



Doctoral Thesis

Capillary interactions, shear thickening and liquid migration in wet granular media

Author(s):

Mani, Roman Andri

Publication Date:

2014

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010243469> →

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 No. 21809

Capillary interactions, shear thickening and liquid migration in wet granular media

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
ROMAN ANDRI MANI
MSc ETH Physics

born 16.01.1985
citizen of Andeer (Graubünden)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Hans J. Herrmann, examiner
Prof. Dr. Dani Or, co-examiner

2014

Zusammenfassung

Der Einfluss von Flüssigkeiten auf die mechanischen Eigenschaften von granularen Medien ist von ausserordentlicher Wichtigkeit und Interesse in vielen interdisziplinären Gebieten wie Geo- und Schneephysik, Verfahrenstechnik, Ernährungs- und Zementindustrien, Erdölförderung und Pharmaindustrien. Wie die flüssige Phase auf Kornbewegungen reagiert ist im wesentlichen unerforscht und stellt eine grosse Herausforderung dar, da die Dynamik der Flüssigkeit mit derjenigen der Partikel gekoppelt werden muss.

In dieser Arbeit, wird ein neuartiges Modell für die Beschreibung der flüssigen Phase in ungesättigten feuchten Schüttgütern entwickelt. Für genügend kleine Sättigungen findet man nur sogenannte Kapillarbrücken im granularen medium. Die Innovation unseres Modells besteht darin, dass jede dieser Kapillarbrücken samt ihren geometrischen Eigenschaften, wie Kontakt- und Öffnungswinkel und Flüssigkeitsvolumen, einzeln betrachtet wird. Ausserdem erlauben wir Veränderungen des Brückenvolumens durch das Reißen und Neubildung der Kapillarbrücken und durch Flüssigkeitsaustausch unter einzelnen Brücken. Dieses Modell wird dann an die Partikeldynamik gekoppelt, welche mit der Kontaktdynamik Methode modelliert wird. Diese ist eine spezielle Form der sogenannten diskrete Elemente Methoden. Die mikroskopische Flüssigkeitsumverteilung verursacht dann auch eine Ausbreitung der Flüssigkeit auf grösseren Längenskalen. Weiter wird ein Modell für dichte Partikelsuspensionen erarbeitet, wodurch die mikroskopische Ursache der Scherverdickung erörtert wird.

In einem ersten Schritt, wird ein einfaches Modell, basierend auf einfachen Regeln für die Umverteilung nach dem Reißen und Bilden von Kapil-

larbrücken vorgeschlagen. Mit Hilfe dieses Modells finden wir eine diffusive Ausbreitung der Flüssigkeit in gescherten feuchten Granulaten. Diese Ausbreitung bewirkt eine direkte Änderung der mechanischen Eigenschaften des granularen Mediums.

In einem verfeinerten Modell wird der Flüssigkeitsaustausch, verursacht durch Differenzen im Laplacedruck, zwischen Kapillarbrücken über den Film auf den Partikeloberflächen miteinbezogen. Mit diesem Modell wird die detaillierte zeitliche Entwicklung der Kapillarbrücken untersucht. Ausserdem finden wir in Experimenten, dass Flüssigkeit aus Scherbändern getrieben wird, was letztendlich durch unser Modell erklärt wird.

Im letzten Teil dieser Arbeit wird die Scherverdickung in dichten Partikelsuspensionen untersucht. In solchen gesättigten Granulaten sind keine Kapillarbrücken vorhanden. Dafür beeinflusst die Schmierung der Kontakte durch die umgebene Flüssigkeit die Flieseigenschaften der Suspension beträchtlich und wir finden, dass diese Schmierung, die mikroskopische Ursache der Scherverdickung ist.

Summary

The influence of liquids onto the mechanical properties of granular media and the evolution of the liquid phase inside is of fundamental interest to many interdisciplinary fields such as geo- and snow physics, process engineering, food and cement industries, oil recovery and pharmaceuticals. How the liquid phase reacts due to grain movements is largely unexplored and challenging due to the coupling of the dynamics of the fluid to the dynamics of the particles.

In this work a novel grain scale model for the investigation of the fluid phase in highly unsaturated wet granular matter is developed. At sufficiently small saturations only liquid bridges appear in the wet granulate. The novelty of our model consists in taking into account all the capillary bridges and their geometrical features like contact angle, opening angle and volume individually. Furthermore, we allow for volume changes due to liquid bridge rupture and formation and due to liquid exchange between different bridges. This model is coupled to the dynamics of the particles which are modeled by Contact Dynamics, a special type among the discrete element methods. Microscopic liquid redistribution mechanisms lead to liquid migration on large spatial scales. Furthermore, a model for fully saturated dense granular suspensions is introduced to unravel the microscopic origin of shear thickening. In a first approach a simple model for the evolving liquid is proposed based only on simple rules for the liquid redistribution after bridge rupture and bridge formation. The liquid spreading in a sheared granular medium is found to exhibit diffusive behavior and the spreading directly affects the mechanical properties of the granular medium.

In a refined formulation a volume exchange between liquid bridges via a wetting film on the particle surfaces driven by Laplace pressure differences is taken into account. This model allows to study the evolution of the liquid bridge network in detail such as the evolving bridge volumes and contact angles. Furthermore, we experimentally found that liquid content decreases within unsaturated granular media. Such a behavior is finally explained by our model.

In the last part of the thesis the shear thickening of dense particle suspensions is investigated. In such fully saturated granular media no capillary bridges are present. However, the contacts between particles are lubricated by the suspending fluid which we found to be at the origin of the shear thickening in dense non-Brownian suspensions.