

Diss. ETH N° 19124

Hydro-mechanical characterization of rooted
hillslope failure: from field investigations to
fiber bundle modeling

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

MASSIMILIANO SCHWARZ

Dott. Forestale ed ambientale, Università di Firenze

30.08.1980

citizen of

Uesslingen-Buch TG

accepted on the recommendation of

Prof. Dani Or

Prof. Hans Rudolf Heinemann

Dr. Denis Cohen

Ing. Albert Böll

2011

Summary

The ability to monitor and possibly predict locations and conditions for onset of rapid mass movements are essential for mitigation and risk assessment in mountainous regions such as the Swiss Alps. Despite the ubiquity of such natural hazards, considerable gaps remain in basic understanding of triggering mechanisms and prediction of spatial extent of potentially unstable zones. Vegetation cover plays an important role in slope and bank stabilization through complex interactions between hydromechanics and biotic factors. Plant roots play important role in reducing damage of other natural hazards such as flooding and debris flows as related to slope and bank stability in catchments. This work attempts to improve understanding of triggering mechanisms of shallow landslides in vegetated slopes by proposing and testing a new modeling framework for the quantification of root reinforcement at various spatial scales from the single root to the stand. The study begins with a review of the state of the art of methods and models for quantifying root reinforcement highlighting knowledge gaps the must be addressed to advance understanding and provide more realistic estimates of the role of root reinforcement and modes of failure that are upscalable from the single root to forest stand. The primary knowledge gap lies in the need to consider dynamic mechanical behavior of lateral root reinforcement at different spatial scales requiring explicit estimates of root distribution and dynamic reinforcement.

Formulation of knowledge gaps paved the ways for implementation of mechanical and hydrological concepts within a new modeling framework that is spatially resolved from the tree to the stand scale. The modeling framework is comprised of two main modules: a first is concerned with estimation of root geometrical and distribution information (number per diameter class considering the distance and the dimension of tree stems), and a second module characterizes the mechanical behavior of root bundles (The Root Bundle Model). The numerical results of the model enable isolation of most influential variables on root reinforcement (such as root size distribution, root length, root branching patterns and root tortuosity) and provided guidance for a series of laboratory and field experiments for model calibration and validation. To this end, a novel experimental pullout device was constructed to measure force-displacement behavior of individual and bundles of roots. We used the device to collect data for calibrating the Root Bundle Model in well defined soil and root systems. Subsequently,

IV

we performed field pullout tests using the same set up to determine pullout behavior of natural root bundles in forested soil profiles for model validation under natural conditions. We applied the modeling framework for two case studies illustrating the importance of spatial and dynamic characterization for realistic implementation of root reinforcement in assessment and analysis of shallow landslides triggering mechanisms.

The main outcomes of this work can be resume in three important conclusions:

- In many cases lateral root reinforcement contribute more than basal root reinforcement to the stability of shallow landslides with volumes smaller than 1000-2000 m^2 (depending on the situation).
- It is important to consider the progressive failure of root bundles to obtain realistic force-displacement characterization of root reinforcement, such as the Root Bundle Model does.
- The spatial characterization of root reinforcement at single tree scale is fundamental to understand and predict the triggering mechanisms of shallow landslides in vegetated slopes.

The presented methodology gives the possibility for the first time to upscale the mechanical effects of root reinforcement at the hillslope scale considering a realistic spatial characterization of its force-displacement behaviors. The implementation of such method in models for the simulation and prediction of shallow landslides represents an important advance because it allows the three dimensional quantification of forces redistribution in an unstable slope. Moreover, this methodology may be applied to the quantitative analysis of other important processes related to rooted-soil mechanics such as tree stability and rockfall interactions with trees.

From a practical point of view, the results of this work help to better quantify the role of protection forests. The proposed modeling framework represents for the managers and decision makers an important support tool for the evaluation and management of protection forests. For instance, in specific conditions of slopes subject to shallow landslides, it is now possible to define the minimal dimension of unstable masses and the typologies of forest structures that assure enough local root reinforcement. Based on such informations, the planing of eventual forest interventions can be evaluated quantitatively.

Riassunto

Il monitoraggio e la previsione di rapidi eventi gravitativi sono elementi importanti per la gestione dei pericoli naturali in regioni montane come l'arco alpino. Nonostante la sovente ricorrenza di tali eventi, molte rimangono le incertezze sui meccanismi base di formazione di tali fenomeni e pertanto sulla loro previsione spazio-temporale. I danni dovuti a pericoli naturali come piene e colate di fango sono molto spesso connessi ad altri processi piú a monte, come frane superficiali o stabilitá degli argini. In questo contesto, la vegetazione contribuisce alla stabilitá dei versanti tramite un complessa interazione tra effetti diretti ed indiretti. In questo lavoro vengono presentati risultati volti a migliorare la comprensione e la quantificazione dei meccanismi che portano alla formazione di frane superficiali sotto copertura vegetale e la descrizione di un nuovo metodo per la quantificazione del rinforzo radicale a diverse scale spaziali. Nella prima parte del lavoro viene fatta una revisione dello stato attuale delle conoscenze riguardo i metodi usati per la quantificazione del rinforzo radicale, individuando e discutendo quali sono le conoscenze fondamentali che mancano per lo sviluppo di una metodologia piú avanzata per la stima del rinforzo radicale (dalla singola radice a scala di pendio). La discussione di tale revisione ha portato alla conclusione che l'aspetto dinamico del rinforzo laterale delle radici a differenti scale é l'aspetto piú importante che probabilmente é stato trascurato. A tale scopo, nuove funzioni per la stima della distribuzione delle radici e della dinamica di rinforzo sono risultate necessarie. Sulla base di questo primo studio, concetti di meccanica ed idrologia sono stati implementati in una nuova metodologia per la caratterizzazione della dinamica del rinforzo radicale considerando diverse scale di risoluzione. La metodologia presentata é costituita da due gruppi di funzioni: un primo gruppo di funzioni é stato sviluppato per la stima della distribuzione di radici laterali (numero per classe di diametro) considerando la distanza e le dimensioni degli alberi, mentre un secondo gruppo di funzioni é stato concepito per la caratterizzazione della dinamica del rinforzo radicale (il Root Bundle Model). I risultati di questo modello numerico hanno consentito l'individuazione dei parametri che influenzano in maniera fondamentale i risultati (tipo distribuzione dei diametri delle radici, lunghezza delle radici, tipo di biforcazioni delle radici e tortuositá delle radici), e di conseguenza ha consentito di pianificare in maniera oculata una serie di esperimenti di laboratorio ed in campo per la calibrazione e validazione del modello. A

questo punto si é presentata la necessità di realizzare un nuovo tipo di strumentazione che consentisse di registrare la forza di trazione e lo spostamento di ogni singola radice di un fascio eterogeneo. L'uso di tale apparecchio in condizioni controllate di laboratorio ha consentito la calibrazione del "Root Bundle Model". La validazione del modello é stata fatta con esperimenti *in situ* testando fasci naturali di radici preparate in profili verticali del suolo. Infine, la nuova metodologia é stata testata in due casi di studio per valutarne l'applicazione nella previsione e l'analisi di frane superficiali in bosco. In questo modo si é mostrato l'importanza di tale tipo di risultati per la gestione delle instabilità di pendio nella pratica, ma anche l'importanza di quantificare l'influenza della vegetazione a livello scientifico per comprendere i meccanismi di formazione delle frane superficiali. In breve, le conclusioni piú importanti di questo studio possono essere riassunte nei seguenti punti:

- In molti casi il contributo laterale delle radici é piú importante di quello basale, soprattutto per frane con volumi minori di 1000-2000 m^3 (a seconda delle condizioni).
- É molto importante considerare la rottura progressiva di un fascio di radici per ottenere una caratterizzazione della dinamica del rinforzo radicale, come nel caso del "Root Bundle Model".
- La caratterizzazione spaziale del rinforzo radicale alla scala di singolo albero é fondamentale per comprendere e fare previsioni sui meccanismi di formazione delle frane superficiali in pendii vegetati.

La metodologia che viene qui presentata offre oggi la possibilità per la prima volta di fare un' upscaling degli effetti meccanici del rinforzo radicale a scala di pendio, considerando una caratterizzazione spaziale della dinamica di tale rinforzo. L'implementazione di tale metodo in modelli per la simulazione e la previsione di frane superficiali consente il calcolo della redistribuzione di forze in tre dimensioni durante la formazione di una frana. Inoltre, questo metodo può essere applicato nelle analisi quantitative di altri importanti processi legati alla meccanica dei suoli radicati come l'instabilità degli alberi dovuta all'impatto della caduta di sassi o a forti venti.

Da un punto di vista pratico, i risultati di questo lavoro aiutano a meglio quantificare il ruolo dei boschi di protezione e delle opere di ingegneria naturalistica. In particolare, il tipo di modello proposto rappresenta uno strumento unico per i gestori del territorio e selvicoltori per la valutazione e gestione dei boschi di protezione. Per esempio, in certe condizioni di pendii soggetti a smottamenti e frane, oggi é possibile definire le dimensioni

minime di possibili masse instabili e le tipologie di strutture forestali in grado di garantire localmente un rinforzo radicale sufficiente. Sulla base di tali informazioni é perciò possibile pianificare eventuali interventi forestali in modo quantitativo.