



Doctoral Thesis

Modellierung der Baugrundverbesserung mit Schottersäulen

Author(s):

Weber, Thomas Michael

Publication Date:

2007

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005462206> →

Rights / License:

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 17321

Modellierung der Baugrundverbesserung mit Schotterssäulen

Abhandlung
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der
ETH Zürich

vorgelegt von
Thomas Michael Weber

Dipl.-Ing., Bauhaus-Universität Weimar

geboren am 13. Januar 1974
in Königs Wusterhausen, Deutschland

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. Sarah M. Springman
Prof. Dr. Helmut F. Schweiger
Prof. Dr. Jitendra Sharma
Dr. Jan Laue

Zürich 2007

Kurzfassung

Weiche, feinkörnige Böden bergen als Baugrund eine Reihe geotechnischer Probleme. Neben einer hohen Kompressibilität weisen sie oft eine niedrige Scherfestigkeit auf. Durch ihre geringe Durchlässigkeit zeigen sie auch ein stark zeitabhängiges Verhalten. Im Rahmen von Infrastrukturbauten, z.B. Bahn- oder Strassendämmen, auf solchem Untergrund, ist mit grossen, über viele Jahre eintretenden Setzungen zu rechnen, die die Grenzwerte der Gebrauchstauglichkeit überschreiten können. Ferner ist die Tragfähigkeit nur mit Zusatzmassnahmen zu gewährleisten. Bei solchen Gegebenheiten sind Baugrundverbesserungsmassnahmen erforderlich. Hier bietet sich die Bodenverbesserung mit Schottersäulen an. Die drei Hauptaufgaben bestehen in der Erhöhung der Steifigkeit und der Scherfestigkeit des Untergrundes sowie der Beschleunigung der Konsolidation des feinkörnigen Bodens. Damit wird eine Reduktion der Setzungen erreicht, die zeitlich rascher eintreten, und die Sicherheit gegen Grundbruch bzw. Böschungsversagen wird erhöht. Eines der gebräuchlichsten Verfahren zur Herstellung von Schottersäulen ist die Rüttelstopfverdichtung.

Über die Jahre wurden verschiedene Berechnungsverfahren für Schottersäulen mit unterschiedlichen Ansätzen und Annahmen entwickelt. Prinzipiell unterteilen sich die Bemessungsverfahren in Verfahren zur Berechnung der Tragfähigkeit und in Verfahren zur Berechnung der zu erwartenden Setzungen. Aufgrund des komplexen Tragverhaltens von Schottersäulen basieren diese Berechnungsverfahren auf empirischen Ansätzen und vereinfachten Annahmen. Verschiedene Phänomene, wie z.B. der Einfluss des Säulenherstellungsprozesses auf die Bodeneigenschaften, Setzungsdifferenzen zwischen Schottersäulen und umgebendem Erdboden bei schlaffen Lasten und das Verhalten von Säulengruppen, werden in einer derartigen Berechnung überhaupt nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. An dieser Stelle soll mit der vorliegenden Arbeit ein Beitrag geleistet werden, das Tragverhalten von Schottersäulen unter einer Dammlast besser zu verstehen und die bislang in der Berechnung vernachlässigten Einflüsse in die Betrachtung einzubeziehen.

Den Hauptbestandteil der vorliegenden Arbeit bilden kleinmassstäbliche Modellversuche in einer geotechnischen Trommelzentrifuge mit einem künstlichen Schwerfeld von 50-facher Erdbeschleunigung. Das Tragverhalten der Schottersäulen wird im Gebrauchszustand untersucht. Für eine realitätsnahe Modellierung der Baugrundverbesserung ist es notwendig, die Schottersäulen bei rotierender Zentrifuge einzubauen. Durch den verdrängenden Einbauprozess der Rüttelstopfverdichtung finden im Boden Spannungsumlagerungen und Strukturänderungen statt, die einen Einfluss auf das Tragverhalten der Schottersäulen haben. Zu diesem Zweck wird ein Schottersäuleninstallationswerkzeug für die Trommelzentrifuge entwickelt, welches das Verfahren der Rüttelstopfverdichtung als Vorbild hatte. In zwei umfangreichen Versuchsserien werden Tonmodelle in einem Versuchscontainer und im Trommelkanal getestet. Während des Versuches wird kontinuierlich der Porenwasserdruck im Ton und Setzung an der Modelloberfläche gemessen. Anhand der Entwicklung des Porenwasserdrucks lässt sich eine Aussage über die Spannungsänderung im Boden während des Säuleneinbaus treffen und in Verbindung mit der Zeitsetzung nach dem Dammeinbau auch eine Analyse des Konsolidationsverhaltens des Säulenrasters vornehmen. Im Nachgang zu den Zentrifugenversuchen werden mittels Elektronenmikroskopie, Quecksilber-Druckporosimetrie und Röntgentomographie Untersuchun-

gen am Tonmodell vorgenommen, die Aussagen über die Strukturänderung des Tons in der Schottersäulenumgebung durch den Einbauprozess liefern.

Ergänzend zu den Zentrifugenmodellversuchen werden numerische Analysen mit der Methode der finiten Elemente (FEM) durchgeführt. Die FE-Berechnungen werden an einem axialsymmetrischen Modell der Einheitszelle sowie an einem zweidimensionalen Modell einer Dammschüttung im ebenen Verzerrungszustand vorgenommen. Die numerische Berechnung bietet eine Hilfestellung, Prozesse zu erkennen, die aufgrund der beschränkten Messtechnik in der Zentrifuge schwierig identifizierbar sind. Durch die Simulation des Einbauprozesses der Schottersäule in der FE-Analyse gelang eine gute Wiedergabe des Verhaltens der Zentrifugenmodelle.

Anhand der Ergebnisse der Zentrifugenversuche lässt sich feststellen, dass die Spannungsgeschichte des Tonbodens einen starken Einfluss auf den Faktor der Bodenverbesserung ausübt. Das Tonmodell mit höherem Überkonsolidationsverhältnis (OCR) und steiferem Verhalten zeigt hierbei einen geringeren Verbesserungsgrad im Vergleich zum Ton mit geringerem OCR. Durch den Einbauprozess der Schottersäulen steigt der Porenwasserdruck im Ton stark an, was nach einer Rückrechnung mittels Hohlraum-Expansions-Theorie in weiten Bereichen des Bodens einen passiven Versagenszustand hervorruft. Der Einbauprozess der Schottersäulen führt zu einer Verdichtung des Tonbodens in der Säulenumgebung, welche durch die Volumenbilanz von gemessenen Hebungen an der Modelloberfläche und eingebauter Säulensandmenge sowie auf der Grundlage der Dichtemessung mittels Quecksilberdruckporosimetrie nachgewiesen werden kann. Ferner wird durch Elektronenmikroskopie eine Störzone mit reduzierter Durchlässigkeit identifiziert. In direkter Säulenumgebung erfahren die Tonpartikel eine Neuorientierung und verringern damit die Drainagewirkung der Schottersäulen. Durch die Verdichtung des Tons findet ebenfalls eine Reduktion der Durchlässigkeit statt. Der Einflussbereich der Störzone umfasst etwa den doppelten Säulendurchmesser. Die Beeinträchtigung des Drainageverhaltens lässt sich anhand der Konsolidationszeiten im Zentrifugenmodell quantifizieren, da die im Versuch bestimmten Werte stark von den theoretisch idealen Drainagebedingungen abweichen.

Die Ergebnisse der numerischen Berechnung bestätigen und ergänzen die Resultate der experimentellen Zentrifugenmodellierung. Bei der rechnerischen Simulation des Schottersäuleneinbaus steigen die horizontalen Spannungen in der Säulenumgebung an. Es werden Erddruckbeiwerte bis 2.5 ermittelt, die mit den rückgerechneten Werten aus den Zentrifugenversuchen vergleichbar sind. Ferner wird gezeigt, dass der Faktor der Bodenverbesserung lastabhängig ist und bei zunehmender Belastung sinkt. Der Betrag der Spannungskonzentration in den Schottersäulen ist sowohl last- als auch tiefenabhängig. Bei grossen Lasten stellt sich eine konstante Spannungskonzentration über die Tiefe mit Werten zwischen 2.5 und 4 ein. Flächenverhältnisse a_s bis 30% haben einen untergeordneten Einfluss auf die Spannungskonzentration in den Säulen. Für die Berechnung des Zeitsetzungsverhaltens ist die Annahme einer Störzone mit reduzierter Durchlässigkeit wichtig, da die zeitabhängigen Verformungen stark von den Drainagebedingungen beeinflusst werden.

Abschliessend wird ein Vergleich der Zentrifugenergebnisse mit Resultaten ausgewählter analytischer Berechnungsverfahren durchgeführt. Die Ergebnisse weisen starke Differenzen auf, die durch unterschiedliche vereinfachte Annahmen in den Berechnungsmethoden begründet sind. Die besten Übereinstimmungen konnten mit den Verfahren nach Balaam & Booker (1981) und Priebe (1995a) erzielt werden.

Abstract

Building structures on soft and fine-grained subsoil can cause several geotechnical problems. These clays exhibit high compressibility as well as low shear strength. Due to their low permeability, they also show very strong time dependent behaviour. When building infrastructure such as road or rail embankments, significant settlements are likely to occur over a long period of time and these may exceed the serviceability limit state. Also, there is a high potential for slope failure without countermeasures to increase the stability. Ground improvement is needed under such circumstances. One common method of ground improvement is the construction of granular columns in the soft soil. The main objectives of stone columns are to increase the stiffness and shear strength of the subsoil, and to accelerate the consolidation processes. Because of this, reduction in settlement can be achieved and over a shorter period time. The degree of safety against bearing failure is also increased. One of the more conventional construction methods of stone columns is the vibrodisplacement technique.

Over the years, a variety of calculation methods for stone columns has become available using different assumptions and analytical approaches. The methods are divided into the calculation of bearing capacity or slope stability, and the calculation of deformations. Due to the complex bearing behaviour of stone columns and their interaction with the structure and the surrounding soil, the calculation methods are based on simplified analytical and empirical approaches. Several phenomena are not taken into account, such as the effects resulting from column installation, settlement differences between stone columns and surrounding soil under flexible loads, and group behaviour of a grid of stone columns. The intention of the work presented is a contribution to research in order to deepen understanding of the processes occurring and to investigate their effects on the bearing behaviour of stone columns that are not taken into account in the current design methods.

The main part of this work was the execution of model tests in the drum centrifuge under an artificial acceleration field of 50 times gravity. The objective of the tests was the investigation of stone column behaviour under working load. In order to simulate realistic behaviour, the stone columns need to be installed in-flight. This is because there are significant changes in stress state and structure of the clay caused by the construction method for the stone columns. In the first phase, a stone column installation tool for the drum centrifuge was developed, which should reproduce the vibrodisplacement method at model scale. Two extensive test series were performed; one using a small test container, and the other conducted by filling the whole drum channel with a clay model. Pore water pressures and surface settlements were measured continuously throughout the whole test. Using these data, information about the stress changes during column installation and the consolidation behaviour after embankment construction could be derived. After completion of the centrifuge tests, samples were taken from the clay models and examined by means of electron microscopy, mercury intrusion porosimetry and X-ray tomography, to investigate the changes in clay structure in the vicinity of the column caused by installation.

Supplementary to the centrifuge tests, numerical analyses were performed using the finite element method. The calculations were conducted using an axisymmetric model simulating a unit cell in a stone column, as well as a two dimensional plane strain model of an embankment. Numerical modelling helps to identify processes that

are difficult to detect in centrifuge tests because of the limitations of measuring techniques. By simulating the construction process of a stone column, it was possible to reproduce the centrifuge model behaviour.

Results from the centrifuge model test show that the clay behaviour is strongly dependent on the stress history of the soil. This also influences the response to loading perturbations on ground improved with stone columns. The soil model with a higher over consolidation ratio (OCR) shows greater stiffness and a smaller factor of settlement reduction in comparison to the model with a lower OCR and softer behaviour. Pore water pressures in the clay increase substantially during the construction process of the stone columns. From back calculation of these stress changes using cavity expansion theory, it can be shown that large areas of clay surrounding the stone columns are close to a passive failure state. The clay was shown to have been compacted around the columns, firstly with a volume balance of inserted sand against surface heave of the model, and secondly with density measurements using mercury intrusion porosimetry. Furthermore, a smear zone of reduced permeability in the clay surrounding the columns could be identified. A reorientation of the clay particles in direct contact with the stone column was observed from electron microscopy. Together with the compaction and higher density of the clay around the columns, the permeability was reduced decreasing the drainage performance of the improved soil. The area influenced by the smear zone measures about double the column diameter. The amount of disturbance to the consolidation process caused by the smear zone can be analysed by comparison with ideal drainage conditions within the column grid.

The results from numerical analysis corroborate and complete the centrifuge modelling results. The stress changes in the soil can be investigated by simulation of the construction process of stone columns. The coefficient of earth pressure was calculated as maximum of 2.5 which is consistent with the centrifuge results. Furthermore, the factor of settlement reduction is strongly load dependent. With increasing load the factor of settlement reduction decreases. The stress concentration in the stone columns is load dependent but also dependent on soil depth. Small loads give stress concentrations up to 8, which decrease with depth, while high loads result in a constant distribution of stress concentration over depth with values between 2.5 and 4. The area ratio of ground improvement has only a minor influence on the stress concentration in the stone columns. To analyse time settlement behaviour, it is of great importance to model the smear zone around stone columns, because the deformation behaviour is strongly dependent on the drainage conditions.

Finally, calculations with selected analytical design methods were performed in order to compare the results with centrifuge test data. It can be shown that the factor of settlement reduction determined varies considerably depending on the design method applied due to the different assumptions and models used by these methods. The best agreement was found using Balaam & Booker's (1981) method. Priebe (1995a) also gave a good correlation, but this was found to lie on the more conservative side.