

MONITORAGGIO DI UN VIADOTTO IN MOVIMENTO SU UNA FRANA ESTREMAMENTE LENTA

Matteo Pedrotti

*Strathclyde University, Glasgow
matteo.pedrotti@strath.ac.uk*

Sara Tombolato, Lucia Simeoni e Luigi Mongiovi

*Università di Trento
lucia.simeoni@ing.unitn.it*

Sommario

Si descrive come lo studio di ridondanza e coerenza di misure di monitoraggio di spostamenti di un viadotto e del pendio ha consentito l'individuazione del meccanismo, che causa il movimento dell'opera viaria.

Introduzione

Oggetto di studio del seguente articolo è la stabilità del pendio interagente col viadotto autostradale „Micheletti 2“. Tale viadotto è situato lungo l'asse dell'Autostrada del Brennero A22 nella valle dell'Isarco in provincia di Bolzano (Figura 1).

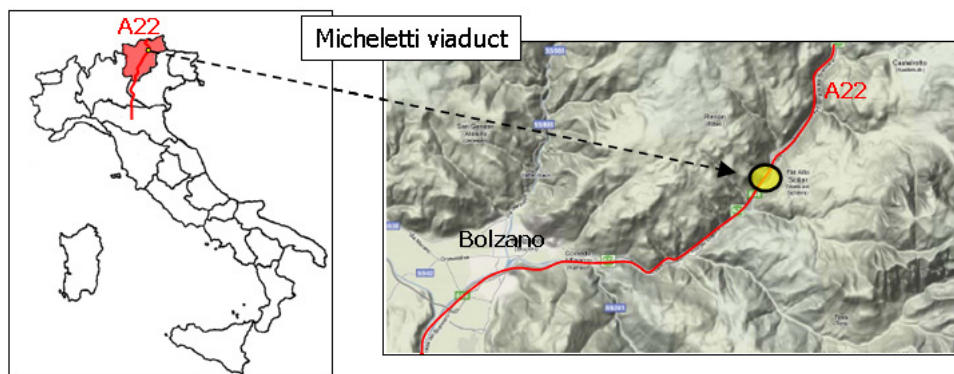


Figura 1. Tracciato A22

In seguito ad alcuni spostamenti anomali riscontrati dall'Ufficio Ispezione Opere d'Arte in corrispondenza del pulvino del viadotto, l'A22 ha incaricato l'Università degli Studi di Trento di studiare la stabilità del pendio interagente col viadotto.

Il sistema di monitoraggio utilizzato per lo studio della frana include sia sistemi di misura degli spostamenti della struttura (stazione totale e filo a piombo) sia sistemi di misura degli spostamenti del terreno (inclinometri).

Tutte le informazioni derivanti dalle diverse misure e analisi, sono state quindi messe a confronto, indagandone l'affidabilità sia in termini di ridondanza (confronto di misure della stessa grandezza effettuate con strumenti diversi) che di coerenza (confronto di misure di grandezze diverse che descrivono lo stesso fenomeno), in modo da definire un modello geotecnico capace di descrivere il fenomeno in atto.

Inquadramento geologico

Dal punto di vista geomorfologico la Valle Isarco presenta un caratteristico profilo a “U” tipico delle valli di origine glaciale (Fenti e Spagna, 1981). L’approfondimento della sezione valliva durante il quaternario è avvenuto attraverso molteplici fasi fluviali alternate a fasi glaciali, formando un sistema di terrazzi posti a diverse quote. La presenza di terrazzi caratterizza l’attuale morfologia del substrato roccioso affiorante, il quale presenta versanti acclivi che formano gradoni sub-verticali separati da zone a scarsa inclinazione.

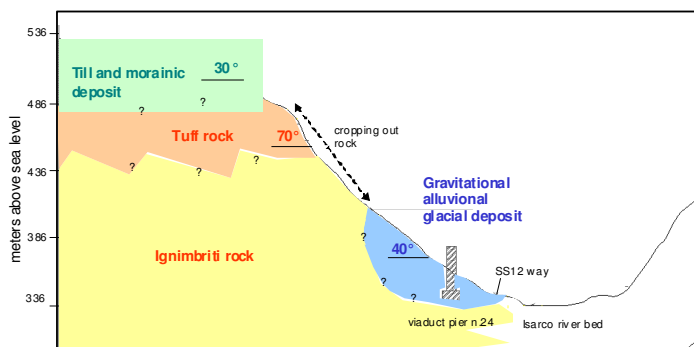


Figura 2. Sezione caratteristica della Valle Isarco.

Il più evidente di questi terrazzi, il cui bordo si identifica nel ciglio della scarpata principale di erosione, separa una zona a dominante morfologia glaciale da un'altra in cui prevalgono gli effetti di un modellamento post glaciale. In Figura 2 è riportata la sezione caratteristica della valle in cui è posizionato il viadotto “Micheletti 2”. In questa zona il fondo valle è occupato dall'alveo del fiume Isarco posto ad una quota di circa 336 m s.l.m. e dalla strada statale SS12 collocata alla base del versante a quota 345 m s.l.m. Immediatamente a monte della strada statale è presente un deposito di terreno sciolto che risale, con pendenze di circa 40°, fino alla base della parete rocciosa sub-verticale posta a quota di 400-410 m s.l.m. La parete rocciosa raggiunge quota 475 m s.l.m. con un'inclinazione media di circa 70°. Il ciglio della scarpata principale si riconosce a quota 475 m s.l.m. oltre la quale segue un evidente cambio di pendenza e il terreno torna più pianeggiante con pendenze prossime a 30°. A monte il pendio prosegue con pendenze via via maggiori fino a raggiungere pareti sub verticali e quote massime di 580 m s.l.m.

Dalla ricostruzione della stratigrafia non emerge la presenza di nessuno strato con minore resistenza a taglio che possa giustificare la localizzazione della superficie di scivolamento, nonostante la presenza di roccia fortemente degradata in prossimità degli spostamenti rilevati dagli inclinometri. Tale roccia degradata è situata sia in corrispondenza del tetto del bed-rock che all'interno del deposito di versante e non sembra costituire uno strato continuo. Anche dal punto di vista geologico risulta difficile individuare una plausibile dinamica che abbia originato tale strato. E' ragionevole ipotizzare che la roccia degradata presente nel deposito di versante derivi dalla degradazione in loco di blocchi di roccia caduti dalla parete o abbia origine nel deposito di versante stesso a seguito delle azioni meccaniche agenti sulla superficie di scorrimento durante il movimento.

Il viadotto

Il viadotto è collocato intorno alla progressiva km 70 per una lunghezza complessiva di 1255 m. Le pile di tale viadotto, alte circa 35 metri, hanno fondazioni dirette ed i fusti sono isolati dal terreno circostante da un pozzo. Ciascuna pila è collegata all'impalcato del viadotto tramite 6 giunti elastici, disposti su due file, che consentono alla pila di traslare e ruotare rispetto all'impalcato stesso.

Monitoraggio

Al fine di indagare la stabilità del pendio è stato effettuato il monitoraggio sia degli spostamenti della struttura che degli spostamenti del terreno, con l'intento di capire se i movimenti delle pile derivassero da un fenomeno d'instabilità globale o da un problema di capacità portante della fondazione. In Figura 3 è riportato il diagramma di flusso del modus operandi col quale è stato affrontato il lavoro. Ogni singola informazione derivante dal monitoraggio e dalle prove (in sito e di laboratorio) è stata trattata sia in termini di ridondanza che in termini di coerenza, in modo da garantire l'affidabilità dei dati. Definito il modello geotecnico si è potuto così arrivare ad un'esauriva comprensione del meccanismo di rottura.

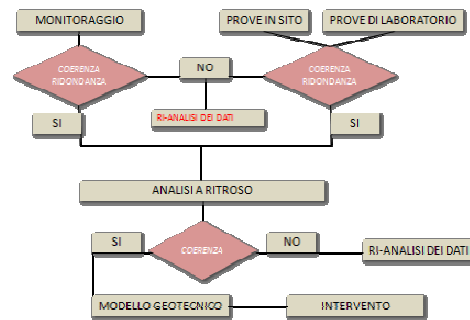


Figura 3. Diagramma di flusso del metodo di lavoro

Spostamenti orizzontali della struttura

Dalle misure degli spostamenti orizzontali delle pile tramite stazione totale si nota che le basi di cinque pile del viadotto si spostano verso valle con velocità pressoché costante di 10 mm/anno, mentre l'impalcato può essere assunto fermo (Figura 4). Le pile presentano quindi un'inclinazione dei fusti verso monte. Le direzioni e versi degli spostamenti sono compatibili con la morfologia del pendio.

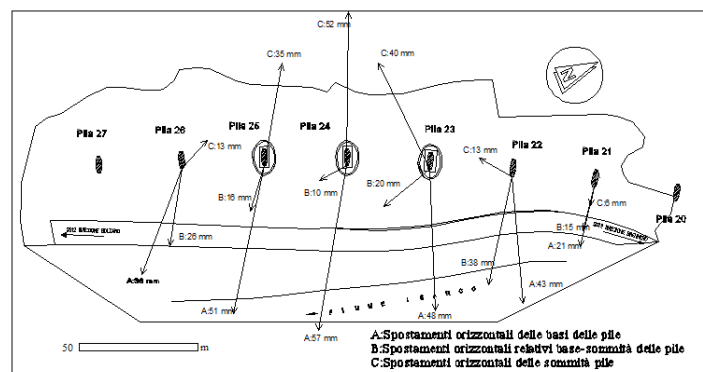


Figura 4. Spostamenti orizzontali da stazione totale (Novembre 2004-Aprile 2010).

Spostamenti verticali della struttura

Gli spostamenti verticali delle pile, riportati in Figura 5, sono chiaramente affetti da errori sistematici associati all'altezza strumentale dello strumento, che è misurata in ciascuna campagna di misura. Le differenze tra pila e pila rientrano inoltre nell'errore di misura. Gli spostamenti sono generalmente diretti verso l'alto e pertanto non sono coerenti con il movimento verso valle delle pile. Non sono inoltre riconoscibili cedimenti differenziali tra le pile.

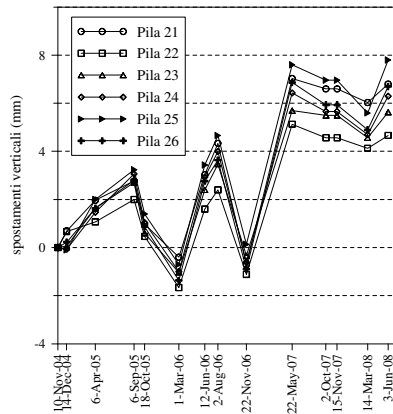


Figura 6. Spostamenti verticali in sommità delle pile (Novembre 2004 - giugno 2008).

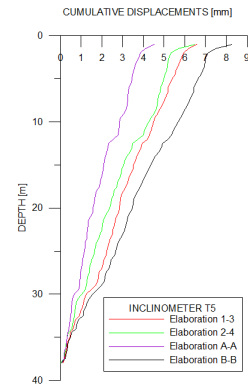


Figura 6. Confronto spostamenti integrali per differenti elaborazioni

Spostamenti del terreno

Gli spostamenti del terreno sono stati valutati tramite inclinometri, posizionati a valle e a monte delle pile interessate. Le misure inclinometriche sono state effettuate su 4 guide, consentendo 4 differenti elaborazioni. Dall'analisi della ridondanza è emersa una notevole differenza tra gli spostamenti calcolati con le diverse elaborazioni (Figura 6), con errori, sugli spostamenti integrati al piano di campagna, dello stesso ordine di grandezza dello spostamento stesso. Tali differenze non sono risultate né correlabili con la misura né legate agli errori sistematici associabili ai sensori o alla sonda (Mikkelsen, 2003). È pertanto ragionevole ipotizzare che le differenze rilevate siano associabili ad effetti del tubo, con la conseguenza che l'integrazione delle misure inclinometriche sull'intera lunghezza del tubo non può essere utilizzata per quantificare gli spostamenti al piano di campagna, ma solo per descrivere qualitativamente il cinematismo. Se anziché considerare le differenze degli spostamenti integrali si considerano quelle degli spostamenti puntuali, per ciascun inclinometro analizzato si ottengono errori medi tra le diverse elaborazioni dell'ordine del decimo di millimetro, ovvero confrontabili con la precisione della misura (Simeoni e Mongiovì, 2007). In definitiva per ciascuna misura inclinometrica si sono integrati gli spostamenti puntuali solo negli intervalli di profondità in cui si localizzavano gli spostamenti massimi e con azimuth coerente con la morfologia del pendio.

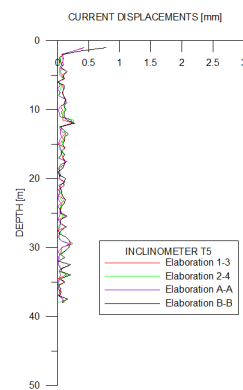
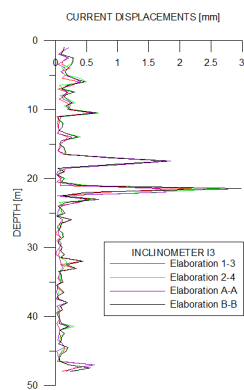


Figura 7. Spostamenti puntuali degli inclinometri I3 (adiacente alla pila 24) e T5 (a bordo strada SS12).

A titolo esemplificativo in Figura 7 è riportato un confronto tra gli spostamenti puntuali di due diversi inclinometri, dove il primo (I3, adiacente alla pila 24) presenta due livelli di

spostamento a circa 17 m di profondità (cinematismo superficiale) e a 21 (cinematismo profondo), mentre il secondo (T5) può essere considerato fermo.

Ridondanza tra le misure inclinometriche e le misure da stazione totale

Gli spostamenti misurati nel terreno e nelle pile sono stati confrontati in termini di velocità assolute (Tabella 1), in quanto le campagne di misura sono state eseguite in date diverse e, quindi, non è opportuno un confronto degli spostamenti. Le direzioni degli spostamenti del terreno e delle basi delle pile sono risultate dirette verso valle e pertanto coerenti con la morfologia del versante. La velocità totale degli spostamenti del terreno (ottenuta sommando i due cinematismi quando coesistenti) è analoga a quella delle pile ed è compresa tra 7 e 10 mm/anno. Si conclude che le misure sono affidabili e che gli spostamenti delle pile sono prevalentemente imputabili ai due cinematismi indicati, escludendo la presenza di un cinematismo molto più profondo nel tetto di roccia sottostante e nell'ammasso roccioso a monte.

Inclinometer	pier	ground rate [mm/year]	foundation rate [mm/year]
I6	22	7	8
T1	23	8	9
I2	23/24	6	-
I3	24	8	10
T4	25	7	9
T3	25	10	9
T6	26	9	7

Tabella 1. Confronto velocità degli spostamenti della struttura e del terreno

Cinematismi individuati

A conclusione dell'analisi degli spostamenti nel terreno si sono individuati due possibili cinematismi (Figura 8), uno nominato "profondo" che interessa principalmente la zona sud (pile 26 e 25) e uno nominato "superficiale" nella zona nord (pile 22 e 23). Nella zona centrale presso la pila 24 coesistono i due cinematismi, anche se entrambi con spostamenti di entità minore rispetto alle due zone laterali.

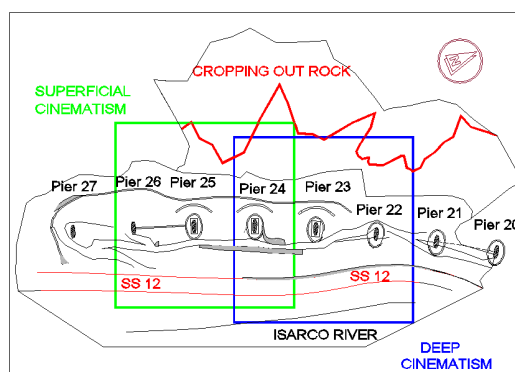


Figura 8. Limiti dei cinematismi individuati

Non è possibile escludere a priori cinematismi in roccia più profondi delle lunghezze dei tubi inclinometrici, anche se in tal caso avrebbero velocità molto minori dei due cinematismi nel deposito di versante, come risulta dal confronto tra le velocità degli spostamenti delle pile e nel terreno. Inoltre, considerando la superficie di scivolamento circolare ed i piccoli spostamenti verticali ricavati dalla stazione totale sembra ragionevole ipotizzare l'assenza di

cinematismi profondi che vadano a coinvolgere o meno la base della stazione totale. L'assenza di cedimenti differenziali significativi tra le pile e la continuità planimetrica degli spostamenti orizzontali assoluti, seppur divisi nei due cinematismi, suggeriscono che le cinque pile siano coinvolte nello stesso fenomeno d'instabilità globale.

Analisi a ritroso

Nota l'ubicazione della superficie di scivolamento sono state eseguite analisi di stabilità a ritroso al fine di ricercare i valori di resistenza al taglio residua rappresentativo dell'intero deposito di versante, considerato omogeneo. L'affidabilità dei risultati è stata verificata per confronto con i risultati delle prove di laboratorio per la valutazione della resistenza al taglio. L'analisi di stabilità a ritroso è stata effettuata imponendo il coefficiente di sicurezza unitario e considerando il cinematismo all'interno del deposito di versante. I valori di angolo di resistenza residua al taglio sono risultati pari a 20°, per il cinematismo profondo, e a 24°, per il cinematismo superficiale. Tali valori si collocano nell'estremo inferiore di quelli ottenuti in laboratorio. A conclusione delle analisi si è dimostrato che entrambe le superfici di scivolamento sono contenute all'interno del solo deposito di versante, in quanto un'estensione della superficie nella roccia, sottostante il deposito di versante e a monte, comporterebbe un significativo aumento del coefficiente di sicurezza; la falda non ha nessun effetto sulla stabilità del pendio; la presenza del viadotto comporta delle variazioni minime, circa dell'1 per cento, sul coefficiente di sicurezza della superficie profonda.

Conclusioni

E' stato progettato un sistema di monitoraggio in grado di descrivere il cinematismo del pendio interagente col viadotto autostradale. Tale sistema ha sfruttato una continua analisi dell'affidabilità delle misure effettuate, sia in termini di coerenza che di ridondanza.

L'approccio adottato nell'analisi degli spostamenti inclinometrici ha permesso di individuare due differenti meccanismi di rottura situati a differenti livelli. In definitiva il confronto tra gli spostamenti inclinometrici e quelli ottenuti dalla stazione totale ha permesso di affermare che gli spostamenti registrati sono dovuti ad un problema di instabilità globale del pendio e non ad un fenomeno legato alla capacità portante delle fondazioni delle pile.

Ringraziamenti

Si ringraziano i tecnici dell'Ufficio Ispezione Opere d'Arte della Società Autostrada del Brennero S.p.A.. In particolare si ringrazia l'ing. Paolo Joris per la disponibilità a partecipare ad approfondite discussioni per la comprensione della sovrastruttura e per l'interpretazione delle misure di monitoraggio. Si ringrazia anche il geom. Stefano Ranzi per l'esecuzione delle misure topografiche e dei rilievi in sito.

Bibliografia

- Fenti R. e Spagna S. (1981). I movimenti franosi della valle Isarco tra Bolzano e Ponte Gardena (Alto Adige). *Studi Trentini di Scienze Naturali*, 1981: 59-130.
- 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.
- Pedrotti, M. (2011). Stabilità del pendio interagente col viadotto Micheletti 2», *Tesi di Laurea*.
- Simeoni L. e Mongiovi L, 2007. Inclinometer monitoring of the Castelrotto landslide in Italy. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (6): 653-666.