

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
Fakultät Bauingenieurwesen

**Verformungsverhalten von Kippenböden mit
Multiporosität**

Deformation behaviour of multi-porosity soils in landfills

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

Dissertation

Vorgelegt von:

M.Sc. Xiusong Shi

Geb. am 27. August 1985 in China

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle

Prof. David Muir Wood

Ass. Prof. David Mašín

Verformungsverhalten von Kippenböden mit Multiporosität

von M.SC. Xiusong Shi

In einem Tagebau können die feinkörnigen Böden in unterschiedlichen Zustandsformen entstehen. Dies sind zum einen klumpige Böden mit einer granular ähnlichen Struktur (Pseudokornstruktur) und einer hohen Konsistenzzahl und zum anderen Mischungen aus mehreren Tonen oder Schluffen mit niedriger Konsistenzzahl. Der Zustand wird dabei massgebend von dem Transport (z.B. Länge des Förderbandes) und dem Ausgangszustand (z.B. der Anfangsscherfestigkeit) beeinflusst. Klumpige Böden entstehen bei der Abaggerung des natürlichen Materials auf der Abbauseite, welches eine hohe Festigkeit besitzt. Alle Böden werden normalerweise ohne Verdichtung verkippt, so entstehen bei der Verkippung von klumpigen Böden grosse Makro-Porenräume zwischen den Klumpen, welche sehr luft- bzw. wasser-durchlässig sind. Nach einiger Zeit entsteht eine neue Struktur aus den Klumpen und dem Material des sich von aussen auflösenden Klumpens, welches das Füllmaterial bildet. Wenn die Festigkeit des Ausgangsmaterials niedrig ist oder lange Transportwege stattfinden, zerfallen die Klumpen. Zudem werden die Böden von verschiedenen Schichten der Abbauseite unter einander gemischt, wodurch die Tongemische entstehen. Sowohl für die Dimensionierung und Berechnung der aus den Verkippungen entstehenden Tagebaurandböschungen sowie für eine spätere Nutzung des ehemaligen Tagebaugebietes ist die Kenntnis über das Deformations- und Verformungsverhalten von Kippenböden notwendig. Daher wurden in dieser Arbeit Tagebauböden und ihr zeitlich veränderliches Verhalten untersucht. Dabei werden diese, bezugnehmend auf den Anfangszustand, in drei typische Materialien unterschieden: (1) der frisch verkippte klumpige Boden, (2) eine Mischung aus Klumpen und Füllmaterial, welche höhere Liegezeiten repräsentierend und (3) Mischungen von feinkörnigen Ausgangsböden.

Zunächst wurden künstlich hergestellte klumpige Böden untersucht. Sie bilden eine Übergangsform zwischen aufbereiteten und natürlichen klumpigen Böden. Das Kompressions- und Scherverhalten sowie die Durchlässigkeit wurden an Ödometer und Triaxialversuchen bestimmt. Das Füllmaterial, welches die Makroporen zwischen den Klumpen füllt, spielt eine entscheidende Rolle für das Materialverhalten. Ähnlich wie bei den künstlich hergestellten klumpigen Böden schliessen sich auch bei den Böden im Tagebau die Makroporen bei niedrigen Spannungen. Dabei werden die Klumpen

umgelagert. Allerdings befindet sich die Grenze des Spannungszustandes oberhalb der Critical State Line des Füllmaterials, was möglicherweise mit den unter Diagenese entstandenen Bodenstrukturen erklärt werden kann.

Die Strukturänderung der klumpigen Böden kann aufgrund des Spannungsniveaus in drei mögliche Stufen unterteilt werden. Am Anfang ist die Kompressibilität der frischen verkippten Klumpen hoch, da sich die Makroporen bereits bei geringen Spannungen schliessen. Zu diesem Zeitpunkt sind auch die Durchlässigkeiten in erster Linie von den grossen Porenräumen der Makroporen, welche als Entwässerungspfade dienen, beeinflusst. Die Scherfestigkeit hingegen, wird durch die aufgeweichten Böden an den Oberflächen der Klumpen massgebend beeinflusst. Bei höheren Konsolidationsspannungen sinkt die Kompressibilität und der Boden verhält sich wie ein überkonsolidierter Boden. Obwohl die Struktur aufgrund der veränderten Klumpenoberflächen zu diesem Zeitpunkt homogener wirkt, ist die Struktur noch heterogen und die Durchlässigkeit ist höher als bei einem aufbereiteten Boden mit gleichem spezifischem Volumen (Porenzahl). Letztendlich erreicht der aktuelle Spannungszustand den der überkonsolidierten Klumpen und der gesamte Boden verhält sich wie ein normal konsolidierter Boden.

Des Weiteren wurden isotrop konsolidierte drainierte Triaxialversuche an künstlich aus zwei Ausgangsmaterialien hergestellten Proben mit parallelen und seriellen Strukturen durchgeführt. Die Laborversuche zeigten, dass die Proben mit seriellen Aufbau dieselben Gleitflächen haben, wie der Ausgangsboden mit der niedrigeren Scherfestigkeit. Die Gleitfläche der Proben mit parallelen Strukturen verlief durch beide Materialien. Es wurde festgestellt, dass die Scherfestigkeit der seriell aufgebauten Proben geringfügig höher, als die des Bodens mit der niedrigeren Scherfestigkeit ist. Die Scherfestigkeit der parallel aufgebauten Proben liegt zwischen den beiden Ausgangsmaterialien. Danach wurde das Verhalten der künstlich erzeugten klumpigen Böden mit zufällig verteiltem Füllmaterial mit Hilfe der Finiten Elemente Methode verglichen. Die Simulationen zeigten, dass unter einer isotropen Kompressionsbelastung das Spannungsverhältnis, definiert aus dem Verhältnis der Spannung des Volumendurchschnitts zwischen den Klumpen und dem Füllmaterial, deutlich durch die Volumenanteile und die Vorkonsolidierungsspannung der Klumpen beeinflusst wird. Während das Volumenverhältnis eine untergeordnete Rolle in den in Triaxialzellen unter Scherung belasteten Proben spielt. Aus den Simulationsergebnissen und den Laborversuchen der beiden Grundkonfigurationen wurde ein Homogenisierungsgesetz abgeleitet, welches die Sekandensteifigkeiten verwendet.

Das Kompressionsverhalten der Mischungen aus Klumpen und Füllmaterial mit Blick auf die Homogenisierung wurde analysiert. Zunächst kann das Volumen der Mischungen in 4 individuelle Komponentenanteile zerlegt werden. Die Makroporosität zwischen den Klumpen wurde zur Entwicklung der Volumenanteile des Füllmaterials eingeführt. Sie wurde als eine Funktion der totalen Porosität und der Materialien formuliert. Auf Grundlage einer theoretischen Analyse an klumpigen Böden und unter Zuhilfenahme einer numerischen Methode wird ein Gesetz zur Homogenisierung vorgeschlagen. Dieses enthält eine Beziehung zwischen der Tagentensteifigkeit der Klumpen und seinem Füllmaterial. Abschliessend wird ein einfaches Kompressionsmodell für die Mischung aus Klumpen und Füllmaterial vorgeschlagen, welches den Einfluss der Bodenstruktur und der Änderung des Volumenanteils des Füllmaterials berücksichtigt. Darüber hinaus wurde eine allgemeine Formulierung für das Konsolidationsverhalten der klumpigen Böden mit Füllmaterial vorgeschlagen, welche sich auf das Konzept der doppelten Porosität (Klumpen und Füllmaterial) und eine Homogenisierungstheorie bezieht.

Um das Verhalten der Klumpen bei niedrigen Spannungen zu beschreiben, wird eine neue Grenzbedingung unter Zuhilfenahme der äquivalenten Hvorslev-Spannung und des Critical State Konzeptes vorgeschlagen. Der Struktureffekt für sensitive Böden wurde in die nichtlineare Hvorslev-Oberfläche eingebaut. Das allgemein gültige Cam-Clay-Model von McDowell und Hau (2003) wurde um die nasse Seite des Critical State Konzeptes erweitert. Eine Sekandensteifigkeit, definiert aus dem Verhältnis zwischen der Deviatorspannung und der Deviatordehnung, wurde für das Homogenitätsgesetz ebenfalls verwendet. Abschliessend wird ein Modell für natürliche klumpige Böden vorgestellt, welches auch eine Homogenisierung beinhaltet.

Die physikalischen Eigenschaften, das Kompressionsverhalten und die undrainierte Scherfestigkeiten von aufbereiteten Tongemischen wurde im Labor unter Herstellung künstlicher Böden gemischt untersucht. Anschliessend wird ein Kompressions- und Schermodell für aufbereitete Tongemische vorgeschlagen. Das Modell der Scherfestigkeit der Tongemische entstand aus der Vereinfachung der Tongemischstruktur, in welcher die Elemente der Ausgangsmaterialien zufällig in dem Einheitsvolumen verteilt sind. Werden Wassergehaltsverhältnisse (das Verhältnis der Wassergehalte der Ausgangsmaterialien) definiert, kann die undrainierte Scherfestigkeit für alle Bestandteile separat geschätzt werden und dann über die Volumenanteile bestimmt werden. Ein Homogenisierungsgesetz wurde auf Grundlage der the-

oretischen Analyse von zufällig angeordneten Strukturen entwickelt. Ein einfaches Kompressionsmodell, welches N-Ausgangsmateriellen bzw. Tone und eine Homogenisierung enthält wird vorgeschlagen, welches an einer Mischung aus 2 Bestandteilen im Labor validiert wurde.

Abstract of the dissertation

Deformation behaviour of multi-porosity soils in landfills

by M.SC. Xiusong Shi

Two different soils may be generated from open-pit mining: lumpy soils with a granular structure and clay mixtures, depending on the length of the conveyor belt and the strength of the original soils. Lumpy soils may be created for a high strength of the excavated soils. They are dumped as landfills without any compaction, which permits the water and air flows via the inter-lump voids. As a result, a new structure consisting of the lumps and reconstituted soil within the inter-lump voids can be created. However, if the original soil has a low strength or a long transportation takes place, the material may disintegrate into small lumps and thoroughly mix soils from different layers. Landfills consisting of clay mixtures arise in this way. The stability and deformation of landfills are crucial for design of occupied area and landfill slopes. For this reason, three different landfill materials will be investigated in this thesis: (1) the lumpy granular soil from fresh landfills, (2) the lumpy composite soil corresponding to old landfills and (3) clay mixtures.

Firstly, an artificial lumpy soil was investigated. It is a transition form between the reconstituted and natural lumpy soils. Compression, permeability and strength of lumpy materials have been evaluated based on oedometer and triaxial tests. The shear strength of the normally consolidated lumpy specimens lies approximately on the Critical State Line of the reconstituted soil. The reconstituted soil, which exists in the inter-lump voids, plays a crucial role in the behaviour of artificial lumpy materials. Similarly to the artificial lumpy soil, inter-lump voids of the natural lumpy soil are mainly closed above a relatively small stress level, which is induced by the rearrangement of the lumps. However, its limit stress state is located above the Critical State Line of the reconstituted soil, which may be caused by the diagenetic soil structure in the natural lumps.

The structure transition of the lumpy granular material can be divided into three possible stages related to the stress level. Firstly, the compressibility of a fresh lumpy is relatively high due to the closure of the inter-lump voids within a low stress range. In this stage, the hydraulic conductivity is mainly controlled by the inter-lump skeleton due to the existence of macro drainage paths, while the shear strength is controlled by the reconstituted soil around the lumps. Afterwards, its compressibility decreases with the consolidation

stress and the soil behaves similarly to an overconsolidated soil. The clayfill appears to be uniform visually in this stage, but its structure is still highly heterogeneous and the hydraulic conductivity is higher than that of the reconstituted soil with the same overall specific volume. Finally, the loading reaches the preconsolidation stress of the lumps, and the whole soil volume becomes normally consolidated.

Isotropically consolidated drained triaxial shear tests were performed on artificially prepared specimens with parallel and series structures. The laboratory tests show that the specimens with the series structure have the same failure mode as the constituent with the lower strength; the specimens with the parallel structure have a failure plane which crosses both constituents. As a result, the shear strength of the series specimens is only slightly higher than that of the constituent with the lower strength and the strength of the parallel specimens lies between those of the constituents. Afterwards, the behaviour of an artificial lumpy material with randomly distributed inclusions is investigated using the Finite Element Method. The computation results show that the stress ratio, defined as the ratio of the volume-average stress between the lumps and the reconstituted soil within the inter-lump voids, is significantly affected by both the volume fraction and the preconsolidation pressure of the lumps under an isotropic compression path, while the volume fraction of the lumps plays a minor role under a triaxial compression path. Based on the simulation results and analysis of the two basic configurations, a homogenization law was proposed utilizing the secant stiffnesses.

The compression behavior of the lumpy composite soil was analyzed within the homogenization framework. Firstly, the volume of the composite soil was divided into four individual components. The inter-lump porosity was introduced to account for the evolution of the volume fractions of the constituents, and it was formulated as a function of the overall porosity and those of its constituents. A homogenization law was then proposed based on the analysis of the lumpy structure together with a numerical method, which gives a relationship for tangent stiffnesses of the lumpy soil and its constituents. Finally, a simple compression model was proposed for the composite lumpy material, which incorporates both the influence of the soil structure and the volume fraction change of the reconstituted soil. Furthermore, a general framework for the consolidation behaviour of the lumpy composite soil was proposed based on the double porosity concept and the homogenization theory.

To describe the behaviour of lumps with low stress level, a new failure line was proposed with help of the equivalent Hvorslev pressure and critical state concept. The structure effect was incorporated into the nonlinear Hvorslev surface within sensitivity framework and the generalized Cam clay model proposed by McDowell and Hau (2003) was adopted on the wet side of the critical state. A secant stiffness, defined as the ratio between the deviatoric stress and deviatoric strain, was used in the homogenization law. Finally, a simple model for the natural lumpy soil was proposed within the homogenization framework.

The physical properties, compression behaviour and remolded undrained shear strength of clay mixtures were investigated by reproducing the soils artificially in the lab. Afterwards, the models for the compression and undrained shear strength of clay mixtures were proposed. The model for the strength of the clay mixture originated from simplifying the structure of a clay mixture, in which the elements of the constituents are randomly distributed in a representative elementary volume. By defining a water content ratio (the ratio of water contents between the constituents), the undrained shear strength of each constituent was estimated separately and then combined together with corresponding volume fractions. A homogenization law was proposed afterwards based on the analysis of the randomly arranged structure. A simple compression model considering N constituents was proposed within the homogenization framework, which was evaluated by a mixture with two constituents.