

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
Fakultät Bauingenieurwesen

**Verschiebungsmuster in Böschungen während
Aushubvorgängen**

Displacement patterns in slopes during excavation processes

An der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

Dissertation

Vorgelegt von:

Dipl.-Ing. Kornelia Nitzsche

Geb. am 6. Februar 1984 in Dresden

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Habil. Ivo Herle

Prof. Dr. Sarah Springman

Prof. Dr.-Ing. Roberto Cudmani

Tag der Einreichung: 11.04.2016

Tag der Verteidigung: 29.07.2016

Kurzfassung

Oft lassen sich nach dem Aushub einer Böschung auf deren Oberfläche weiterhin Verformungen messen. Diese können durch unterschiedliche Vorgänge hervorgerufen werden und als Indikator für die Standsicherheit des Erdbauwerkes von Bedeutung sein. Sind die Ursachen der Verformungen bekannt, lassen sich diese mit Hilfe gezielter Baumaßnahmen entschleunigen oder auch zum Stillstand bringen. Mit der Erkennung von aushubbegleitenden Verschiebungsmustern infolge verschiedener Vorgänge hat sich die vorliegende Arbeit beschäftigt.

Eine Studie von Verschiebungsmerkmalen bei verschiedenen Randbedingungen ist im Labor mit Hilfe von Modellversuchen schwer umsetzbar, da das Erzeugen eines identischen Ausgangszustandes kaum erreichbar ist. Darüber hinaus sind Verschiebungsmessungen nur begrenzt durchführbar. Daher wurden numerische Simulationen unter Einsatz der Finiten-Elemente-Methode für die Modellierung des Aushubvorgangs und die Untersuchung von Böschungsbewegungen gewählt. Zur realitätsnahen Abbildung des Bodenverhaltens bedarf es zudem eines geeigneten mathematischen Modells, welches in der Lage sein muss, dass spannungsabhängige Dehnungsverhalten während eines Aushubs zu beschreiben.

Drei verschiedene fortgeschrittene Stoffmodelle wurden für die Nachrechnung eines Aushubs einer idealisierten Böschung unter vereinfachten drainierten Bedingungen gewählt:

- elasto-plastisches *Modified-Cam-Clay* Modell
- ratenunabhängiges hypoplastisches Modell nach *Mašín*
- ratenabhängiges visko-hypoplastisches Modell nach *Niemunis*

Vor der Aushubberechnung wurden die Parameter der Stoffmodelle zuerst mit Hilfe von Ergebnissen aus Standardlaborversuchen und unter Einsatz numerischer Elementversuche kalibriert. Unabhängig von der geotechnischen Problemstellung werden Standardlaborversuche zufolge der Literatur ausdrücklich für die Bestimmung der Stoffmodellparameter empfohlen. Die Parameterkalibrierung erfolgte anhand eines bestehenden Parametersatzes für das visko-hypoplastische Modell. Die Parameter der beiden anderen Stoffmodelle wurden entsprechend angepasst, sodass ein annähernd identisches Spannungs-Dehnungsverhalten für die Standardlaborversuche prognostiziert werden konnte. Trotz der übereinstimmenden Verformungsprognosen bei den Laborversuchen, lieferten jedoch die Nachrechnungen des Aushubs für eine idealisierte Böschung unter drainierten Bedingungen abweichende Verformungsprognosen für die jeweiligen Stoffmodelle. Daraufhin wurden lastgesteuerte Triaxialversuche durchgeführt, mit deren Hilfe sich charakteristische aushubbegleitende Spannungspfade während eines Aushubs abbilden lassen. Zugleich fand eine numerische Nachrechnung der Laborversuche statt und die gemessenen und berechneten Verschiebungen wurden verglichen.

Verschiedene Vorgänge wie eine reine Entlastung durch einen Aushub und Aushub nach Vorbelastung, ein Aushub gekoppelt mit Konsolidation, ein Aushub gekoppelt mit vorangegangener Grundwasserabsenkung und Konsolidation sowie Kriechprozesse wurden für die Untersuchung von aushubbegleitenden Verschiebungsmustern betrachtet. Es konnte festgestellt werden, dass die Auswertung von Verschiebungen und Verschiebungsänderungen in einem einzelnen Punkt auf der Böschungsoberfläche nicht zwangsläufig zu einer eindeutigen Aussage über die Präsenz eines stattfindenden Vorganges führt. Nur die Verknüpfung von Verschiebungspfaden in mehreren Beobachtungspunkten lassen eine Aussage zu. Dadurch lassen sich während und nach Beendigung des Aushubs kennzeichnende Verschiebungsmuster für unterschiedliche Vorgänge identifizieren, welche für eine Wiedererkennung verwendet werden können.

Bei der numerische Nachrechnung eines Feldversuches, in welchem eine Böschung infolge Aushubs zum Versagen gebracht wurde, wurden die berechneten Verschiebungen hinsichtlich eines erkennbaren Verschiebungsmusters analysiert. Es wurde festgestellt, dass trotz eines abweichenden Böschungssystems Übereinstimmungen in kennzeichnenden Beobachtungspunkten identifiziert werden können. Diese Punkte lassen sich für die Wiedererkennung von Mustern im Verschiebungsprofil heranziehen.

Abstract

After the excavation of a cut slope ongoing deformations on the slope surface can often be measured. These deformations can be induced due to various processes and can also be used as an indicator of slope stability. If the reasons for the deformations are known, selective stabilization methods can help to decelerate, or stop, the movements. The potential for the recognition of displacement patterns in excavated slopes is studied in this dissertation.

In the laboratory, the analysis of displacement patterns due to various processes is difficult as identical initial test conditions can hardly be reproduced. Furthermore, measurements of displacements can only be conducted to a limited degree. Therefore, numerical calculations using the finite element method were applied to simulate excavation processes and analyse the displacements. In addition, a suitable mathematical model has to be used to represent the stress-strain behaviour during the unloading process.

Three different advanced constitutive soil models were chosen to calculate an excavation process of an idealized slope assuming drained conditions:

- elasto-plastic *Modified-Cam-Clay* model
- rate-independent hypoplastic model according to *Mašín*
- rate-dependent visco-hypoplastic model according to *Niemunis*

Before conducting the excavation simulation, the soil parameters of the constitutive models were calibrated by means of numerical element tests, depicting the stress paths of conventional laboratory tests. Within the literature, those conventional laboratory tests are recommended for the determination of parameters for the constitutive models. A parameter set for the visco-hypoplastic model was chosen from literature. The parameters were adapted for the remaining models. Thus, all three models predicted approximately the same stress-strain behaviour during conventional laboratory tests. Despite the correlations during the element tests, the constitutive models predicted different displacements during the calculation of the excavation of an idealized slope under drained conditions. Thereupon, load-controlled triaxial compression tests were conducted reproducing the characteristic stress paths during an excavation process. At the same time, numerical calculations were carried out to reproduce the triaxial compression tests, and the measured and calculated displacement behaviour was compared.

Different processes such as pure unloading due to excavation, excavation in overconsolidated soil, excavation coupled with consolidation, excavation coupled with previous ground water lowering and consolidation as well as the influence of creep effects were considered in the analysis of the displacement patterns during an excavation. It can be stated that the evaluation of displacements and changes in displacements in a single point on the slope surface cannot provide sufficient information about a certain physical process. Only the combination of displacement paths at different survey points will lead to a reliable conclusion. Thus, representative displacement patterns for different processes are recognizable during and after the excavation, which can be used for the identification.

During the numerical simulation of an in-situ model test, where a slope was brought to failure by excavation, the calculated displacements were analysed for identifiable displacement patterns. It can be stated that despite different slope systems, consistencies were found within characteristic survey points. These points can be used to identify patterns within the displacement contours.