

Doctoral thesis ETH No. 16512

Non-linearity and small strain behaviour in lacustrine clay

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCE OF ETH ZURICH

presented by

SOPHIE MESSERKLINGER

Dipl.-Ing. TU Graz

born 23.09.1977

citizen of Austria

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Sarah Marcella Springman, examiner

Prof. Dr. Helmut Schweiger, co-examiner

2006

Abstract

The pre-failure stress-strain behaviour of post-glacial lacustrine soils was investigated through an extensive triaxial testing programme conducted on natural block samples of Kloten clay. A detailed study of the role of stress path history and anisotropy on the non-linear elasto-plastic stiffness behaviour was performed.

Distinct horizontal stratification of clay and silt layers, due to the annual fluctuation in the deposition mode in lakes, is typical for lacustrine deposits. This inherent anisotropy of the subsoil influences its mechanical behaviour significantly. Consequently, natural block samples were taken using a newly developed tube with a design based on extensive literature studies and testing programmes.

Pre-failure stress-strain behaviour was investigated in the triaxial apparatus with a novel measurement system, specifically designed to perform direct measurements of axial and radial displacements. Two miniature submersible LVDT's are fixed directly onto the soil specimen with a pair of mountings for the axial displacement measurement. This device is capable of recording displacements accurate to within 5 microns, corresponding to 0.01 % axial strain, over a range of 14 %. The radial displacement measurement is accomplished by a newly designed laser scanning device consisting of three lasers mounted inside the triaxial cell around the test specimen. This device is moved in the axial direction over the entire specimen height and provides the absolute and relative radial sample dimension during the test performance, determined without contact, with an accuracy of 10 microns, which corresponds to 0.04 % radial strains over a range of 20 %. A circular slice approach is proposed for the calculation of the specimen volume from the laser scan data.

A multi-stage stress path test programme was conducted in which each specimen was one-dimensionally reconsolidated beyond the in-situ pre-consolidation stress

state and permitted to swell back along this stress path to an over-consolidation ratio of two before the drained probing stress path, with a stress ratio varying according to the specimen, was applied. Therewith, the non-linear elasto-plastic stiffness behaviour, within the entire triaxial stress space, was observed and analysed by means of kinematic hardening theory, establishing the existence, shape and extent of kinematic yield surfaces and the bounding surface from examination of the shear and volumetric stress-strain curves.

The analyses of the experimental test results from the probing stress path showed non-congruent elliptical shapes for the history and the yield surface, with a proportion of around 6 on the longitudinal axis. With the application of an anisotropic elastic stiffness matrix, modified for use in the triaxial stress space, the ratio of the axial to the radial stiffness was determined as 1.7. Bender element measurements provided the reference values for the small strain elastic shear stiffness. Plastic strain vectors were evaluated and indicated that associated flow rules are mostly valid for the history and yield surfaces.

The evaluation of the laser scan data highlighted the different behaviour of silt and clay layers in the natural lacustrine clay specimens. Investigation of the development of necking in extensional shear tests showed that necking develops after the peak failure stress was reached and confirmed the applicability of a cylindrical specimen shape up to failure for data evaluation.

The introduction of these findings into geotechnical design, especially for serviceability limit state (SLS), is performed by Finite Element simulations applying the following constitutive models: Modified Cam Clay, 3-SKH, S_CLAY1 and Soft Soil. Comparison of the simulations to the test results showed that each model has preferential stress ratios where they perform best but none of the models is capable of simulating the deformation response of the entire stress space. The location of the yield state influences the quality of the deformation predictions significantly next to the definition of the plastic potential. However, further investigations are necessary in order to formulate the stress-strain response observed for lacustrine clays into a constitutive model that will be universally applicable for the simulation of boundary value problems in the everyday design of Swiss engineers.

Zusammenfassung

In diesem Forschungsprojekt wurde das Verformungsverhalten von nacheiszeitlichen feinkörnigen Gletscherablagerungen untersucht. Dabei wurde vor allem auf den Einfluss der Spannungsgeschichte und der natürlichen Anisotropie auf das nichtlineare elasto-plastische Steifigkeitsverhalten eingegangen. Dafür wurden drainierte triaxiale Spannungspfadversuche an Seebodenlehmproben von Kloten durchgeführt. Seebodenlehm ist aufgrund seiner Entstehungsgeschichte aus wechselnden Lagen von dünnen Silt- und Tonschichten aufgebaut. Deshalb wurden für diese Untersuchungen natürliche Blockproben verwendet, die mit einem speziell dafür entwickelten Probenrohr entnommen wurden.

Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein triaxialer Versuchsapparat entwickelt, mit dem die axialen und radialen Verformungen direkt an der Bodenprobe gemessen werden können. Die axiale Dehnungsmessung erfolgte mit einem Wegaufnehmer (LVDT), der mit zwei Halterungen an der Probe fixiert war und eine Messgenauigkeit von 5 Mikrometer erreichte, was einer axialen Dehnungsgenauigkeit von 0.01 % entspricht. Für die radiale Verformungsmessung wurden drei wasser- und druckdicht verpackte Laser in der Versuchszelle an einer gemeinsamen Platte montiert, die in vertikaler Richtung bewegt werden kann und die Oberfläche der Probe mit einer Genauigkeit von 10 Mikrometer, oder 0.04 % radialer Dehnung, berührungsfrei über die gesamte Probenhöhe scannt. Für die Bestimmung des Probenvolumens aus den Laserscanndaten wurde ein Kreisscheiben-Ansatz verwendet.

Mit diesem Apparat wurden drainierte Spannungspfadversuche durchgeführt. Dabei wurden die Proben bis zu einem Spannungszustand über den In-situ-Spannungen eindimensional konsolidiert und anschliessend entlang desselben eindimensionalen Spannungspfads drainiert entlastet, bevor der drainierte

Versuchsspannungspfad auf die Probe aufgebracht wurde. Mit diesem Versuchsprogramm war es möglich, das nicht-linear elasto-plastische Steifigkeitsverhalten im gesamten triaxialen Spannungsraum zu untersuchen. Die Auswertung wurde unter Anwendung der kinematischen Verfestigungstheorie durchgeführt, wobei die Lage, Grösse und Form der kinematischen Flächen und der Fliessfläche durch Evaluierung der deviatorischen und volumetrischen Spannungs-Dehnungskurven ermittelt wurde.

Die Auswertung ergab eine nicht-kongruente, elliptische Form der Fliessfläche und der kinematischen Fläche, die aus dem Einfluss der Spannungsgeschichte resultiert, mit einem Grössenverhältnis von circa 6. Mit der Einführung einer modifizierten anisotropen Steifigkeitsmatrix wurde das Verhältnis von axialer zu radialer Steifigkeit mit 1.7 ermittelt. Die elastische Schersteifigkeit wurde mit Benderelementen gemessen. Die Evaluation der plastischen Dehnungsvektoren zeigte, dass eine assoziierte Fliessregel sowohl das Dehnungsverhalten an der Fliessfläche als auch an der Fläche der Spannungsgeschichte gut repräsentiert.

Die Auswertung der radialen Probenverformung aus den Lasermessungen hob das unterschiedliche Verformungsverhalten der einzelnen Ton- und Siltschichten hervor. Die Untersuchung der Entwicklung des Einschnürungsbereiches von Proben, die in Extension abgeschert wurden, zeigte, dass sich die Einschnürung erst nach dem maximalen Versagens-Spannungszustand ausbildet und somit die Datenauswertung unter Annahme einer zylindrischen Probenform anwendbar ist.

Die Überführung dieser Erkenntnisse in die geotechnische Bemessung der Gebrauchstauglichkeit wurde mit der Finite-Element-Methode erreicht, wobei Simulationen mit folgenden Stoffgesetzen durchgeführt wurden: Modified Cam Clay, 3-SKH, S_CLAY1 und Soft Soil. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Versuchsergebnissen zeigte, dass es für jedes Modell Spannungsbereiche gibt, in denen das Verformungsverhalten gut simuliert wird, aber kein Modell in der Lage ist, das Verformungsverhalten im gesamten Spannungsraum mit akzeptabler Genauigkeit zu simulieren. Für die Einbindung des ermittelten Verformungsverhaltens in ein Stoffgesetz mit dem Ziel, alltägliche geotechnische Gebrauchstauglichkeitsbemessungen in Seebodenlehm durchzuführen, ist noch einiges an Forschungsarbeit notwendig.