilevare l'attesa superficie di scivolamento. È probabile che ciò derivi da una minore deformabilità del materiale utilizzato per la cementazione rispetto al terreno circostante. Infatti, l'inclinometro T4I, che a differenza dell'inclinometro V12 è stato cementato con ghiaia miscelata a boiaccia di cemento per formare una specie di calcestruzzo, ha rilevato la posizione della superficie di scivolamento in tempi brevissimi.

Anche per l'inclinometro Arche3 si può affermare che il riempimento sia continuo. Tuttavia, in questo caso l'elaborazione delle misure con i quattro metodi di sonda biassiale e monoassiale ha fornito valori diversi degli spostamenti e, di conseguenza, non è possibile definire correttamente il cinematisma.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il tecnico del laboratorio di geotecnica, Sig. Marco Bragagna, e tutti gli studenti dei corsi di laurea di Ingegneria Civile e Ambiente e Territorio dell'Università degli Studi di Trento, che dal 1997 partecipano all'esecuzione delle misure inclinometriche.

BIBLIOGRAFIA

- Cooper, M.R. (2000). *Presentation of Monitoring Data for Unstable Slopes*. Proc., 8th Symposium on Landslides, Cardiff, 26-30 June 2000, 311-316.
- Dunnichiff, J., 1993. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. New ed. New York, N.Y. [etc.]:Wiley, 1993.
- Mikkelsen, P.E., 2003. *Advances in inclinometer data analysis*. Proc. of the 6th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Oslo, Norway, September, 15-18 2003, 555-567.
- Pincet B. e Blondeau F., 1978. *Detection et suivi des glissements de terrain*. Proc. of the III International Congress IAEG, Madrid, 1978, Vol Sec. 1, Issue 1, 252-266.
- Simeoni L., 2006. *Effects of the instruments bias on the reliability of manual inclinometer measures*. Proc. of the XIII Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, 'Active Geotechnical Design in

- Infrastructure Development', Ljubljana, May 29-31, 2006.
- Simeoni L. e Benciolini G.B., 2007. *Complementarietà tra i monitoraggi inclinometrico e topografico per l'analisi di stabilità di un versante*. Atti del XXIII Convegno Nazionale di Geotecnica, Padova, 16-18 maggio 2007, 639-646.
- Simeoni L. e Mongiovi L., 2007. *Inclinometer monitoring of the Castelrotto landslide in Italy*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 6, June 2007, 653-666.
- Simeoni L., Tarantino A., Pozzato A., De Polo F. e Bragagna M., 2008. *Il progetto di un sistema di monitoraggio per un argine dell'Adige*, Rivista Italiana di Geotecnica, Anno XLII, n. 3, 73-94.
- Tombolato S., Simeoni L. e Mongiovi L., 2009. *Kinematic of an A22 highway bridge*, VII Forum Italiano di Scienze della Terra, GeolItalia 2009, Rimini, 9-11 settembre 2009. Symposia F: Monitoring and management of natural risks, F8: monitoring of structures and infrastructures.

ABSTRACT

EFFECTS OF GROUTING ON THE INCLINOMETER MEASUREMENTS

Keywords: inclinometer, landslide, grouting, displacements.

Three different applications of inclinometer measurements to monitor the response of natural slopes are described in the paper. In all cases, soil movements occur in the upper layers of the slope, where a relatively shallow cover of soils slides over a stronger bedrock. Thus, the base of all inclinometers is fixed in a stable deposit.

In the paper, the attention is focused on the grouting procedures adopted to cement the inclinometer casings against the surrounding soil. In fact, the stiffness and strength of the annular grout should be as close as possible equal to those of the surrounding soil, to obtain measures that closely represent the response of the in situ soil. To this aim, the measurements from a total of seven inclinometers are examined and interpreted herein together with the installation procedures; these have been varied according to local experience and soil conditions.

Some of the casings have been grouted using the classic water-cement mix. In this case the mix was pumped from the base of the hole upwards, until the space between the soil and the casing had been filled.

Some other casings were grouted from the top downward. In this case the annular space was filled using a mixture of cement and gravel.

The remaining casings were grouted in stages. At the beginning a water-cement grout was pumped upwards from the base and also from mid-half of the column. When the level of mix in the annular space did not raise, because the grout flowed in the fissures of the rock, fine gravel was poured from the top in order to thicken the mix and keep it around the tubes.

It shall be noted that the base of the inclinometers reaches a rock layer or a gravel alluvium that are highly permeable; hence the loss of grout at the base is certainly possible.

Examining the data collected in the seven casings, it can be recognized that the grouting procedure can have a significant impact on the quality and reliability of the measures.

On one hand it is necessary to fill completely the annular space between the casing and the soil, making a continuous grout, with no voids. On the other hand, the stiffness of the grout should be essentially equal to that of the surrounding soils. If such requirements are fulfilled the response of the inclinometer will show no time lag. In essence, even small movements will be detected and it is not necessary to wait until enough displacements have accumulated to trace the position of the failure surface.

The erratic data from inclinometers T12 and Arche 2 can be taken as an example of a discontinuous or partially completed grout, presumably due to leaching into the base strata. In this cases the inclinometer casings would not be fixed and could sustain some irregular displacements different from those actually occurring in the surrounding soil.

On the other hand the more regular data from V12 can be interpreted as the effect of a continuous grout, that fills completely the annular space between the tubes and the surrounding soil. However, some doubts arise with respect to the stiffness of this grout, since two years of continuous monitoring seem insufficient to detect the sliding surface.

In fact, the inclinometer T4I, where a mix of fine gravel and cement was used to grout the casing, showed negligible time lag, allowing to detect the sliding surface after a short period of observations.

Finally, in the case of Arche 3, in which the grout is likely to be continuous, the interpretation of the measures processed with different procedures does not yield a unique trend. Therefore it is not possible to understand the failure mechanism, if present.