

UNA METODOLOGIA DI MODELLAZIONE PER LO STUDIO DI FRANE SUPERFICIALI INDOTTE DA PIOGGE

Giuseppe Buscarnera
Politecnico di Milano
buscarnera@stru.polimi.it

Claudio di Prisco
Politecnico di Milano
cdiprisc@stru.polimi.it

Sommario

In questa nota sono analizzati alcuni aspetti di natura idro-meccanica concernenti l'innesco di movimenti franosi superficiali indotti da piogge. Allo scopo di semplificare la trattazione ed analizzare diversi scenari di rischio, è stato utilizzato lo schema di pendio indefinito. Ciò ha consentito di studiare il ruolo giocato dalle proprietà geomeccaniche del materiale, dal tipo di perturbazione all'origine dell'innesco e dall'inclinazione media del deposito. La discussione parte dallo studio dei processi di instabilità che possono attivarsi all'interno di depositi granulari parzialmente saturi. La particolare strategia utilizzata ha permesso di introdurre delle condizioni meccaniche di semplice comprensione per definire il tipo di collasso atteso, che può passare da una tipica rottura per taglio ad un'instabilità volumetrica seguita da un processo di liquefazione statica.

Introduzione

Da un punto di vista puramente meccanico un qualunque evento franoso è la diretta conseguenza di processi di rottura aventi luogo all'interno dei depositi costituenti il versante. Tale rottura può essere originata da un gran numero di fattori destabilizzanti sia naturali che antropici, e spesso coinvolge notevoli volumi di materiale portando al loro movimento verso valle.

Come ben noto, tali fenomeni spesso implicano ingenti perdite economiche, danni estesi alle reti infrastrutturali e, in casi estremi, la perdita di vite umane. Di conseguenza, qualunque analisi dei rischi legati all'instabilità dei versanti non può prescindere dalla valutazione delle caratteristiche dell'evento franoso e dalla stima della sue probabilità di accadimento. Da tale punto di vista un ruolo determinante è giocato dalle proprietà geomeccaniche dei depositi che, nel caso di materiali naturali, possono dare luogo a molteplici forme di instabilità (Nova, 2003). In modo particolare, il processo di saturazione conseguente ad eventi piovosi rappresenta una delle più comuni cause di collasso. Tale nota approfondisce questi ultimi aspetti, e si propone come obiettivo quello di sottolineare le implicazioni che i processi di instabilità locale del materiale possono avere a livello di stabilità globale del versante.

Fenomeni di rottura in materiali parzialmente saturi

Criteria di stabilità: il lavoro del secondo ordine

I depositi naturali, soprattutto nel caso di coltri superficiali, sono comunemente caratterizzati da condizioni di parziali saturazione, ovvero dalla presenza di due fluidi all'interno dei pori (generalmente aria e acqua). La principale conseguenza della parziale saturazione è la

comparsa di effetti di natura capillare, quantificabili mediante la suzione, $s = u_a - u_w$. Ciò comporta l'aumento della resistenza al taglio dei terreni e la possibilità di sostenere stati tensionali che non sarebbero ammissibili in assenza di tale effetto stabilizzante.

E' evidente come lo studio dei fenomeni di rottura in terreni non saturi sia di notevole interesse per l'analisi della stabilità di versanti naturali. È necessario pertanto essere in grado di quantificare le perturbazioni piovose in grado di innescare un movimento franoso e definire le caratteristiche di quest'ultimo. Come ben noto, nel caso dei materiali geologici il concetto di rottura può assumere connotati molto complessi e spesso ambigui (Nova, 2003). Tale peculiarità richiede l'introduzione di criteri di stabilità generali, capaci di descrivere anche forme di collasso che si differenziano dalla classica rottura per taglio. Un criterio di stabilità largamente accettato nell'ambito della meccanica dei solidi è il cosiddetto criterio di Hill (1958), basato sul concetto di lavoro di secondo ordine. Nel caso di un terreno secco o saturo il lavoro di deformazione del secondo ordine è espresso come segue:

$$d^2W = \frac{1}{2} \dot{\sigma}'_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

La stabilità dell'elemento di volume è garantita qualora il lavoro del secondo ordine dato dalla (1) assuma un valore positivo per qualsiasi incremento di deformazione. Tale condizione è stata recentemente estesa al caso dei terreni parzialmente saturi (Buscarnera e di Prisco, 2010) nel modo seguente:

$$d^2W = \frac{1}{2} \left(\dot{\sigma}^*_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - n \dot{s} \dot{S}_r \right) \quad (2)$$

dove $\dot{\sigma}^*_{ij}$ rappresenta l'incremento di sforzo agente sullo scheletro solido, mentre \dot{s} è l'incremento di suzione. L'espressione (2) consente anche di definire delle coppie di variabili incrementali coniugate (rispettivamente $(\dot{\sigma}^*_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij})$ e $(n\dot{s}, -\dot{S}_r)$). Tali variabili sono funzionali alla definizione del legame costitutivo e consentono di definire la legge in modo energeticamente consistente. Inoltre, come sarà discusso nel seguito della nota, il loro impiego permette un'immediata estensione dei concetti di stabilità e controllabilità al caso dei materiali parzialmente saturi.

Applicazione del concetto di controllabilità nel caso del pendio indefinito

La stabilità di un sistema meccanico è comunemente interpretata come uno 'stato' caratterizzante un sistema soggetto a condizioni ben definite. Da tale punto di vista si distinguono stati di equilibrio stabile oppure instabile, considerando il termine 'stato' come una proprietà intrinseca del sistema considerato. Il concetto di controllabilità (Nova, 2003; Buscarnera e Nova, 2011) mette in discussione tale principio, evidenziando come l'innescò di un fenomeno instabile dipenda non soltanto dalle condizioni correnti del sistema, ma anche dalle condizioni di controllo, ovvero dalle modalità secondo le quali esso viene disturbato.

In questa sezione il concetto di controllabilità è applicato al caso dei materiali parzialmente saturi, sfruttando la definizione di d^2W data dalla (2). Inoltre, attraverso l'impiego dello schema di pendio indefinito (Figura 1), sarà mostrato come tale teoria consenta di studiare le condizioni di stabilità di coltri superficiali non sature.

La cinematica caratterizzante lo schema di pendio indefinito implica infatti la presenza di uno stato di deformazione di tipo piano (di Prisco et al., 1995). Inoltre, la simmetria del versante lungo la linea di massima pendenza implica una cinematica fortemente semplificata, per la quale le uniche componenti di deformazione non nulle sono la deformazione in direzione

normale al substrato, ε_n , e la deformazione a taglio, γ_{nt} .

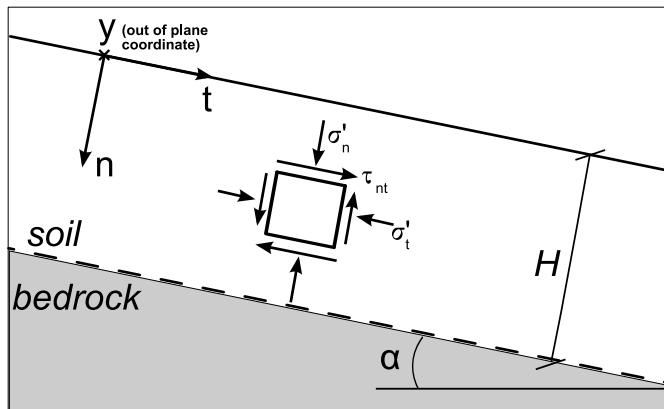


Figura 1. Schema di pendio infinitamente esteso (da Buscarnera, 2010).

In virtù di tali semplificazioni, il comportamento meccanico del materiale costituente il versante può essere rappresentato mediante condizioni di taglio semplice. Un possibile esempio di legame costitutivo idro-meccanico per il caso in questione è allora dato dalla relazione seguente:

$$\begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_n^* \\ \dot{\tau}_{nt} \\ n\dot{s} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}_n \\ \dot{\gamma}_{nt} \\ -\dot{s}_r \end{Bmatrix} \quad (3)$$

La matrice costitutiva in (3) permette di stabilire un legame fra le variabili incrementali caratterizzanti il lavoro del secondo ordine. Una volta definite le condizioni di controllo mediante le quali il pendio è sollecitato è possibile definire degli indici di stabilità per il pendio indefinito. Nel seguito della nota verranno considerati due scenari particolarmente significativi da un punto di vista geomeccanico: (i) l'azione di sollecitazioni di taglio a suzione costante (pressioni interstiziali costanti per entrambe le fasi fluide) e (ii) l'effetto di variazioni dello stato tensionale in condizioni di contenuto d'acqua costante (condizioni non drenate per la sola fase liquida). Nel primo caso è possibile mostrare che l'innescò di una instabilità della coltre è dato da:

$$D_{11}D_{22} - D_{12}D_{21} = 0 \quad (4)$$

mentre lo scenario associato all'azione di perturbazioni non drenate prevede una perdita di controllabilità qualora sia soddisfatta la seguente condizione:

$$D_{11}^*D_{22} - D_{12}D_{21}^* = 0 \quad (5)$$

dove:

$$D_{11}^* = \left[D_{11} - \left(D_{13} - \frac{D_{33}}{n} S_r \right) \frac{S_r}{n} \right] \quad (6-a)$$

$$D_{21}^* = \left[D_{21} - D_{23} \frac{S_r}{n} \right] \quad (6-b)$$

Mentre la condizione (4) è associata all'innesco di un fenomeno di localizzazione delle deformazioni di taglio, la (5) deriva da un vincolo di tipo misto, e possiede un'espressione che include anche termini di accoppiamento idro-meccanico. Pertanto, a seconda delle caratteristiche meccaniche del materiale e delle condizioni iniziali tale forma di instabilità può assumere caratteristiche simili ad una rottura per localizzazione oppure ad un collasso di tipo volumetrico.

Analisi delle condizioni di innesco: gli abachi di stabilità

Come già sottolineato, l'effetto della suzione è quello di stabilizzare localmente la microstruttura del materiale ed incrementarne la resistenza al taglio. Di conseguenza, un versante in condizioni di parziale saturazione può essere considerato stabile anche per inclinazioni molto maggiori di quelle che lo stesso materiale sarebbe in grado di sostenere in condizioni secche o totalmente sature. Nonostante questi concetti sono ben noti nel campo della meccanica dei terreni non saturi, i modelli costitutivi avanzati possono fornire utili indicazioni al fine di comprendere i meccanismi di collasso aventi luogo durante processi di infiltrazione di acque piovane. Nel seguito, le condizioni di stabilità e la loro dipendenza dal tipo di perturbazione saranno discusse attraverso abachi ottenuti mediante l'impiego di un opportuno modello costitutivo calibrato con riferimento al comportamento meccanico di una tipica sabbia sciolta (Buscarnera, 2010).

Perturbazioni idrauliche: l'effetto di processi di saturazione

Come ben noto, la resistenza al taglio dovuta agli effetti capillari può essere rimossa da processi di saturazione, come ad esempio quelli aventi luogo durante eventi piovosi. I processi deformativi che ne conseguono portano alla creazione di superfici di scorrimento e talvolta sono accompagnati dall'accumulo di deformazioni volumetriche (fenomeno questo noto in letteratura come "collasso per saturazione"). La metodologia di modellazione discussa nelle sezioni precedenti fornisce dei criteri per individuare le condizioni di innesco di una frana durante un processo di saturazione definendo al tempo stesso le caratteristiche meccaniche del processo instabile.

Il più comune meccanismo di attivazione originato a seguito di eventi piovosi è la rottura per taglio accompagnata da una localizzazione delle deformazioni. L'entità della riduzione di suzione capace di innescare una rottura all'interno dei materiali costituenti il deposito, Δs , dipende dalle condizioni iniziali prima dell'evento. La Figura 2 mostra delle predizioni ottenute mediante l'impiego del modello e si riferisce alle perturbazioni capaci di innescare una rottura per taglio (localizzazione delle deformazioni). Per facilitare il confronto fra differenti condizioni iniziali, le perturbazioni di innesco sono presentate in forma normalizzata rispetto alla suzione iniziale, s_0 . Come atteso, la suzione iniziale e la profondità del deposito giocano un ruolo determinante nel definire l'intervallo di angoli di inclinazione suscettibili all'innesco di movimenti franosi. I risultati mostrano che fenomeni di localizzazione, e quindi la creazione di ben definite superfici di scorrimento, possono essere attesi in versanti sufficientemente inclinati, nei quali l'inclinazione è maggiore dell'angolo di natural declivio e le condizioni di equilibrio sono garantite unicamente grazie all'azione stabilizzante della suzione.

Nonostante la rottura per taglio rappresenti la più comune forma di rottura all'origine di instabilità di versanti, molto spesso le frane indotte da eventi piovosi possono evolvere in frane di colata. Tale transizione ha maggiori probabilità di avere luogo qualora i depositi

siano particolarmente suscettibili alla liquefazione. La metodologia di modellazione presentata in questa memoria può essere utilmente impiegata come strumento di analisi per individuare il possibile innesco di instabilità di questo secondo tipo. Durante un processo di saturazione è possibile infatti monitorare l'evoluzione dell'indice di stabilità (5) (associato ad un collasso non drenato). Tale tipologia di analisi è chiamata 'analisi di instabilità latente', in quanto si concentra sulla possibilità di incorrere in condizioni di instabilità non direttamente attivate dal tipo di perturbazione agente.

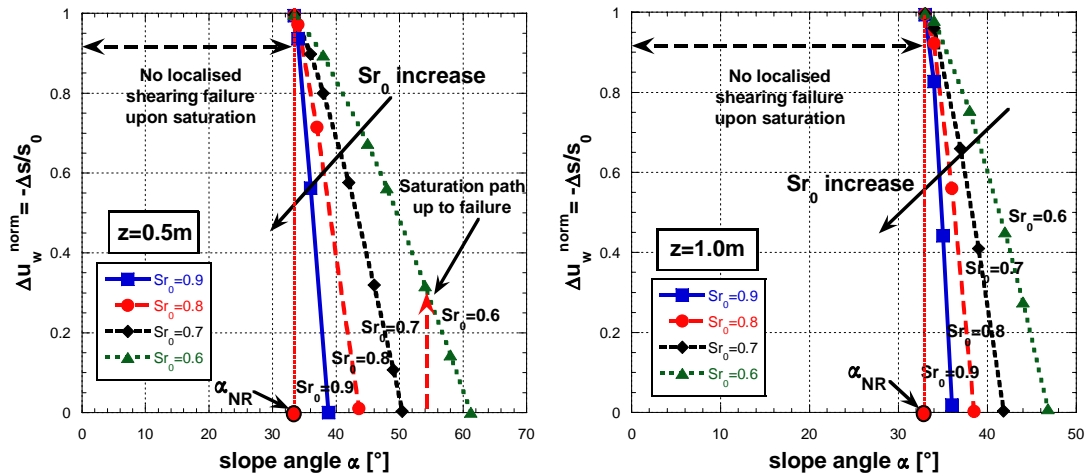


Figura 2. Abacchi di stabilità per perturbazioni idrauliche (ΔU_w^{norm} è la variazione normalizzata di pressione dell'acqua; s la variazione di suzione; s_0 la suzione iniziale); a) $z=0.5m$ and b) $z=1.0m$ (da Buscarnera, 2010).

Le simulazioni numeriche, sintetizzate in Figura 3, mostrano che, all'aumentare della propensione del materiale al collasso volumetrico, tale instabilità può anticipare la rottura per taglio. E' possibile concludere che tali fenomeni possono rappresentare il primo e più critico meccanismo di attivazione di un movimento franoso avente luogo durante un evento piovoso. Le possibili conseguenze di tali meccanismi di instabilità locale possono essere catastrofiche, in quanto indicano il potenziale innesco di un processo a catena culminante con la liquefazione del deposito stesso.

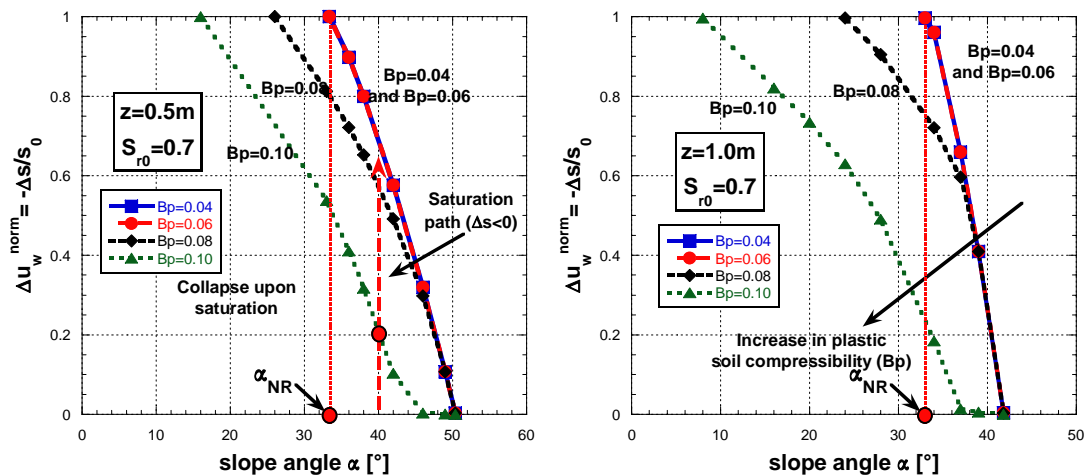


Figura 3. Abacchi di stabilità di perturbazione idraulica per instabilità in controllo di contenuto d'acqua (effetto della compressibilità volumetrica); a) $z=0.5m$ and b) $z=1.0m$ (da Buscarnera, 2010).

Conclusioni

In questa memoria sono state affrontate alcune problematiche meccaniche che giocano un ruolo determinante nella valutazione della probabilità di innesco di frane superficiali associate a precipitazioni meteoriche intense. Lo studio è stato affrontato considerando sia le condizioni di totale saturazione che quelle di parziale saturazione ed utilizzando lo schema di pendio indefinito. In particolare, è stata mostrata una metodologia semplificata per lo studio dei meccanismi di innesco, basata (i) sull'impiego di un modello costitutivo capace di simulare il comportamento meccanico di terreni saturi e parzialmente saturi e (ii) sulla definizione di criteri di stabilità meccanica.

Le simulazioni numeriche, eseguite facendo riferimento all'elemento rappresentativo di volume, hanno mostrato come la stabilità del sistema, così come prevista dalla teoria, dipenda marcatamente dal tipo di perturbazione. In modo particolare l'attenzione è stata concentrata sullo studio di perturbazioni idrauliche, ovvero sollecitazioni che implicano variazioni dell'indice di saturazione. Lo studio ha mostrato che, a seconda delle caratteristiche meccaniche del materiale, possono essere indotti almeno due tipi distinti di instabilità: (i) una rottura localizzata e (ii) un collasso volumetrico seguito dalla liquefazione del deposito. In particolare, è stato mostrato come la compressibilità volumetrica del terreno giochi un ruolo chiave nel definire quale dei due meccanismi di attivazione sia il più probabile. Mentre materiali caratterizzati da una limitata compressibilità sono più inclini a sviluppare una rottura per taglio caratterizzata dalla formazione di una ben definita superficie di scorrimento, terreni altamente collassabili tendono a sviluppare un'instabilità meccanica molto simile alla liquefazione statica. È importante sottolineare come quest'ultimo comportamento instabile sia previsto dal modello sulla base dell'applicazione di sole perturbazioni idrauliche applicate a sforzi totali costanti. In altre parole l'instabilità viene raggiunta durante la fase di saturazione, quando il materiale è ancora caratterizzato da condizioni non sature. Pertanto è possibile concludere che, contrariamente a quanto comunemente riportato in letteratura, tali simulazioni suggeriscono come la totale saturazione possa essere un requisito non necessario per l'innesco di un collasso volumetrico seguito da un processo di liquefazione.

Bibliografia

- Buscarnera, G. (2010). Rainfall-induced flow slides: constitutive modelling, mechanical instability and theoretical interpretation. PhD Thesis, Politecnico di Torino.
- Buscarnera G., Nova R. (2009). An elastoplastic strainhardening model for soil allowing for hydraulic bonding-debonding effects. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*; 33:1055-1086.
- Buscarnera G., Nova R. (2011). Modelling instabilities in triaxial testing on unsaturated soil specimens. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*; 35:179-200.
- Buscarnera G., di Prisco C. (2010). Discussing the definition of second-order work in unsaturated soils. Published online on *the Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, D.O.I. 10.1002/nag.991.
- Nova R. (2003). The failure concept in soil mechanics revisited. In *Bifurcations and Instabilities in Geomechanics*; J.F. Labuz & A. Drescher eds. , Balkema, Lisse, 3-16.
- di Prisco, C., Matiotti, R., Nova, R. (1995). Theoretical investigation of undrained stability of shallow submerged slopes. *Géotechnique* 45, pp. 479-496.
- Hill, R. (1958). A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids. *J. of the Mech. and Phys. of Solids* 6, pp. 239-249.