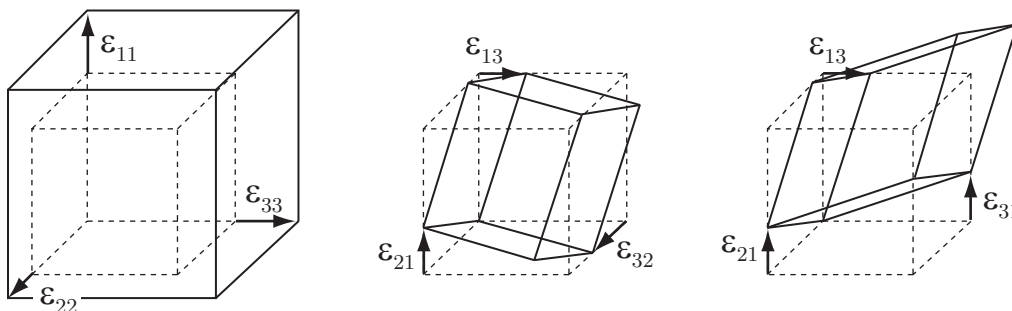


VERÖFFENTLICHUNGEN

des Grundbauinstitutes
der Technischen Universität Berlin
Herausgegeben von S.A. Savidis

HEFT 66

Zum Verhalten von Sand unter zyklischer
Beanspruchung mit Polarisationswechsel im
Einfachserversuch



Viet Hung Le

Berlin 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2015

Adresse des Instituts:

Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik - Degebo
Technische Universität Berlin
Skr. TIB1-B7
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin

Telefon: (030) 314-72341
Telefax: (030) 314-72343
E-Mail: info@grundbau.tu-berlin.de
Internet: <http://www.grundbau.tu-berlin.de>

Das Titelbild ist der Abbildung 2.2 entnommen.

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4081-4
ISSN 0342-3905

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Dissertation

**Zum Verhalten von Sand unter zyklischer
Beanspruchung mit Polarisationswechsel im
Einfachserversuch**

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Viet Hung Le
aus Ha Tay, Vietnam

An der Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt
Technische Universität Berlin
zur Erlangen des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stavros Savidis
Prof. Dr.-Ing. Frank Rackwitz
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Theodoros Triantafyllidis
Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 23.03.2015

Berlin 2015
D83

Vorwort des Herausgebers

Die sichere und wirtschaftliche Dimensionierung zyklisch beanspruchter Gründungen stellt für die planenden Ingenieure eine enorme Herausforderung dar. Bisher muss in der Praxis meist auf empirische Bemessungsmodelle zurückgegriffen werden. Diese Modelle haben jeweils einen sehr eng begrenzten Einsatzbereich, weil sie auf Korrelationen aus speziellen Labor- oder Modellversuchen beruhen. Komplexe geotechnische Strukturen können damit kaum abgebildet werden.

Eine vielversprechende Alternative stellt die Finite-Elemente-Methode (FEM) dar. Mit ihr können auch komplexe Randbedingungen und Bauwerksgeometrien modelliert werden. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Bodens muss im FE-Modell durch leistungsfähige Stoffgesetze abgebildet werden. Im Hinblick auf Stoffgesetze für hochzyklische Vorgänge mit mehreren zehntausend Lastzyklen besteht aktuell noch immenser Forschungsbedarf. Dazu leistet die Dissertation von Herrn Dr.-Ing. V. H. Le einen wichtigen Beitrag.

In der Arbeit wird der Frage nachgegangen, inwiefern sich die Änderung der Belastungsrichtung auf das zyklische Verhalten von Sand auswirkt. Diesbezüglich wurden umfangreiche experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt. Herr Dr.-Ing. Le erweiterte ein Einfachschergerät so, dass die Richtung der zyklischen Belastung im Laufe des Versuches geändert werden konnte, was einem sogenannten Polarisationswechsel entspricht. So konnte der Einfluss einer Vielzahl von Faktoren wie der Lagerungsdichte, der Amplitude oder der mittleren Spannung auf die Entwicklung der akkumulierten Dehnung unter einem Polarisationswechsel untersucht werden. Dabei konnten neue Erkenntnisse über das zyklische Verhalten von Sand gewonnen werden.

Der zweite Schwerpunkt der Arbeit bestand darin, das hochzyklische Akkumulationsmodell (HCA-Modell) weiterzuentwickeln. Anhand der Ergebnisse der Laborversuche wurde der Ansatz des HCA-Modells zur Berücksichtigung von Polarisationsänderungen erweitert. Anschließend wurde das erweiterte Modell im FE-Programmsystem ANSYS implementiert und durch Nachrechnung von Versuchsspuren validiert. Hierbei konnte eine sehr gute Übereinstimmung der Simulationen mit den Versuchsergebnissen erzielt werden.

Insgesamt ist der Ansatz, den Herr Le aufzeigt, ausgesprochen vielversprechend. Er sollte in weiteren Forschungsarbeiten experimentell und theoretisch intensiv weiterverfolgt werden.

Stavros A. Savidis
Berlin, September 2015

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand zwischen 2010 und 2014 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik - Degebo an der Technischen Universität Berlin.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. S. Savidis und Herrn Professor Dr.-Ing. F. Rackwitz für den Vorschlag des interessanten Themas meines Promotionsvorhabens sowie für die Betreuung und Unterstützung während der Bearbeitung. Für das Interesse an meiner Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. T. Triantafyllidis. Für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. Y. Petryna danken.

Ich bedanke mich ganz herzlich bei meinen Kollegen für die freundschaftliche und produktive Zusammenarbeit sowie für die große Hilfsbereitschaft und die persönliche Unterstützung. Herrn Dr.-Ing. R. Glasenapp möchte ich für die fachliche, konstruktive Diskussion und die Motivation während der gesamten Dauer meiner Promotion danken. Herrn M.Sc. C. Carow und Herrn Dr.-Ing. D. Aubram danke ich für die Einarbeitung in die Programmierung und für die fachliche Diskussion. Ich bedanke mich bei Herrn B. Grzedzinski, Herrn H. Podeswa und den anderen Labormitarbeitern für die Unterstützung bei den Laborversuchen und für eine gute, freundschaftliche Arbeitsatmosphäre.

Für die zur Verfügung gestellten Berechnungsalgorithmen möchte ich Herrn Dr.-Ing. Habil. A. Niemunis besonders bedanken. Für die Begleitung während meines Studiums und die Zeit danach sowie für die persönliche Unterstützung danke ich ganz herzlich Herrn Dr.-Ing. D. Struck. Herrn Dipl.-Ing. C. Greis danke ich für das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern und meinen Schwiegereltern für das Verständnis und die Geduld sowie für das Vertrauen in mich. Über allem danke ich meine Frau, die mich jederzeit in allen Belangen unterstützt und mich durch alle Höhen- und Tiefpunkte begleitet hat, ohne ihre große Unterstützung hätte ich diese Arbeit nicht fertigstellen können.

Viet Hung Le
Berlin, September 2015

Kurzfassung

Das Verhalten von Boden unter zyklischer Beanspruchung ist sehr komplex. Neben der bleibenden Verformung aus dem statischen Lastanteil kommt bei der zyklischen Belastung noch eine akkumulierte Verformung dazu, die aus den nicht vollständig geschlossenen Spannungs-Dehnungsschleifen resultiert. Die Akkumulationsdehnung ist von der Dehnungsamplitude, vom mittleren Spannungszustand und der Porenzahl abhängig. Darüber hinaus kommt jedoch der Richtung der Belastung erhebliche Bedeutung zu. Eine Änderung der Belastungsrichtung beansprucht den Boden zusätzlich. Das ist generell ein dreidimensionales Problem, welches jedoch bisher bei Laboruntersuchungen sowie Bemessungs- und Simulationsansätzen meistens auf eine zweidimensionale Fragestellung reduziert worden ist.

Zur Untersuchung des zyklischen Bodenverhaltens wurde ein umfangreiches Laborprogramm mit Triaxial- und Einfachscherversuchen durchgeführt. Dabei wurde das Bodenverhalten unter Einwirkung der multidirektionalen Belastung in einem umgebauten Einfachschengerät mit veränderbarer Scherrichtung untersucht. Der Einfluss der Polarisationsänderung auf das Verformungsverhalten von Sand stand im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit.

Für die FE-Berechnung von Randwertproblemen unter hochzyklischer Belastung ist das explizite Akkumulationsmodell (HCA-Modell) sehr gut geeignet. Dabei wird die Akkumulationsdehnung infolge einer zyklischen Belastung explizit berechnet. Dadurch wird der Rechenaufwand und der aufsummierte Fehler des Rechenalgorithmus weitgehend reduziert. Die Ansätze für die Berechnung der akkumulierten Dehnung beim HCA-Modell werden anhand der Ergebnisse der Triaxialversuche kalibriert. Für die Überprüfung dieser Ansätze werden die unidirektionalen Einfachscherversuche nachgerechnet.

Im HCA-Modell wird die Änderung der Polarisierung über eine Teilfunktion berücksichtigt. Im Falle eines Polarisationswechsels erhöht diese die Akkumulationsrate um einen aus der Teilfunktion sich ergebenden Faktor, welche anhand von Laborversuchen modifiziert wurde. Die Validierung des HCA-Modells erfolgt durch die Nachrechnung der multidirektionalen Einfachscherversuche. Dafür wird das Modell im FEM-Programm ANSYS[®] implementiert.

Schlagerworte: *zyklisches Verhalten; Akkumulation; multidirektionale Belastung; multiaxiale Belastung; explizites Akkumulationsmodell; HCA-Modell; multidirektionaler Einfachscherversuch; Labortechnik; Bodenmechanik; Polarisierung; Polarisationswechsel*

Abstract

The behaviour of soil under cyclic loading is very complex. In addition to the plastic deformation due to the static load component cyclic loading will cause further accumulating deformations. This is the result of not exactly overlapping stress-strain-hysteresis. The accumulated strain is depending upon the strain amplitude, average cyclic stress and void ratio. Further to this, the direction of cyclic loading is very important as this has a significant effect on the plastic deformation of the soil. Although this is a three dimensional problem laboratory testing as well as design and simulation approaches have often been simplified to be a two dimensional problem.

In order to research the soil behaviour under cyclic loading further, an extensive laboratory program with a large number of triaxial and simple shear tests has been undertaken. A specially modified simple shear testing apparatus was used to investigate the cyclic behaviour of the soil under multi directional loading. Within this testing program, the direction of polarization and the deformation behaviour of sandy soils have therefore been thoroughly researched in this present research work.

For the numerical investigation of boundary value problems und high-cyclic loading the Hight Cyclic Accumulation model (HCA-Model) has proven to be adequate. The accumulated strain due to the cyclic loading was explicitly computed. This ensures that the computing time and the cumulative error is kept as small as possible. The computation of the accumulated strain with the HCA-Model was calibrated using the results of triaxial tests. Unidirectional simple shear tests have been used to validate the obtained results.

In the HCA-Model the change in polarization is accounted for within a function. In case of a change in polarization the increase in the rate of accumulation is determined by a factor obtain in this function. This factor in turn was calibrated in a number of laboratory tests. The process of validation of the HCA-model was done by recalculation the performed multi directional simple shear test. This was done by implementing the HCA-Model into the FEM-Program ANSYS[®].

Key words: *cyclic behaviour; accumulation; multi directional loading; multi axial loading; explicit accumulation model; HCA-Model; multi directional simple shear test; laboratory technique; soil mechanics*

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	v
Vorwort des Autors	vii
Kurzfassung	ix
Abstract	xi
Inhaltsverzeichnis	xiii
Abbildungsverzeichnis	xvi
Tabellenverzeichnis	xxiv
Symbolverzeichnis	xxvii
1 Einführung	1
1.1 Motivation und Ziele der Arbeit	1
1.2 Gliederung der Arbeit	2
2 Definitionen	5
2.1 Spannungen und Dehnungen im dreidimensionalen Raum	5
2.2 Triaxialversuch	7
2.2.1 Spannungen im Triaxialversuch	7
2.2.2 Dehnungen im Triaxialversuch	9
2.3 Einfachscherversuch	10
2.3.1 Spannungen im Einfachscherversuch	10
2.3.2 Dehnungen im Einfachscherversuch	11
2.4 Resonant Column Versuch	13
2.5 Porenvolumen	14
2.6 Begriffe	14
2.6.1 Zyklische und dynamische Belastung	14
2.6.2 Hochzyklische und polyzyklische Belastung	15
2.6.3 Wechsellast und Schwelllast	15
2.6.4 Unidirektionale und multidirektionale Belastung	15
2.6.5 Polarisation	18
3 Stand der Forschung	19
3.1 Bodenmechanische Elementversuche mit zyklischen Belastungen	19
3.1.1 Torsionsscherversuch an Hohlzylinderproben	20

3.1.2	Triaxialversuch an zylindrischen Proben	21
3.1.3	Echter Triaxialversuch an kubischen Proben	21
3.1.4	Rahmenscherversuch	22
3.1.5	Rütteltischversuch	22
3.1.6	Resonant Column Versuch	22
3.1.7	Einfachscherversuch	24
3.2	Zyklisches Bodenverhalten unter unidirektionaler Belastung	25
3.2.1	Intensität der Akkumulation	25
3.2.2	Akkumulationsrichtung ω	30
3.3	Bodenverhalten unter multidirektionaler Belastung	33
3.3.1	Versuche unter undrännierter Bedingung	33
3.3.2	Versuche unter drännierter Bedingung	35
3.3.3	Modellversuche	38
3.4	Ansätze zur Abschätzung der Bodenverformung	39
4	Testgeräte und Versuchsdurchführung	41
4.1	Triaxialversuch	41
4.1.1	Testgerät	41
4.1.2	Probenpräparation	43
4.1.3	Versuchsdurchführung	45
4.2	Einfachscherversuch	46
4.2.1	Testgerät	46
4.2.2	Probenpräparation	48
4.2.3	Versuchsdurchführung	48
4.2.4	Spannungs- und Verformungsverteilung im Einfachscherversuch	51
4.3	Resonant Column Versuch	56
4.3.1	Testgerät	56
4.3.2	Probenpräparation	57
4.3.3	Versuchsdurchführung	58
5	Experimentelle Untersuchungen mit Berliner Sand	59
5.1	Versuchsmaterial	59
5.2	Materialverhalten unter monotoner Belastung	59
5.2.1	Dränierete Triaxialversuche	60
5.2.2	Ödometerversuche	61
5.2.3	Einfachscherversuche unter konstanter Vertikalspannung	63
5.2.4	Spannungszustand im monotonen Einfachscherversuch	64
5.2.5	Ermittlung des Reibungswinkels im monotonen Einfachscherversuch	68
5.3	Zyklisches Bodenverhalten im Triaxialversuch	70
5.3.1	Verdichtungsverhalten von Berliner Sand	70
5.3.2	Akkumulation der totalen Dehnung ε^{acc}	72
5.3.3	Akkumulationsrichtung ω	73
5.4	Einfluss der mittleren Spannung auf die Steifigkeit	75
5.4.1	Schubmodul und Grenzscherdehnungsamplituden im RC-Versuch	75

5.4.2	Schubmodul und volumetrische Grenzscherdehnungsamplitude im Einfeldscherversuch	77
5.5	Zyklisches Bodenverhalten im unidirektionalen Einfeldscherversuch	79
5.5.1	Verdichtungsverhalten von Berliner Sand	81
5.5.2	Akkumulation der totalen Dehnung ε^{acc}	84
5.5.3	Akkumulationsrichtung ω	95
5.6	Zyklisches Verhalten im multidirektionalen Einfeldscherversuch	97
5.6.1	Akkumulation der Volumendehnung	98
5.6.2	Akkumulation der totalen Dehnung unter Polarisationsänderung	101
6	Stoffmodelle	113
6.1	Basis des expliziten Akkumulationsmodells für Sand unter zyklischer Beanspruchung	113
6.2	Testberechnungen mit dem ursprünglichen HCA-Modell	114
6.3	Das HCA-Modell und seine Modifikation	116
6.3.1	Allgemeine Formulierung	116
6.3.2	Teilfunktionen f_{ampl} , f_e , f_p , f_Y und f_N	117
6.3.3	Modifikation des Ansatzes von f_π	120
6.3.4	Wirkungsweise der „back polarization“ und der Polarisation der aktuellen Zyklen in f_π	122
6.3.5	Akkumulationsrichtung \mathbf{m}	123
6.3.6	Definition der Dehnungsamplitude A_ε	124
6.3.7	Elastische Steifigkeit \mathbb{E}	126
6.3.8	Plastische Dehnungsrate \mathbf{D}^{pl}	126
6.4	Konventionelles Stoffgesetz für die implizite Berechnung	127
6.4.1	Hypoplastisches Stoffgesetz	127
6.4.2	Hypoplastisches Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung	128
6.5	Bestimmung der Materialkonstanten	129
6.5.1	Parameter für das Akkumulationsmodell	129
6.5.2	Parameter für das hypoplastische Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung	136
6.5.3	Überprüfung der Materialkonstanten	139
7	Numerische Untersuchung	143
7.1	Numerische Umsetzung	143
7.1.1	Rechenablauf	143
7.1.2	Implementierung des HCA-Modells im Programm ANSYS [®]	143
7.2	Verifizierung der Implementierung des HCA-Modells	145
7.2.1	Materialkonstanten	145
7.2.2	Randbedingungen der FE-Berechnung	146
7.2.3	Ergebnisse	147
7.3	Validierung des modifizierten HCA-Modells	148
7.3.1	Versuche ohne Änderung der Belastungsrichtung	149
7.3.2	Versuche mit Änderung der Belastungsrichtung	152
8	Zusammenfassung und Ausblick	159
8.1	Zusammenfassung	159

Inhaltsverzeichnis

8.2 Ausblick	162
Literaturverzeichnis	164
Anhang	175