

DISS. ETH NO. 22893

Numerical simulation of debris flow and interaction between flow and obstacle via DEM

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZÜRICH

(DR. SC. ETH ZÜRICH)

presented by

ALESSANDRO LEONARDI

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile,

Università degli Studi di Padova

born on 19.09.1987

citizen of Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Hans J. Herrmann

Prof. Wei Wu

2015

Abstract

Debris flows are dangerous natural hazards, common wherever a mountainous terrain is associated with heavy precipitation. The state of the art of prevention is performed thanks to the development hazard maps, built with the data taken from historical records and numerical simulations. The traditional modeling of debris flows is performed with models based on the shallow-water equation, which postulate the velocity field and reduce the dimensions of the problem by integrating over the depth. These methods are not able to provide a tool for the simulation of the interaction between flow and obstacles, because they lack the capability to reproduce the complexity of the mechanisms emerging by the organization of particles and fluid in a debris flow. This forces engineers to rely on expensive physical modeling, which greatly limits the possibility to study new configurations and prevention structures

In this thesis, a new method is proposed, based on a conceptual separation of the debris material into a fluid phase and a granular phase. The fluid phase features a plastic rheology, and is solved with the use of the Lattice-Boltzmann Method. This recently developed tool for fluid dynamics allows for an efficient coupling with the granular phase, solved with the Discrete Element Method, in a convenient fashion. The resulting method, the DEM-LBM, is efficient and easily parallelizable, making the simulation of real systems possible. It is able to simulate free-surface flows of particle-fluid mixtures that strikingly resemble the one observed in a typical debris flow. The spatial reorganization of fluid and particles, which in debris flow follows complex and often counter-intuitive patterns, can be obtained with the DEM-LBM without further *ad hoc* modeling.

The method is tested through a series of analytical and numerical validations, as well as the comparison with commercial codes, proving its robustness to different situations and geometries. The simulations are compared with a series of experiments performed with the use of a rotating drum. The excellent agreement motivates the use of the method for further investigation of the organization of fluid and particles inside the drum, which leads to the formulation of a scaling law for phase separation.

Finally, the DEM-LBM is further coupled with a Finite-Element representation of a debris-flow barrier of the flexible type. The simulation of this type of barriers, constituted by a cable net, is particularly challenging because they act as filters, retaining the largest grains. For the first time, this behavior is realistically simulated, giving insight into the role of the flexibility of the barrier in minimizing the impact force.

Zusammenfassung

Murgänge sind gefährliche Naturphänomene, die überall auftreten können, wo ein bergiges Terrain mit starken Niederschlägen zusammentrifft. Die heutigen Schutzmassnahmen werden mit Hilfe von Risikolandkarten entwickelt, welche auf Daten aus historischen Aufzeichnungen und numerischen Simulationen beruhen. Die traditionelle Modellierung von Murgängen wird mit Modellen, die auf den Saint Venant Gleichungen basieren, ausgeführt. Diese setzt das Geschwindigkeitsfeld voraus und reduziert die Dimensionen des Problems, indem über die Tiefe integriert wird. Diese Methoden sind nicht in der Lage, die Interaktion zwischen dem Strom und eventuellen Hindernissen abzubilden, da sie die Komplexität der Mechanismen, die aus der Interaktion von Partikeln und Flüssigkeit in einem Murgang entstehen, nicht reproduzieren können. Dies zwingt Bauingenieure auf teure physische Modellierungen zurückzugreifen, was die Möglichkeiten zur Untersuchung neuer, neuer Konfigurationen und Schutzmassnahmen limitiert.

In dieser Dissertation wird eine neue Methode vorgeschlagen, die auf einer konzeptionellen Trennung des Schuttmaterials, in eine fluide und eine granulare Phase, basiert. Die fluide Phase ist mit einer plastischen Rheologie ausgestattet, und wird unter Verwendung der Lattice-Boltzmann Methode gelöst. Dieses erst kürzlich entwickelte Instrument für Strömungsmechanik erlaubt die Kopplung mit der granularen Phase, gelöst mit der Discrete Element Methode, auf eine natürliche und zweckmässige Art und Weise. Die resultierende Methode, die DEM-LBM, ist effizient und leicht parallelisierbar, was die Betrachtung realer Systeme ermöglicht. Sie ist in der Lage, freie-Oberflächen Ströme von Partikel-Fluid Mischungen zu simulieren, welche denjenigen eines typischen Murgangs auffallend ähnlich sind. Die räumliche Reorganisation von Strom und Partikeln, welche in Murgängen komplexen und oftmals kontra-intuitiven Mustern folgt, kann mit der DEM-LBM ohne weitere *ad hoc* Modellierung gezeigt werden.

Die vorgeschlagene Methode wird durch eine Reihe von analytischen und numerischen Beispielen validiert, wie auch durch den Vergleich mit kommerziellen Codes, wodurch ihre Robustheit im Kontext verschiedener Situationen und Geometrien geprüft wird. Die Simulationen werden mit einer Reihe von Experimenten verglichen, die unter Verwendung einer rotierenden Trommel durchgeführt wurden. Die exzellente Übereinstimmung legt die Verwendung der Methode für weitere Untersuchungen der Organisation von Fluid und Partikeln innerhalb der Trommel nahe, mit Indizien für die Formulierung eines Potenzgesetzes für die Phasenseparierung.

Schließlich wird die DEM-LBM gekoppelt mit einer Finite-Elemente Representa-

tion einer flexiblen Murgänge-Barriere. Barrieren von diesem Typ, bestehend aus einem Kabelnetz, sind für die Modellierung besonders herausfordernd, da sie als Filter agieren und die grössten Schuttstücke zurückhalten. Dieses Verhalten wird zum ersten Mal realistisch simuliert, was Einsichten in die Rolle der Flexibilität der Barriere bei der Minimierung der Aufschlagskraft ermöglicht.

Sommario

Le colate detritiche sono pericolosi eventi naturali che si incontrano comunemente in zone montane affette da forti precipitazioni. La prevenzione si basa comunemente sulla stesura di mappe di rischio, usando dati storici e simulazioni. La modellazione numerica delle colate detritiche si basa tradizionalmente sulle equazioni di De Saint Venant per le correnti a pelo libero, con una riduzione delle dimensioni del problema ottenuta attraverso l'integrazione sulla profondità. Queste equazioni non si sono dimostrate efficaci nel simulare l'interazione con ostacoli, in quanto mancano della capacità di rappresentare la riorganizzazione tra sedimenti e fluido che emerge in una colata detritica. I progettisti di barriere devono quindi ricorrere alla modellazione fisica, che è estremamente costosa, il che limita le possibilità di testare nuove configurazioni.

In questa tesi, un nuovo metodo viene proposto. L'idea alla base è quella di dividere concettualmente la colata detritica in due fasi, una fluida e una granulare. La fase fluida ha proprietà plastiche, e viene risolta usando il metodo reticolare di Boltzmann. Questo solutore di recente sviluppo permette l'accoppiamento in modo elegante e efficace con la fase granulare, risolta usando il metodo agli elementi discreti. Il metodo ottenuto, chiamato DEM-LBM dalle sigle inglesi, è efficiente e facilmente parallelizzabile, rendendo possibili simulazioni su larga scala. Può simulare flussi composti da sedimenti e fluido che assomigliano notevolmente a una tipica colata detritica. Può inoltre riprodurre la complessa e spesso controintuitiva riorganizzazione spaziale di fluido e sedimenti che si osserva in una colata detritica, il tutto senza l'aggiunta di alcun modello apposito.

Il metodo è testato attraverso una serie di validazioni, sia numeriche che sperimentali, e con il confronto con un codice commerciale. Il tutto prova la sua adattabilità a differenti situazioni e geometrie. Le simulazioni ottenute sono confrontate anche con i risultati di una campagna sperimentale appositamente preparata, ottenuti con l'uso di un cilindro rotante. Il pieno allineamento tra dati numerici e sperimentali ha spinto verso l'uso del metodo per capire più a fondo i meccanismi di organizzazione tra fluido e sedimenti, e alla formulazione di una corrispondente legge di scala.

Infine, il DEM-LBM è accoppiato con una rappresentazione agli elementi finiti di una barriera flessibile anti-colata. Queste barriere sono costituite da una rete di funi e la loro modellazione è particolarmente problematica perché funzionano come filtri, trattenendo solo i sedimenti più grandi. Per la prima volta, questo comportamento è simulato in modo realistico, aumentando la comprensione di come la flessibilità

della barriera influisca sulla forza trasmessa dalla colata.