

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
Fakultät Bauingenieurwesen

**Anwendung der Hypoplastizität bei numerischen
Berechnungen von bodendynamischen
Problemen**

**Application of hypoplasticity in numerical
calculations for soil dynamics**

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

Dissertation

Vorgelegt von:

Dipl.-Ing. Jamal Hleibieh

Geb. am 29. Juli 1984 in Latakia

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle

Prof. Dr.-Ing. habil. Christos Vrettos

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wehr, M.Sc.

Tag der Einreichung: 03.04.2017

Kurzfassung

Das Bodenverhalten unter dynamischer Beanspruchung ist sehr komplex, wird jedoch in der Praxis häufig mit Hilfe von vereinfachten Modellen abgebildet. Die Gültigkeit solcher Modelle ist jedoch aufgrund des spannungs- und dehnungsabhängigen Bodenverhaltens sehr begrenzt. Alternativ dazu bieten sich dynamische numerische Berechnungen mit fortgeschrittenen Stoffmodellen, die das Bodenverhalten in einem großen Dehnungs- und Spannungsbereich realitätsnah repräsentieren können. In dieser Arbeit wurde untersucht, inwieweit sich das komplexe Bodenverhalten unter dynamischen Einwirkungen mit Hilfe der Hypoplastizität abbilden lässt. Dabei wurde die entscheidende Rolle der Parameterermittlung veranschaulicht und zusätzlich ein angemessener Vorgang zur Bodenparameterbestimmung beschrieben.

Zunächst wurde das Verhalten einer trockenen Sandschicht infolge von Erdbebenbeanspruchungen numerisch untersucht. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass die Beschleunigungsamplifikation in der Nähe zur Bodenoberfläche von der Frequenz und der Amplitude der Grundbeschleunigung abhängt. Weiterhin nimmt die berechnete Eigenfrequenz und die entsprechende Amplifikation mit zunehmender Beschleunigungsamplitude ab. Des Weiteren wurde ein Zentrifugenversuch an einem im Sand eingebetteten Tunnel unter Erdbebeneinwirkungen nachgerechnet. Die berechneten Ergebnisse zeigen eine ausreichende Übereinstimmung mit dem Experiment. Mit der numerischen Nachrechnung wurde auch eine Abhängigkeit zwischen den Änderungen der Biegemomente in der Tunnelschale und der Oberflächensetzung im umliegenden Boden festgestellt.

Die Standsicherheit von Böschungen unter Erdbebenbeanspruchungen stellt wegen des komplexen Bodenverhaltens eine weitere Herausforderung für die Berechnungen dar. Zunächst wurde überprüft, inwieweit sich das Böschungsverhalten mit der in der Praxis häufig eingesetzten pseudo-statischen Methode abbilden lässt. Hierfür wurde für eine in der Zentrifuge untersuchte Modellböschung die pseudo-statische Analyse durchgeführt. Die im Zentrifugenversuch aufgetretenen oberflächennahen Gleitfläche lässt sich durch die pseudo-statische Methode nicht prognostizieren. Für eine oberflächennahe Gleitfläche wurde hingegen ein sehr hoher Standsicherheitsfaktor ermittelt. Mit einer numerischen Nachrechnung mit einem hypoplastischen Stoffmodell mit Betrachtung der intergranularen Dehnungen konnte das Verhalten der Modellböschung qualitativ und quantitativ sehr gut abgebildet werden. Somit wurden sowohl die oberflächennahe Gleitfläche als auch die Vertikal- und Horizontalverschiebungen realitätsnah wiedergegeben. In dieser Arbeit wurde des Weiteren ein Vorgang als Kombination zwischen den dynamischen numerischen Berechnungen und der pseudo-statischen Methode zur Bewertung der Standsicherheit von Böschungen unter dynamischer Einwirkung vorgeschlagen. Damit ließ sich ebenso ein realitätsnäher Standsicherheitsfaktor ermitteln.

Da die Anwendung der pseudo-statischen Methode bei den Böschungen aus wassergesättigten kohäsionslosen Böden problematisch ist, lassen sich solche Böschungen entweder mit Zentrifugenmodellen oder numerisch mit fortgeschrittenen Stoffmodellen untersuchen. In dieser Arbeit wurden Nachrechnungen von Zentrifugenversuchen durchgeführt. Es handelt sich um einen Erddamm aus einem wassergesättigten, dicht gelagerten Nevada Sand unter Erdbebeneinwirkung. Mit der numerischen Berechnung wurde das Dammverhalten qualitativ und quantitativ sehr gut abgebildet. Sowohl die Dammverschiebungen als auch der Aufbau des Porenwasserdrucks zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen. Weiterhin wurden mit den gleichen Bodenparametern zwei weitere Zentrifugenversuche unter Erdbebeneinwirkung nachgerechnet. Beide Modellversuche wurden mit einem locker gelagerten, wassergesättigten Nevada Sand durchgeführt. Bei einem Versuch wurde ein Erddamm und bei dem anderen eine Sandschicht untersucht. In den numerischen Nachrechnungen ließen sich sowohl die Verschiebungen als auch die Porenwasserdrücke in beiden Randwertproblemen realistisch abbilden.

Weiterhin wurde die Wirkung von Schottersäulen zur Verhinderung der Bodenverflüssigung numerisch untersucht. Zunächst wurden die Drainage- und die Aussteifungswirkung der Schottersäulen unabhängig voneinander betrachtet. Die Drainagewirkung ist vernachlässigbar, da sich während eines Erdbebens der Porenwasserdruck sehr schnell aufbaut. Wegen der hohen Steifigkeit der Schottersäulen wird zwar weniger Porenwasserdruck in den Boden aufgebaut. Die effektive Spannung nimmt jedoch trotzdem

unverhindert ab. Dies lässt sich damit begründen, dass die hohe Säulensteifigkeit zu einer Spannungsumlagerung in Richtung Säulen führt und ein Siloeffekt entsteht. Somit wird der Boden zum Teil von den Säulen getragen und die totale Spannung im Boden nimmt ab. In der 3D-Berechnungen ist dieser Siloeffekt deutlich geringer als in den 2D-Berechnungen. Nichtsdestotrotz zeigen sowohl die 2D- als auch die 3D-Berechnungen, dass die Säulensteifigkeit eine nur mäßige Wirkung zur Verhinderung der Bodenverflüssigung aufweist. In weiteren 3D-Berechnungen wurde der Einfluss der Säulenherstellung untersucht. Hierfür wurden Berechnungen mit erhöhter Bodendichte und Seitenspannung durchgeführt. Sowohl die Verdichtung als auch die Erhöhung der Seitenspannung verlangsamten den Porenwasserdruckaufbau bzw. die Abnahme der effektiven Spannung. Der Einfluss der Bodenverdichtung ist jedoch wesentlich höher. Weiterhin weist die Wirkung der Schottersäulen eine Abhängigkeit von der dynamischen Belastung auf. Die Bodenverflüssigung infolge eines kleinen Erdbebens wird verhindert, während sich die Verflüssigung infolge eines stärkeren Erdbebens nur um wenige Sekunden verzögert.

Abstract

The soil behavior under dynamic loading is very complex. However, in daily use it is often illustrated by means of simplified models. The validity of these models is very limited due to the stress and strain-dependent soil behavior. Alternatively, dynamic numerical calculations can be performed with advanced constitutive models which can represent soil behavior in a wide range of strain and stress. In this work it was investigated, to which extent the complex soil behavior can be reproduced using hypoplasticity. Furthermore, the important role of parameter determination was illustrated. In addition, an appropriate procedure for determining soil parameters was described.

First, the behavior of a dry sand layer under earthquake load was investigated numerically. The results of the calculations show that the acceleration amplification near the ground surface depends on the frequency and the amplitude of the basic acceleration. Furthermore, the calculated natural frequency and the corresponding amplification decrease with increasing acceleration amplitude. In addition, a centrifuge test on a tunnel embedded in sand under earthquake effects was numerically calculated. The calculated results show a satisfactory agreement with the experiment. The numerical calculation also revealed a dependency between the changes in the bending moments in the tunnel lining and the surface settlement of the surrounding soil.

Due to the complex soil behavior, the stability of slopes under earthquake loads poses a further challenge for the calculations. Firstly, it was examined, to which extent slope behavior can be represented with the frequently used pseudo-static method. For this purpose the pseudo-static analysis was carried out for a model earth dam examined in the centrifuge. The pseudo-static method predicts a deep seated sliding surface in contrast to the shallow sliding surface in the centrifuge test. However, for a shallow sliding surface, a very high stability safety factor was determined. With a numerical calculation using a hypoplastic material model considering the intergranular strains, the behavior of the earth dam could be reproduced qualitatively and quantitatively very well. Thus, the shallow sliding surface as well as the vertical and horizontal displacements were reproduced realistically. In this thesis, a combination of the dynamic numerical calculation and the pseudo-static method for assessing the stability of slopes under dynamic influence was proposed. So, a realistic stability safety factor can be determined.

The application of the pseudo-static method is problematic in case of slopes in saturated non-cohesive soil. These slopes can either be investigated with centrifuge models or numerically with advanced material models. In this work, numerical recalculations of centrifuge tests were carried out. It is an earth dam from a saturated Nevada sand under an earthquake effect. With the numerical calculation the dam behavior was reproduced qualitatively and quantitatively in a satisfactory manner. Both the dam displacements as well as the build-up of pore water pressure show a very good agreement with the measurements. Two further centrifuge tests were also carried out using the same soil parameters. Both model tests were conducted with a loose saturated Nevada sand. One test was carried out on an earth dam and the other on a sand layer. With the numerical calculations, both displacements and pore water pressures were reproduced realistically in both boundary value problems.

In addition the effect of stone columns to prevent soil liquefaction was studied numerically. First, the drainage and stiffening effects of stone columns were examined separately. The drainage effect has no significant influence because of the very rapid build-up of pore water pressure during the earthquake. Due to the high stiffness of the stone columns, less pore water pressure builds up in the soil. However, the effective stress continues to decrease unhindered. The high stiffness of the columns leads to a stress redistribution in the direction of the columns and a silo effect arises. In 3D calculations, the silo effect is significantly lower than in 2D calculations. The 2D and 3D calculations show that the column stiffness has a moderate effect to prevent soil liquefaction. In further 3D calculations, the influence of column installation was investigated. Calculations with increased soil density and lateral stress were carried out for this purpose. Both the compaction and the increase of the lateral stress slow down the build-up of pore water pressure and the decrease in effective stress. However, the impact of soil compaction is much higher. Furthermore, the effect of stone columns depends on the dynamic load. The soil liquefaction due to a small earthquake is prevented, while liquefaction due to a stronger earthquake is delayed only

by a few seconds.