

Failure mechanisms in unsaturated silty sand slopes triggered by rainfall

Doctoral Thesis

Author(s):

Askarinejad, Amin

Publication date:

2013

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010002526>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 21423

**FAILURE MECHANISMS IN UNSATURATED SILTY SAND SLOPES TRIGGERED BY
RAINFALL**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

AMIN ASKARINEJAD

Master of Science in Civil engineering - Geotechnical Engineering

Iran University of Science and Technology

born 16.09.1982

citizen of Iran

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Sarah M. Springman

Prof. Dr. Andrew Take

2013

Kurzfassung

Erdrutsche, die durch Niederschläge ausgelöst werden, beeinflussen das Leben vieler Menschen weltweit und verursachen jährlich erhebliche Schäden an der Infrastruktur. Erdrutsche werden durch eine Abnahme der effektiven Spannungen und der damit verbundenen Verminderung der Scherfestigkeit als Folge eines Anstiegs des Porenwasserdrucks ausgelöst. Die Eintretenswahrscheinlichkeit von Erdrutschen ist direkt abhängig von den klimatischen und hydrologischen Bedingungen in der betroffenen Region. Es ist daher zu erwarten, dass in Zukunft aufgrund eines vorhergesagten Anstiegs meteorologischer Extremereignisse sowie der zunehmenden Konzentration der Bevölkerung und der Infrastrukturdichte in den Berggebieten erdrutschbasierte Risiken zunehmen werden.

Das Hauptziel dieses Projekts war es, die Auswirkungen von Porenwasserdruckänderungen auf die Stabilität von ungesättigten, silthaltigen Sandhängen zu studieren. Ausserdem standen die Mechanismen, die zur Initialisierung und Ausbreitung der Schubverformungen führen, sowie die Untersuchung schneller Massenbewegungen im Zentrum des Forschungsinteresses. Dieses Projekt wurde an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH Zürich) am Institut für Geotechnik (IGT) lanciert und ist Teil eines schweizerischen (TRAMM), sowie eines europäischen Forschungsprojektes (SafeLand).

Für die Untersuchungen wurde in der Nähe von Rüdlingen (Kanton Schaffhausen, Schweiz) ein bewaldeter, ca. 300 m² grosser Hang unmittelbar am Rheinufer ausgewählt, wo bereits mehrere Hangmuren durch starke Regenfälle ausgelöst worden waren. Der Hang wurde instrumentiert, um sowohl die hydro-mechanischen Reaktionen des Bodens unter natürlichen und künstlichen Extremniederschlagsereignissen, wie auch die Wechselwirkungen mit dem darunterliegenden Grundgestein, sowie die Auslösemechanismen eines Erdrutsches zu studieren. Die Scherfestigkeitsparameter des Bodens aus dem Bereich des Hanges wurden unter den im Feld vorherrschenden Spannungspfaden bestimmt. Die hydraulischen und volumetrischen Eigenschaften des Bodens wurden mittels Feld- und Labortests und unter Berücksichtigung des Sättigungsverhaltens sowohl an gestörten als auch ungestörten Proben ermittelt. Die Tiefe und die Form des darunterliegenden Grundgesteins sowie die Infiltrationseigenschaften des Bodenprofils wurden ebenfalls bestimmt und untersucht.

Ein dehnungsbasierter Inklinometer (Strain Inclometers: SI) wurde für dieses Projekt entwickelt und im Feld eingebaut. Die Zweckmässigkeit dieser Sensoren bezüglich der Ermittlung der Scherflächentiefe und der Bewegungsdetektion vor dem Eintreten des Bruchs wurden mittels Laborversuche bestätigt. Vier solche Geräte wurden an verschiedenen Stellen des Versuchshangs installiert.

Der Hang wurde im Oktober 2008 während 4.5 Tagen intensiven, künstlichen Niederschlagsereignissen ausgesetzt. Dabei wurden wertvolle Informationen über die hydro-mechanischen Reaktionen des Hanges gesammelt und ausgewertet, um die Gründe für das Nichteintreten der Instabilität des Hanges zu identifizieren. Im Anschluss wurde der Porenwasserdruck im Boden unter natürlichen, meteorologischen Bedingungen während des Zeit-

raums von November 2008 bis März 2009 überwacht. Im März 2009 wurde der Hang fünfzehn Stunden lang beregnet. Dabei wurden die Niederschläge im oberen Teil des Hanges intensiviert, wo eine geringe Wurzelbewehrung sowie flacher liegender Fels vorhanden war. Die künstliche Beregnung war schliesslich ausreichend, um einen 130 m³ grossen Erdrutsch auszulösen.

Im Anschluss an die Feldarbeit wurde auf die Unterschiede beider Feldversuche (Oktober 2008 und März 2009) eingegangen und diese insbesondere unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Anfangsbedingungen analysiert. Basierend auf den Untersuchungen wurden 4 Hypothesen aufgestellt, welche für die Initialisierung des Erdrutsches im März 2009 massgebend mitbeteiligt sind. Dazu wurden durch das IGT eine Klimakammer sowie ein Regensimulator entworfen. Eine Reihe von geotechnischen Zentrifugen-Tests wurde geplant, um diese Hypothesen zu prüfen und um die Auswirkungen der Felsform und die hydrogeologischen Wechselwirkungen mit dem darüber liegenden Boden auf die Stabilität des Hanges zu studieren.

Das Verhalten des Hanges vor der Instabilität wurde mittels analytischer und numerischer Methoden untersucht. Die mechanischen Eigenschaften von ungesättigten Böden und die verstärkenden Effekte der Vegetation wurden in den 2D/3D Grenzgleichgewichtsanalysen berücksichtigt. Mögliche Bruchflächentiefen wurden auf Basis dieser vereinfachten Modelle berechnet und mit der Tiefe der realen Bruchfläche in Rüdlingen verglichen. Zweidimensionale, entkoppelte, hydro-mechanische Finite-Elemente-Simulationen ermöglichten es, die Wirkung der hydraulischen Interaktionen des Untergrundes mit den darüber liegenden Bodenschichten zu untersuchen. Zusätzlich wurde eine Reihe von zwei- und dreidimensionalen, gekoppelten, hydro-mechanischen Finite-Elemente-Analysen durchgeführt, um die gekoppelten Reaktionen des ungesättigten Bodens zu berücksichtigen. Dabei wurden die Boden-Grundgestein-Wechselwirkungen in Bezug auf das Auftreten der Porenwasserdrücke und deren Einfluss auf die Stabilisierung bzw. Destabilisierung des Hanges untersucht und mit den Ergebnissen aus den Feldmessungen verglichen.

Abstract

Landslides triggered by rainfall cause significant damage to infrastructure annually and affect many lives in several parts of the world, including Switzerland. These landslides are initiated by a decrease in the effective stresses, and hence the shear strength of the soil, as a result of the increase in pore water pressure. The frequency of their occurrence is directly affected by the climatic and hydrological conditions in the region. Therefore, it is expected that the predicted rise in the number of extreme meteorological events, accompanied by the concentration of population and infrastructure in mountainous regions, will result in an increased number of casualties associated with landslides in the future.

The main goal of this doctoral project was to study the effects of pore water pressure perturbations on the stability of unsaturated silty sand slopes and to investigate the mechanisms leading to the initiation and propagation of the shear deformations and eventually possible rapid mass movements. This project was initiated and led by the Institute of Geotechnical Engineering (IGT) of the Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zurich) and was incorporated in a Swiss national (TRAMM) and a European Union (SafeLand) multidisciplinary research project.

A 38° forested slope, with an area of approximately 300 m², was selected on the banks of river Rhine in Northern Switzerland in Canton Schaffhausen near Ruedlingen village, where several shallow landslides had occurred in May 2002 due to rainfall. The slope was instrumented to study the hydro-mechanical responses of the soil to both natural and intense artificial rainfall events, interactions with the underlying bedrock and triggering mechanisms leading to a landslide. The shear strength parameters of the soil from the vicinity of the slope (named herein as Ruedlingen soil) were determined under representative stress paths from the field. The hydraulic and volumetric characteristics of the soil were also investigated under saturated and unsaturated conditions using insitu and laboratory tests on either disturbed or undisturbed samples. The depth and form of the bedrock were determined and the insitu infiltration characteristics of the soil profile were studied.

Strain Inclometers (SI) were designed and constructed in the course of this project. The potential of these sensors to aid in detection of the failure surface depth and pre-failure movements was confirmed during the scoping laboratory experiments, and then four devices were installed at different locations in the experimental slope.

The behaviour of the slope when it was subjected to a 4.5-day intense artificial rainfall event was investigated in October 2008 and valuable information regarding the hydro-mechanical responses of the slope during this severe rainfall event were attained, and the reasons for stability were identified following analysis of data from the test. Subsequently, the pore water pressure in the soil mass was monitored under natural meteorological conditions during the period between November 2008 and March 2009. Artificial rainfall was applied in March 2009 for 15 hours, with more intensity on the upper part of the slope, where less root reinforce-

ment and shallower bedrock were expected. This was sufficient to trigger a landslide of 130 m³.

The differences between the two field experiments were studied in terms of the initial conditions, and 4 hypotheses were investigated further to identify the triggering mechanisms of the landslide in the March 2009 experiment. A series of geotechnical centrifuge tests was planned to test these hypotheses and a climate chamber and rain simulator were designed and constructed at IGT. Several tests were conducted to study the effect of the bedrock shape and the hydrogeological interactions with the overlying soil mantle on the stability of the slope.

The behaviour of the test slope prior to the failure induced by the artificial rainfall event was investigated using the analytical and numerical methods. The mechanical features of unsaturated soils and reinforcing effects of the vegetation were implemented in 2D and 3D limit equilibrium analysis. The possible depth of the failure surface was calculated based on these simplified models and was compared with the depth of the real failure surface in the landslide triggering experiment. Two dimensional uncoupled hydro-mechanical finite element simulations were also carried out to study the effect of the hydraulic interactions of the bedrock with the overlying soil layers. Moreover, a series of two and three dimensional coupled hydro-mechanical finite element analyses were performed, in order to take the coupled responses of the unsaturated soil into account. The soil-bedrock interactions, in terms of the pattern of pore pressure distributions and their influence on stabilising or destabilising the slope, were studied and the results were compared to the field measurements.