

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
Fakultät Bauingenieurwesen

**Beitrag zur Fallgewichtsverdichtung
in sandigem Boden**

**Contribution to heavy tamping
in sandy soils**

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

Dissertation

vorgelegt von:

Dipl.-Ing. (FH) Holger Pankrath, M.Sc.

geb. am 17. Mai 1982 in Lutherstadt Wittenberg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle

Prof. Dr.-Ing. Ralf Thiele

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter-Andreas von Wolffersdorff

Tag der Einreichung: 28.09.2018

Tag der Verteidigung: 09.01.2019

Kurzfassung

Für eine quantitative Validierung von numerischen Simulationen zu bodendynamischen Problemen und für die Ableitung physikalischer Zusammenhänge werden geeignete experimentelle Daten benötigt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Experimente zur Fallgewichtsverdichtung in Modellversuchen im Erdschwerefeld (1g) entwickelt. Ziel der Versuche war es, das Verformungsverhalten eines Versuchssandes in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu erfassen und Nachrechnungen im Sinne von Benchmark-Tests zu ermöglichen. Die messtechnische Erfassung des Bodenverhaltens erfolgte vor allem durch die optische Messmethode der digitalen Bildkorrelation (DIC, englisch: *Digital Image Correlation*). Aus dem Vergleich diskreter Bildbereiche aus wenigen Sandkörnern (Patches) können Bodenverschiebungen flächenhaft an einer Sichtebeine erfasst werden. Ein wichtiger Teil der Arbeiten war in diesem Zusammenhang die Eignungsprüfung der Messmethode an den eigenen Versuchsständen. Im Rahmen einer Variantenstudie mit 22 Modellkonfigurationen wurde zudem die Bedeutung von Steuergrößen der Fallgewichtsverdichtung hinterfragt. Numerische Berechnungen wurden mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) in *Abaqus* durchgeführt. Dabei wurden einzelne Sonderversuche mit statischer Auflast mit klassischer *Lagrange*-FEM und Versuche wie zur Fallgewichtsverdichtung mit großen Bodenverformungen mit der *Coupled Eulerian Lagrangian* (CEL) Methode simuliert. Als Stoffmodell wurde die Hypoplastizität mit Erweiterung um das Konzept der intergranularen Dehnungen verwendet.

Mit den Versuchen konnte gezeigt werden, dass die optische Messmethode der DIC in der Lage ist, Verschiebungen des Versuchssandes an der Sichtebeine in hoher räumlicher Auflösung verlässlich zu erfassen. Für die Erfassung bodendynamischer Vorgänge konnte die DIC-Auswertung von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sowie von Beschleunigungssensoren im Boden erfolgreich eingesetzt werden. Versuchs- und messtechnische Herausforderungen ergaben sich aus Effekten einer optischen Brechung durch die Sichtebeine sowie bei der Erfassung und Verfolgung von Mustern einzelner Patches. Im Vergleich zur direkten Messung an Starrkörpern führt die Erfassung eines Granulats hinter einer transparenten Sichtebeine zu einer größeren Streuung der Verschiebungsergebnisse, was wiederum negative Auswirkung auf die Ermittlung von kleinräumigen Dehnungen in der Messebene hat. Eine besondere Herausforderung stellte in diesem Zusammenhang die Erfassung einer Änderung der Dichte bzw. Porenzahl über die naturgemäß kleinen Betragsänderungen der volumetrischen Dehnung dar. Bemerkenswerterweise zeigte das Verformungsverhalten des Sandes bei mitteldichter Lagerung bei Einwirkungen durch Fallgewichtsverdichtung große Ähnlichkeiten zum Verformungsverhalten bei statischer Auflast. Mit beiden Lastmodellen deuten die Messergebnisse auf erfolgreiche Verdichtungsarbeit unterhalb und auch seitlich der Lasteinleitung hin, die auf vertikale bzw. auf horizontale Dehnungsanteile zurückzuführen sind. Die Ergebnisse der Studie zur Fallgewichtsverdichtung zeigen Zusammenhänge zwischen Steuergrößen der Fallgewichtsverdichtung auf eine Einflusstiefe auf. Die Studie verdeutlicht, dass die in der Baupraxis verbreitete Größe der potentiellen Fallenergie nur begrenzt für eine Klassifizierung von Fallgewichtskonfigurationen geeignet ist. Die Auswertung einer Reihe von Verdichtungsimpulsen belegt die Möglichkeiten der Korrelation zwischen Zustandsgrößen eines Bodens wie Porenzahl bzw. Verdichtungsgrad und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenfronten im Boden. In numerischen Berechnungen konnte das Verformungsverhalten von Versuchen mit statischer Auflast gut wiedergegeben werden. Es zeigte dabei die Bedeutung einer ausreichenden Berücksichtigung von Randbedingungen aus Reibung zwischen Sand und Behälterwand, Behälterverformungen sowie Siloeffekten in schmalen Behältern. Nachrechnungen von Fallgewichtsversuchen führten zu plausiblen Ergebnissen mit einer deutlichen Verdichtungswirkung unterhalb des Fallgewichtes, die bei weiteren Impulsen verstärkt und in größere Tiefen erweitert wird. Dies entspricht auch den experimentellen Ergebnissen sowie den baupraktisch bekannten Zusammenhängen.

Abstract

A quantitative validation of numerical simulations of soil dynamic problems and the derivation of physical relationships needs appropriate experimental data. Within the scope of the present work, experiments on the heavy tamping in small-scaled models in earth's gravity (1g) were developed. The aim of the experiments was to record the deformation behavior of a test sand in high spatial and temporal resolution and to allow re-calculations in the sense of benchmark tests. The optical measuring method of digital image correlation (DIC) were mainly carried out for the metrological recording of the soil behavior. By comparing discrete image areas of a few grains of sand (patches), it is possible to full-field capture soil displacements behind a vertical viewing plane. In this context, an important part of the work was the suitability test of the measuring method at the own experiments. A variant study with 22 model configurations also questioned the importance of control factors of heavy tamping. The numerical calculations were performed with the finite element method (FEM) in *Abaqus*. Therefore, the simulation of individual special tests with static load were done using classical *Lagrangian* FEM. Experiments as well as with large soil deformations as well as heavy tamping were modeled using the *Coupled Eulerian Lagrangian* (CEL) method. As material model, a formulation of the hypoplasticity with extension to the concept of intergranular strains was used.

The experiments showed that the optical measuring method of the DIC is capable of reliably detecting shifts of the test sand at the viewing plane in high spatial resolution. For the acquisition of soil dynamic processes, the DIC evaluation of high-speed recordings as well as of acceleration sensors in the soil could be successfully carried out. Experimental and metrological challenges resulted from the effects of optical refraction through the viewing plane as well as the detection and tracking of patterns of individual patches. In comparison to direct measurement on rigid bodies, the detection of a granulate behind a transparent viewing plane leads to a greater scattering of the displacement results, which in turn has a negative effect on the determination of small-scale strains in the measuring plane. A particular challenge in this context was the detection of a change in the density or pore number over the inherently small changes in the magnitude of the volumetric strain. Remarkably, the deformation behavior of the sand in medium-dense storage showed under the influence of falling-weight compacting great similarities to the deformation behavior under static loading. With both load models, the measurement results point to successful compaction work below and to the side of the load transfer, which are due to vertical or horizontal strain components. The results of the study on heavy tamping show correlations between the control factors of heavy tamping to an influence depth. The study shows that the size of the potential fall energy, which is common in construction practice, is only limitedly suitable for the classification of heavy tamping configurations. The evaluation of a series of drops proves the possibilities of correlation between state variables of a soil such as void ratio or degree of compaction and the velocity of the propagation waves in the soil. In numerical calculations, the deformation behavior of static load tests could be reproduced well. It showed the importance of a sufficient consideration of boundary conditions like friction between sand and container wall, container deformations and silo effects in narrow containers. Recalculations of the heavy tamping tests led to plausible results with a significant compaction effect below the drop weight, which is amplified in further drops and extended to greater depths. This also corresponds to the experimental results as well as the contexts known in practical engineering.