

STUDIO SUI MECCANISMI DI INSTABILITÀ DI PENDII ETEROGENEI CON L'MPM

Veronica Girardi

Università degli Studi di Padova

veronica.girardi.1@unipd.it

Francesca Ceccato

Università degli Studi di Padova

francesca.ceccato.1@unipd.it

Fabio Gabrieli

Università degli Studi di Padova

fabio.gabrieli@unipd.it

Paolo Simonini

Università degli Studi di Padova

paolo.simonini@unipd.it

Sommario

Nella seguente memoria viene presentato uno studio sulla stabilità di pendii eterogenei basato sull'utilizzo del metodo dei punti materiali (MPM). In questa tipologia di pendii l'innesco del movimento franoso è generalmente associato ad un'alterazione del regime delle pressioni interstiziali causato da un evento di pioggia oppure da una ricarica sotterranea della falda. Nel seguente lavoro, questi due scenari di saturazione vengono applicati ad un pendio modello, permettendo così di analizzare sulla medesima geometria la differente evoluzione dei meccanismi di instabilità. L'analisi alle grandi deformazioni con MPM permette di esplorare tutto il fenomeno di innesco, evoluzione e post collasso e quindi di valutare gli spostamenti del pendio nel tempo senza le limitazioni degli approcci FEM tradizionali. In entrambi gli scenari indagati l'instabilità è caratterizzata da successivi fenomeni di riattivazione del movimento, a seguito della formazione della superficie di scivolamento. Dallo studio emerge che la fondamentale differenza fra i due percorsi di saturazione risiede nella profondità della superficie di scivolamento e quindi nell'entità delle masse instabili associate: nel caso dell'innesco per pioggia, il movimento, inizialmente solo superficiale, tende ad approfondirsi nel tempo, mantenendo una maggiore concentrazione di spostamenti nella parte alta del pendio; nel caso invece di ricarica di falda dal basso la superficie di scivolamento si forma più lentamente e subito in profondità, mantenendo pressoché costante la sua volumetria nel tempo.

1. Introduzione

La relazione tra le pressioni interstiziali e i movimenti di una frana può essere di difficile interpretazione se la complessità geologica e idrogeologica del pendio è elevata. In particolare, ciò è associato a contrasti di permeabilità fra materiali intatti, fessurati o già fortemente sollecitati a taglio, a causa della presenza di superfici di scorrimento multiple all'interno della stessa massa in movimento che possono essere correlati a complessi pattern di spostamento con la profondità, e infine a causa delle eterogeneità a grande scala che possono creare vie preferenziali di flusso da zone più superficiali del corpo di frana ai piani di scivolamento in profondità della stessa (Massey et al. 2013).

Il presente contributo è incentrato sull'indagine dei potenziali meccanismi di instabilità in pendii

eterogenei indotti da progressiva saturazione. Tale analisi viene svolta attraverso una formulazione MPM per terreni parzialmente saturi atta a riprodurre grandi spostamenti che possono interessare pendii e opere geotecniche (Ceccato et al. 2021). I meccanismi di saturazione possono avere diversa origine, ad esempio legati alle piogge, con conseguente direzione dall'alto verso il basso del fronte di imbibizione o causati da una ricarica sotterranea della falda con fronte di saturazione dal basso verso l'alto, come riportato ad esempio da Springman et al. (2012). Risulta di particolare interesse comprendere gli effetti di questi diversi meccanismi in un pendio non omogeneo, individuando non solo le zone di accumulo di deformazioni plastiche e di formazione della superficie di scorrimento, ma anche in termini di post-collasso e pattern di spostamenti, mediante l'analisi delle masse instabili coinvolte nel movimento franoso e la loro evoluzione nel tempo. Attraverso lo studio di questo pendio modello è possibile comprendere il potenziale di questa tecnica numerica ai fini della valutazione di sicurezza dei versanti in frana. Con tale approccio viene superato il concetto del fattore di sicurezza caratteristico dei metodi all'equilibrio limite e agli elementi finiti, e si valuta la condizione di stabilità attraverso la quantificazione degli spostamenti precedenti, durante l'innescò e nella fase post-collasso, aprendo nuove prospettive al supporto delle misure di mitigazione del rischio e dei sistemi di early warning.

2. Modello numerico

Il modello considerato consiste in una sezione di un pendio eterogeneo con superficie a pendenza 20° rispetto all'orizzontale e un'altezza di 4m dal piede alla sommità del pendio (Fig.1). Due diversi terreni compongono il pendio, una matrice più resistente e più permeabile (Terreno 1), e un livello di spessore pari a 0.60m (Terreno 2), con valori di resistenza meccanica e conducibilità idraulica inferiori. Le rispettive caratteristiche sono riportate in Tab. 1. Per entrambi i terreni viene utilizzato un modello elastico perfettamente plastico di tipo Mohr-Coulomb, e il modello Van Genuchten per la curva di ritenzione idraulica (SWRC). La scelta dei parametri della SWRC si basa su dati di letteratura individuati in Girardi et al. (2022). La conducibilità idraulica per semplicità si suppone costante e non variabile con la suzione. Il livello poco permeabile ha inclinazione pari alla superficie del pendio, e si trova ad 1m di profondità dalla superficie. Il bordo inferiore del modello, è fisso e impermeabile, al fine di riprodurre il comportamento di un basamento rigido.

Parametro	Terreno 1	Terreno 2
Densità del solido [kg/m^3]	2700	2700
Porosità [-]	0.4	0.5
Conducibilità idraulica [m/s]	$6 \cdot 10^{-3}$	$9.81 \cdot 10^{-6}$
Modulo di Young [kPa]	$40 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$
Rapporto di Poisson [-]	0.3	0.3
Angolo di attrito [$^\circ$]	28	22
Coesione [kPa]	1	5

Tab 1. Parametri meccanici e idraulici dei terreni costituenti il pendio eterogeneo.

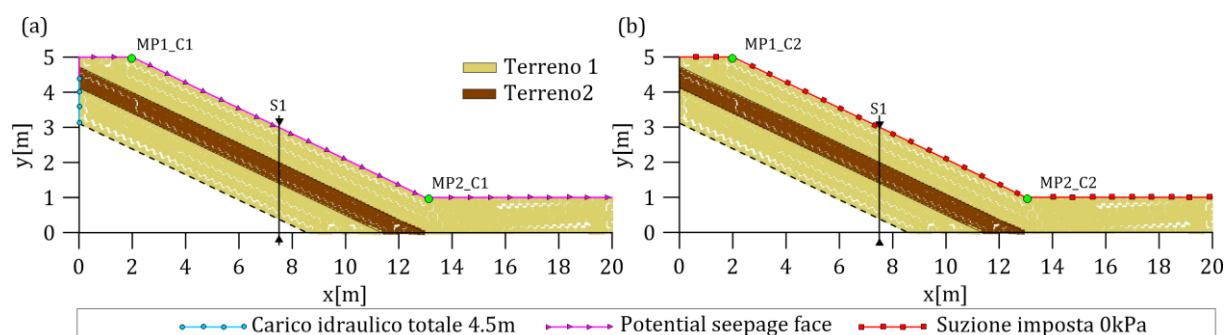


Fig 1. Geometria del modello numerico e condizioni al contorno idrauliche atte a riprodurre il meccanismo di saturazione dal basso verso l'alto (caso 1) (a) oppure dall'alto verso il basso (caso 2) (b).

La riproduzione dei due meccanismi di saturazione, uno dal basso verso l'alto, imputabile ad una ricarica sotterranea della falda (caso 1), l'altro dall'alto verso il basso imputabile ad una pioggia (caso 2), avviene mediante l'applicazione di diverse condizioni al contorno idrauliche. Nel primo caso, dopo l'inizializzazione delle tensioni, si applica una condizione di carico idraulico totale pari a $H=4.5\text{m}$ lungo il bordo verticale sinistro del modello, e la superficie del pendio è interessata da una condizione di tipo "potential seepage face" (Fig.1a); nel secondo caso, viene applicato un valore di pressione nullo e costante lungo tutta la superficie del pendio (Fig.1b). L'applicazione di queste condizioni permane per la durata di tutta la simulazione, pari a 60 minuti. In Fig.1 si individuano inoltre una sezione (S1) e quattro punti di controllo (MP1_C1, MP2_C1, MP1_C2, MP2_C2) che verranno utilizzati per l'analisi dei risultati in Sez.3.

3. Analisi e discussione dei risultati

L'analisi dei risultati inizia considerando l'evoluzione dell'energia cinetica nel tempo dell'intero sistema pendio per i due casi indagati, presentata in Fig.2a. Il primo picco, si verifica a circa 30min in entrambi i casi, leggermente anticipato nel caso 2. Il picco relativo al caso 1 è nettamente più elevato rispetto al caso 2. Tale differenza dipende principalmente dalle masse instabili coinvolte nel cinematisimo, in quanto nel caso 1 vengono mobilitate porzioni più estese del pendio, a causa della formazione di una superficie di scorrimento profonda (visibile in Fig.3a). Infatti le deformazioni plastiche si accumulano nella zona confinata inferiormente dal basamento e superiormente dal livello meno permeabile (in rosso in Fig.3a).

In entrambi i casi si riscontra la presenza di picchi di energia cinetica successivi al primo con il trascorrere del tempo (Fig.2a). Nel caso 1 tali picchi sono di entità inferiore rispetto al primo, e dunque caratterizzano un movimento con velocità inferiori e coinvolgimento molto limitato di nuove masse instabili. Viceversa nel caso 2 i due picchi di energia cinetica successivi sono di entità leggermente superiore rispetto al primo, ad indicare un fenomeno di riattivazione più rapido e con tendenza ad espandersi nel pendio. In questo secondo caso le deformazioni plastiche sono localizzate al di sopra del terreno meno permeabile (si veda Fig.3b), ma sono evidenti delle zone in cui le deformazioni iniziano a localizzarsi anche al di sotto del livello poco permeabile.

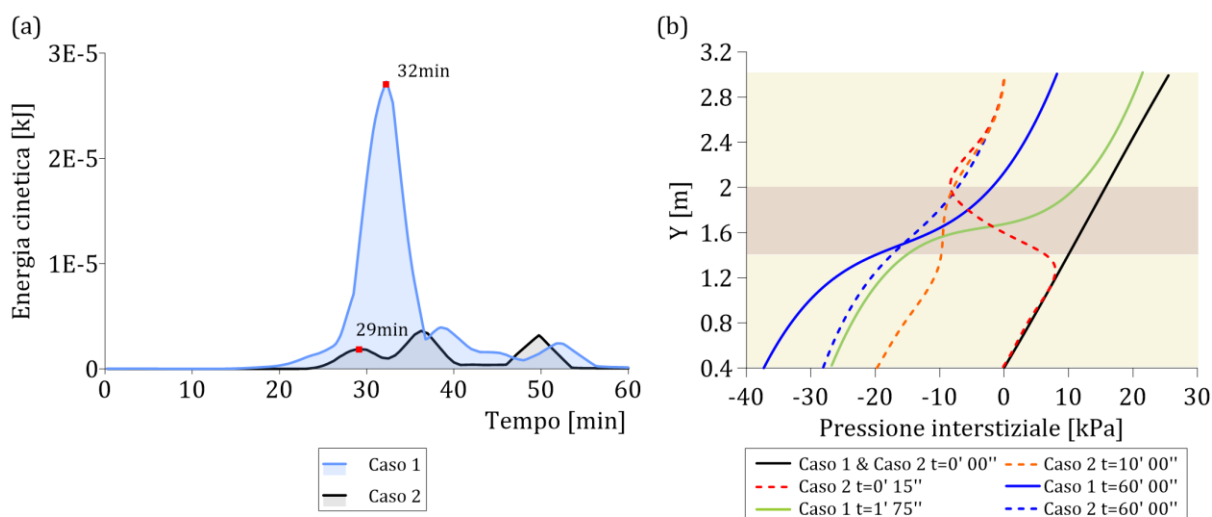


Fig 2. Energia cinetica del sistema in funzione del tempo per entrambi i casi analizzati (a). Andamento delle pressioni interstiziali lungo la sezione S1, per diversi istanti di tempo.

L'ubicazione delle zone di accumulo di deformazioni deviatoriche trova spiegazione se si considerano le distribuzioni di pressione lungo la sezione S1, alla mezzeria del pendio. Infatti in Fig. 2b sono riportati tali andamenti per entrambi i casi, a diversi istanti di tempo significativi. Nel caso 1 la zona di localizzazione è il risultato della riduzione delle pressioni interstiziali nelle zone inferiori del pendio,

evidente nella curva a $t=01' 75''$. La parte alta del pendio segue con un certo ritardo la riduzione delle pressioni, fino ad arrivare alla quasi completa saturazione a $t=60'$. Nel *caso 2* invece la pioggia satura quasi istantaneamente gli strati più superficiali del pendio, visibile nella curva a $t=15''$, causando la riduzione dello stato di tensione efficace nelle zone più elevate del pendio, e la conseguente riduzione della resistenza a taglio. Viceversa, le pressioni nelle parti inferiori del pendio si riducono in istanti successivi, a causa della permeabilità ridotta del terreno 2. Si noti che gli istanti di tempo selezionati per plotare le pressioni sono sia precedenti che antecedenti al picco di energia cinetica. Prima che si verifichi il picco in energia cinetica si verificano dei piccoli movimenti nel pendio, ordine di grandezza del mm/decina di mm, come visibile in Fig. 4a e Fig. 4b ed illustrato nel dettaglio in Girardi et al. (2022). Tali movimenti possono considerarsi come dei precursori della frana, ma non determinano un cambiamento significativo della geometria del pendio.

La quantificazione degli spostamenti del pendio è riportata nei grafici di Fig. 4a e 4b. Si considerano le componenti di spostamento lungo l'asse x (Fig.4a) e lungo l'asse y (Fig.4b) per punti in cresta al pendio ed al piede. I valori derivano da una media su 4 punti materiali immediatamente nell'intorno della zona scelta. L'andamento nel tempo delle componenti di spostamento evidenzia numerosi aspetti di dettaglio del cinematismo in ciascun caso indagato.

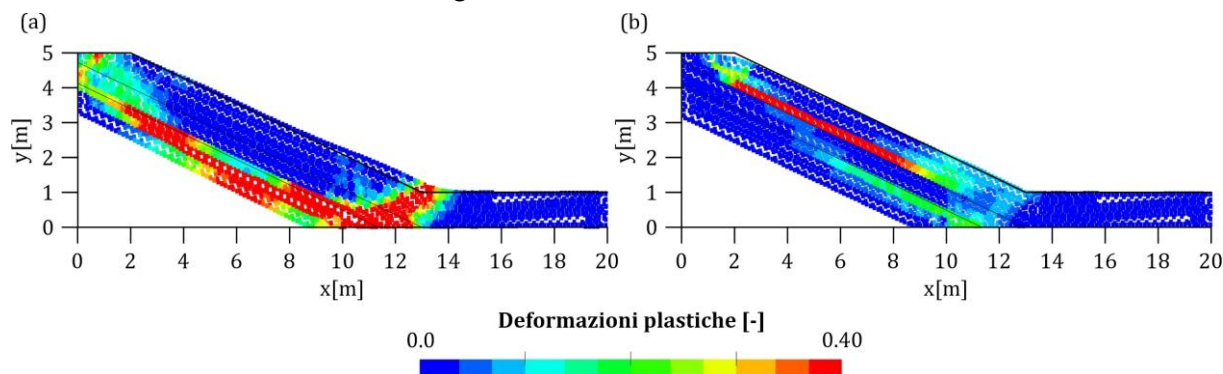


Fig 3. Deformazioni plastiche a 32min per il Caso 1 (a) e a 29min per il Caso 2 (b).

In generale, si conferma un movimento del pendio a più riprese, in particolare nell'intervallo tra $t=30'$ e $t=60'$, dove le curve hanno pendenze successivamente diverse, e talvolta sembrano raggiungere una condizione di equilibrio temporaneo. Questo aspetto è ad esempio evidente nel *caso 1* (curve tratteggiate), in cui è possibile notare un'evoluzione lenta dell'instabilità fino a circa $t=15'$, seguita da rapido accumulo di spostamenti fino a $t=30'$, per poi assestarsi temporaneamente fino a $t=35'$ e ripartire con spostamenti sempre crescenti fino alla fine del tempo simulato. In questo caso gli spostamenti in cresta e al piede hanno andamenti molto simili, e praticamente sovrapposti fino a $t=40'$.

Nel *caso 2* cresta e piede si muovono in maniera diversa: è visibile un improvviso spostamento della cresta in entrambi i grafici delle Fig. 4a e 4b; mentre il piede è fermo. Questo comportamento dipende dal fatto che la pioggia tende a saturare il terreno a basse profondità e al di sopra della lente poco permeabile del terreno 2, favorendo la formazione di un'iniziale superficie di scivolamento superficiale e molto rapida. Tuttavia, tale superficie non è sufficiente a spiegare la successiva evoluzione del movimento nel *caso 2*. Infatti, a partire da $t\approx 25'$, la cresta del pendio subisce un netto incremento di spostamento, sia orizzontale sia in termini di abbassamento, e anche il piede comincia a muoversi verso valle, ma registrando spostamenti più contenuti. Questo comportamento è associato all'approfondimento della superficie di scivolamento, e alla prosecuzione del movimento nella parte alta del pendio, che diventa ancora più accentuato. I contour di spostamenti a $t=60'$ di Fig. 4d mostrano tale approfondimento della superficie di scorrimento. Gli spostamenti verticali in Fig. 4b mostrano ordini di grandezza e andamenti simili nei due casi analizzati.

Le Fig.4c e Fig.4d forniscono un quadro generale della configurazione del pendio alla fine della simulazione per entrambi i casi analizzati, mediante la quantificazione dei massimi spostamenti raggiunti (80cm) alle diverse altezze del pendio. Tramite il contour è evidente come nel *caso 1* il piede del pendio sia caratterizzato da maggiori spostamenti, mentre nel *caso 2* è la parte alta del pendio ad essere maggiormente impattata dal fenomeno di instabilità conseguente alla saturazione. È opportuno precisare che l'utilizzo del modello Mohr-Coulomb impatta significativamente sulla propagazione delle masse instabili, in quanto non considera né potenziali deformazioni volumetriche associate all'imbibizione né la potenziale fluidizzazione del terreno in movimento a grandi velocità e in condizione pressoché sature. Per questo motivo è possibile che il runout sia sottostimato nei casi analizzati.

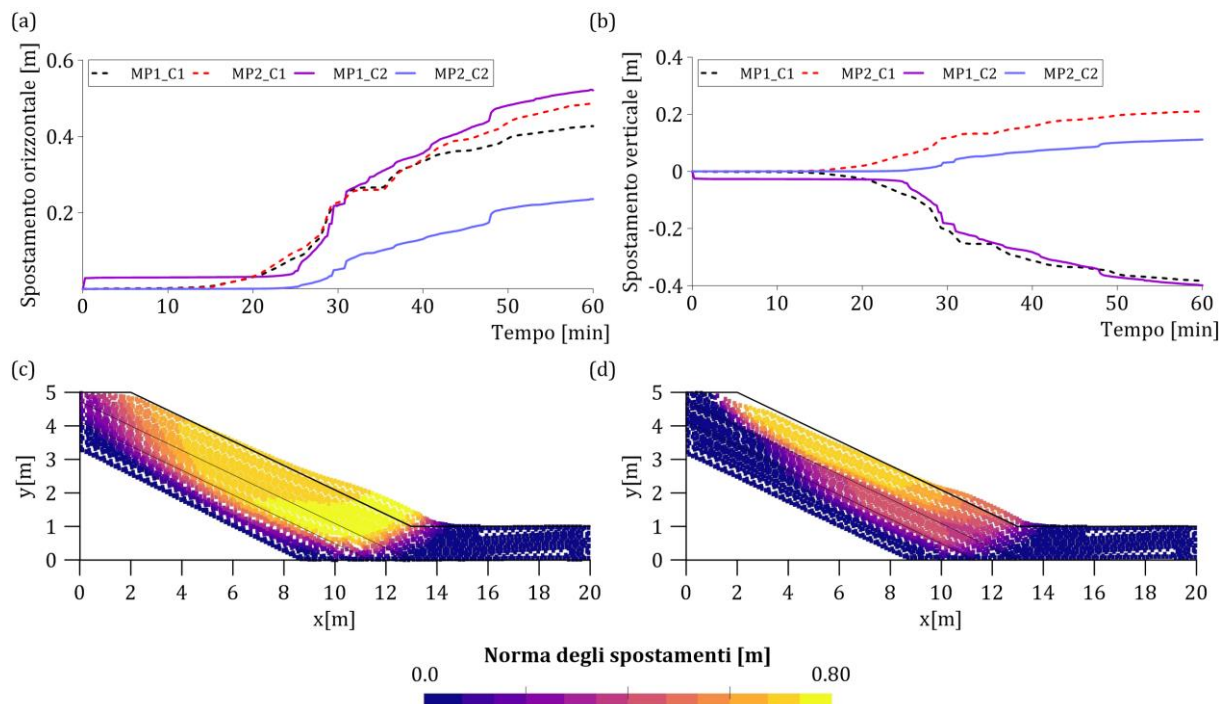


Fig 4 Spostamento dei punti materiali nel tempo, (a) componente x e (b) componente y. Contour degli spostamenti finali (norma) per il caso 1 (c) e il caso 2 (d).

I fenomeni di riattivazione del movimento nei casi semplici trattati in questa memoria sono imputabili alla portata entrante continua, dovuta all'applicazione delle condizioni al contorno idrauliche per tutta la durata della simulazione e alla sua intensità in relazione alle permeabilità dei terreni. Nei casi reali di pendii in frana i movimenti intermittenti di riattivazione possono essere associati a fenomeni più complessi e combinati, tra i quali fenomeni erosivi e retrogressivi (si veda ad esempio Gabrieli et al. 2016), differenti pendenze di superfici profonde al di sopra delle quali scorrono le colate, ricariche periodiche delle falde e le diverse intensità degli eventi piovosi su scale temporali estese (Massey et al. 2013). La combinazione di fattori geomorfologici, micro e macromeccanici e di carattere idraulico determinano la risposta complessa nel tempo della frana.

4. Conclusioni

La valutazione della stabilità dei pendii in frana è di fondamentale interesse per la progettazione di interventi di mitigazione ed è largamente dipendente dal regime idraulico dei versanti interessati. A parità di geometria, in questo particolare pendio modello con una eterogeneità meccanica e idraulica planare, i due meccanismi classici di instabilizzazione ovvero per saturazione dall'alto e dal basso,

producono risultati diversi in termini di volumi coinvolti, cinematica ed evoluzione con possibile riattivazione. In particolare in questo caso si è osservato un importante coinvolgimento di masse nel caso di saturazione dal basso rispetto al caso di innesco da pioggia. Inoltre il meccanismo di saturazione dal basso presenta un coinvolgimento maggiore del piede del pendio. Di particolare interesse è la possibilità di indagare a grandi deformazioni l'evoluzione temporale del fenomeno, e la sua riattivazione che appare più evidente nel caso di instabilità indotta da pioggia. Ulteriori spunti di analisi potranno essere considerati indagando l'effetto dell'inclinazione dello strato poco permeabile, e le sue proprietà meccaniche.

Ringraziamenti

Si ringraziano per il supporto economico fornito dall'Università di Padova (BIRD 181859), Cariverona R&S 2018 e il MIUR (Redreef - PRIN 2017 Call, prot.2017YPMBWJ).

Bibliografia

- Massey, C., Petley, D., McSaveney, M., 2013. Patterns of movement in reactivated landslides. *Engineering Geology* 159, 1–19. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.03.011>.
- Springman, S., Askarinejad, A., Casini, F., Friedel, S., Kienzler, P., Theysseire, P., Thielen, A., 2012. Lessons learnt from field tests in some potentially unstable slopes in Switzerland. *Acta geotechnica Slovenica* 1, 5–29.
- Ceccato, F., Yerro, A., Girardi, V., Simonini, P., 2021. Two-phase dynamic MPM formulation for unsaturated soil. *Computers and Geotechnics* 129, 103876. doi:[10.1016/j.compgeo.2020.103876](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103876).
- Girardi, V., Ceccato, F., Yerro, A., Simonini, P., Gabrieli, F., 2022. Large strain analysis of unsaturated heterogeneous slopes with MPM, in: *Proceedings of the 16th International Conference of IACMAG*.
- Girardi, V., Yerro, A., Simonini, P., Gabrieli, F., Ceccato, F. 2022. Wetting induced instabilities in layered slopes: a large displacements analysis. Submitted.
- Gabrieli, F., Corain, L., Vettore, L. 2016. A low-cost landslide displacement activity assessment from time-lapse photogrammetry and rainfall data: Application to the Tessina landslide site. *Geomorphology* 269, 56–74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.030>