

Experimental analysis of the evolution of fabric in granular soils upon monotonic loading and load reversals

Experimentelle Untersuchung der Strukturentwicklung in granularen Böden bei monotoner Belastung und Lastwechseln

Analyse expérimentale de l'évolution de la microstructure des sols granulaires lors de charges monotones et d'inversions de charges

Submitted for the degree of Doctor within a co-supervised programme (co-tutelles) to

Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden

and to

Communauté Université Grenoble Alpes
École doctorale I-MEP2 - Ingénierie – Matériaux, Mécanique,
Environnement, Énergétique, Procédé, Production

Submitted by:

Dipl.-Ing. Max Wiebicke, M.Sc.

Date of birth: 13. Juli 1986 in Dresden.

Reviewers:

Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle

Prof. Dr. Antonio Gens

Prof. Dr. Takashi Matsushima

Submitted: 08.11.2019

Defended: 05.03.2020

Abstract

The majority of constitutive models, that are used nowadays to describe the behaviour of granular materials such as sands, are continuum models based on phenomenological approaches. In order to describe some of the phenomena occurring on the macroscopic scale, *e.g.*, the abrupt change of stiffness due to a load reversal, constitutive models use phenomenological state variables (*e.g.*, the inter-granular strain concept for hypoplasticity). These often lack a clear physical meaning. The mechanisms that control the macroscopic behaviour must be sought at the grain-scale with the interactions of individual particles playing the key-role. To access that scale and describe the fabric of granular assemblies, x-ray μ -computed tomography is used in this thesis for full-field measurements during monotonic and cyclic experiments. This non-destructive technique allows to acquire 3D images at various stages of the loading and thus, a tracking of the evolution of the fabric.

The spatial resolution of such tomographies is limited as the specimen has to be mechanically representative and at the same time sufficiently small to identify individual grains in the images. Different image analysis techniques can be used to extract information on the fabric of the granular material, but they all lack a thorough metrological characterisation, especially regarding the limited spatial resolution. Therefore, it was necessary to study the different techniques and determine their uncertainties before running the experiments and evaluating the tomographies. Artificial as well as high resolution images serve as the basis of the metrological analysis which showed that the standard approaches for the analysis of contact orientations, implemented in most commercial software, strongly suffer in accuracy and often introduce huge artefacts. New techniques to refine these measures are proposed and validated on the same images.

Monotonic triaxial compression tests on two different sands are studied regarding the localisation of deformation in terms of the contact fabric. The complete fabric tensor is determined inside and outside of the developing shear band throughout the experiment. Its evolution is expressed by the anisotropy and related to the macroscopic response. The specimen appears to behave homogeneously in the different zones until the onset of the localisation at which the fabric diverges. Outside of the shear band it stays relatively constant whereas it seems directly related to the stress ratio inside the shear band. The anisotropy captures the characteristic evolution of the stress response, such as peak states and softening.

A series of triaxial compression tests with load reversals has been conducted on specimens consisting of sand grains and glass beads. To capture the fabric response to the cycles, tomographies have been acquired before and after unloading and after reloading. As opposed to numerical simulations, no large changes of the fabric during the load cycles could be observed. Qualitatively, the fabric changes similar to the numerical simulations: the anisotropy decreases upon unloading and increases upon reloading. The incremental response to each reversal is compared to the numerical simulations and the evolution of the inter-granular strain tensor for similar conditions. The latter is determined by a simplified element test with the aim of possibly relating this phenomenological variable to a truly structural one. The comparison of the evolution of the fabric and the inter-granular strain, however, showed major differences, based on which such a relation is not possible. The fabric evolves at a slower rate than the state variable and continues to evolve even throughout monotonic loading situations.

Kurzfassung

Der Großteil der Stoffmodelle, die heutzutage zur Beschreibung des Verhaltens von granularen Materialien wie Sanden verwendet werden, sind Modelle im Kontinuum, die auf phänomenologischen Ansätzen basieren. Diese Stoffmodelle nutzen oft phänomenologische Zustandsvariablen (z.B. die intergranulare Dehnung in der Hypoplastizität), um Phänomene, die auf makroskopischer Ebene beobachtet werden können, wie z.B. ein abrupter Wechsel der Steifigkeit bei Lastumkehr, zu beschreiben. Der Großteil dieser Zustandsvariablen ist aus theoretischen Konzepten hervorgegangen, die bisher noch nicht auf experimentelle Grundlagen gestellt werden konnten. Die Mechanismen, die das makroskopische Verhalten und die Phänomene auf dieser Ebene kontrollieren, müssen auf der Kornskala gesucht werden, da die Interaktionen von individuellen Körnern die Schlüsselrolle spielen. Um die Struktur von Granulaten auf dieser Skala beschreiben zu können, kommt die Röntgen Computertomographie in dieser Arbeit zum Einsatz. Diese erlaubt es 3D Bilder von Proben während einer makroskopischen Belastung zu erstellen und somit Strukturänderungen zu verfolgen.

Hierbei ist es wichtig, zu beachten, dass die räumliche Auflösung der Tomographien limitiert ist, da mechanisch repräsentative Proben untersucht werden sollen. Mit verschiedenen Bildbearbeitungstools können aus diesen Bildern Informationen zur Struktur der Proben gewonnen werden. Aufgrund der limitierten Auflösung und unzureichenden, bisher durchgeführten Studien war es notwendig, diese Tools auf ihre Genauigkeit zu untersuchen. Mit Hilfe von synthetischen Bildern und hochauflösenden Nano-Tomographien, die als Basis für diese Analyse dienten, konnte festgestellt werden, dass Standardverfahren, die auch in kommerziellen Programmen implementiert sind, eine unzureichende Genauigkeit aufweisen. Aus diesem Grund wurden fortgeschrittene Verfahren hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Verwendbarkeit untersucht und Verfeinerungen der Standardverfahren vorgeschlagen. Es konnte gezeigt werden, dass diese Verbesserungen eine wesentlich höhere Genauigkeit hinsichtlich der zu bestimmenden Strukturgrößen aufweisen.

Mit diesen optimierten Verfahren wurde die Lokalisierung von Verformungen in monotonen Triaxialversuchen an zwei verschiedenen Sanden untersucht. Dazu wurde die Struktur innerhalb und außerhalb eines sich entwickelnden Scherbandes bestimmt und über einen Strukturtensor dargestellt. Die Proben verhalten sich relativ homogen bis zum Anfang der Lokalisierung. Danach wird die Struktur innerhalb des Scherbandes zunehmend anisotroper, indem sich die Kontakte immer weiter in Richtung der größten Hauptspannung ausrichten. Außerhalb des Scherbandes verändert sie sich kaum. Die Anisotropie des Strukturensors bildet die Entwicklung des Spannungsdeviators dabei sehr gut ab.

Um die abrupte Änderung der Steifigkeit bei Lastumkehr zu untersuchen, wurden Experimente an Sand- und Glaskugelproben durchgeführt, bei denen die Lastrichtung zu unterschiedlichen Zuständen umgekehrt wurde. Dabei wurden Tomographien von der Probe insbesondere vor und nach der Entlastung sowie nach der Wiederbelastung erstellt. Im Gegensatz zu Untersuchungen mit der DEM, entwickelt sich die Struktur in diesen Experimenten nur sehr gering. Qualitativ sind die Änderungen aber ähnlich mit denen aus den numerischen Simulationen: die Anisotropie verringert sich bei Ent- und vergrößert sich bei Wiederbelastung. Die inkrementelle Änderung der Anisotropie bei Lastumkehr wurde mit den Ergebnissen aus den numerischen Simulationen sowie der Entwicklung der intergranularen Dehnung verglichen. Mit dem Ziel dieses phänomenologische Konzept auf experimentelle Grundlagen zu stellen, wurde die intergranulare Dehnung in einer Simulation bei ähnlichen Bedingungen ermittelt. Eine experimentelle Erklärung dieses Konzeptes ist zumindest mit der Kontaktstruktur nicht möglich, da sich beide Variablen unterschiedlich entwickeln. Die Struktur entwickelt sich langsamer als die Zustandsvariable und weit über die Lastumkehr hinaus.

Résumé

La majorité des modèles constitutifs, utilisés aujourd'hui pour décrire le comportement de matériaux granulaires, sont des modèles de continuum basés sur des approches phénoménologiques. Afin de décrire certains des phénomènes qui se produisent à l'échelle macroscopique, par exemple: le changement brusque de rigidité à une inversion de charge, les modèles constitutifs utilisent des variables d'état phénoménologiques (par exemple: le concept de déformation intergranulaire pour l'hypoplasticité). Ces modèles manquent souvent d'une signification physique. Les mécanismes qui contrôlent le comportement macroscopique doivent être étudiés à l'échelle du grain, car les interactions des particules jouent un rôle essentiel. Pour accéder à cette échelle et décrire la structure des assemblages granulaires, la tomographie par rayons X est utilisée dans ces travaux de thèse.

La résolution spatiale de telles tomographies est limitée car le spécimen doit avoir une taille mécaniquement représentative et en même temps doit être suffisamment petit pour identifier les grains individuels dans les images. Différentes techniques d'analyse d'images peuvent être utilisées pour extraire des informations sur la structure du matériau granulaire, mais elles manquent toutes d'une caractérisation métrologique approfondie. Donc, il était nécessaire d'étudier les différentes techniques et de déterminer leurs incertitudes. Les images artificielles ainsi que les images haute résolution servent de base à l'analyse métrologique, qui a montré que les approches standard pour l'analyse des orientations de contact, mises en œuvre dans la plupart des logiciels commerciaux, sont inexacts et entraînent souvent d'importants artefacts. De nouvelles techniques pour affiner ces mesures sont proposées et validées sur les mêmes images.

Des essais de compression triaxiaux monotoniques sur deux sables différents sont étudiés en ce qui concerne la localisation de la déformation par rapport au structure de contact. Le tenseur de structure complet est déterminé à l'intérieur et à l'extérieur de la bande de cisaillement en développement tout au long de l'expérience. Son évolution est exprimée par l'anisotropie et liée à la réponse macroscopique. Le spécimen semble se comporter de manière homogène dans les différentes zones jusqu'au début de la localisation à laquelle le tissu diverge. En dehors de la bande de cisaillement, il reste relativement constant alors qu'il semble directement lié au taux de contrainte à l'intérieur de la bande de cisaillement. L'anisotropie capture l'évolution caractéristique de la réponse à la contrainte, telle que les états de pic et le ramollissement.

Une série d'essais de compression triaxiale avec inversion de charge a été réalisée sur des échantillons constitués de grains de sable et de billes de verre. Pour capturer la réponse de la structure aux cycles de charge, des tomographies ont été acquises avant et après le déchargement et après le rechargement. Contrairement aux simulations numériques, aucun changement important du tissu au cours de ces cycles n'a pas pu être observé. Qualitativement, les changements de structure ressemblent à ceux des simulations numériques: l'anisotropie diminue au déchargement et augmente au rechargement. La réponse incrémentale à chaque inversion est comparée aux simulations numériques et à l'évolution du tenseur de déformation intergranulaire sous des conditions similaires. La déformation intergranulaire est déterminée par un test élémentaire simplifié dans le but de relier éventuellement cette variable phénoménologique à une variable véritablement structurelle. La comparaison de l'évolution du tissu et de la déformation intergranulaire a toutefois révélé des différences majeures, sur la base desquelles une telle relation n'est pas possible. La structure évolue à un taux plus lent que la variable d'état et continue d'évoluer même dans les situations de chargement monotone.