



*Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca*



UNIVERSITY OF SALERNO

Department of Civil Engineering

Doctoral thesis

In

***RISK AND SUSTAINABILITY IN CIVIL,
ARCHITECTURE AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING SYSTEMS***

XXXI Cycle (2015-2018)

Abstract

Experimental investigations on granular flows

Luigi Carleo

Supervisor
Prof. Maria Nicolina Papa

Co-Supervisor
Eng. Luca Sarno

Coordinator
Prof. Fernando Fraternali

Abstract

Granular flows, such as debris avalanches, debris flows and rock avalanches, involve the rapid motion of granular mixtures consisting of sediments, water and air. They occur on steep slopes and in the hydrographic network and can affect anthropized areas causing damage to buildings, roads and, in the worst case, loss of human lives.

Investigating on the initiation mechanism and on the rheological behavior of granular flows is essential in the hydrogeological risk assessment and mitigation. The study of the triggering phase of granular flows is fundamental for estimating the amount of sediments involved in the flowing mass and predicting their occurrence. Rainfall plays a crucial role in the slope stability since it can trigger granular flows through different mechanisms. The knowledge of the granular flow dynamics allows estimating both the run-out distances and the impact forces of such flows. The dynamics strongly depends on the characteristics of the sediments and their concentration in the granular mixture. The boundaries influence the granular flow dynamics inducing the onset of different dissipation mechanisms within the granular body. To date, the effects of the boundaries on the dynamics of granular flows are not completely understood. Furthermore, a unified rheological law, capable to describe all the different dissipation mechanisms, is still an open problem.

This PhD thesis mainly focused on the effects of the boundaries on the dynamics of chute dry granular flows at the laboratory scale. Optical

techniques were employed to study flows not disturbed by measurement devices. The dynamics was investigated through velocity and volume fraction measurements taken both at the sidewall and at the free surface. The open source software PIVlab [Thielicke and Stamhuis, *Journal of Open Research Software*, 2014] was used to measure velocity at the sidewall and at the free surface while the stochastic-optical method [Sarno et al., *Granular Matter*, 2016], developed at the Laboratorio di IDraulica Ambientale e Marittima, (LIDAM), University of Salerno, was employed to get near-wall volume fraction measurements. Several open channel experiments were performed and different mass flow rates were analyzed. The experiments can be divided in two groups: experiments over fixed bed and experiments over erodible bed. The first group of experiments was performed in the same channel to investigate on the effects of both the basal roughness and the inclination angle of the channel in steady flow condition. Five different fixed basal surfaces and two inclination angles of the channel were studied. The second group of experiments was performed over the erodible/loose bed to study the effect of the channel width in uniform flow condition. Two channels with two different widths were employed.

Different layers can be identified: an upper collisional layer, characterized by a decreasing trend of the volume fraction while going toward the free surface; a central frictional-collisional layer, where volume fraction reaches an approximately constant value and about the loose random packing of the granular material (≈ 0.6); a lower layer, only observed in case of fixed bed, where volume fraction is lower than 0.6 due to the

presence of the fixed bed. Three main shapes of the longitudinal velocity profiles were identified: Bagnold-like, linear and exponential. In the experiments over the fixed bed, the occurrence of such shapes depends on the resistance exerted by the sidewalls, the normal stresses and the kinematic boundary conditions observed at the bed. Such shapes may coexist in a stratified way. This indicates that, in a granular flow, different flow regimes can take place. In the experiments over erodible bed, it was found that, by changing the mass flow rate, namely the flow depth, the velocity profiles collapse into a unique master curve. The inclination angle of the free surface is the only quantity that changes with the mass flow rate and, thus, it could reflect the dissipative forces, namely the active forces, that take place in a granular flow over erodible bed. In both the experimental campaigns over fixed bed and erodible bed, if the flow rate is high enough, a weak secondary circulation takes place within the cross section. Therefore, granular flows should be considered weakly three-dimensional.

The second part of this research was devoted to the study of granular flows at catchment scale. It was conducted during my research period abroad in collaboration with Prof. Marcel Hürlimann (Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona). The goal was to detect and classify all the processes occurred in the Rebaixader catchment (South Central Pyrenees) in 2017. In this way, it was possible to properly distinguish the triggering rainfalls. Data from the monitoring stations installed in the propagation zone (FLOW station) and in the triggering zone (INF station) were analyzed.

Abstract

A classification system, based on ground vibration and flow depth measurements recorded by the FLOW station, was proposed. Three types of process were identified: debris flow processes, fluvial sediment transport processes and erosion and accumulation processes at the end of the scarp. Pore water pressure and volumetric water content measurements, recorded by the INF station, were analysed. Not a clear relation between triggering rainfalls and infiltration data was found due to the strong heterogeneity of the soil and the small observation period.

Abstract

I flussi granulari, come le valanghe di detrito, le colate di detrito e le valanghe di roccia, coinvolgono il movimento rapido di miscugli granulari composti da sedimenti, acqua e aria. Essi si verificano su pendii acclivi e nella rete idrografica e possono colpire aree antropizzate causando danni a edifici, strade e, nei peggiori dei casi, perdite di vite umane.

Indagare sui meccanismi di innesco e sul comportamento reologico dei flussi granulari è essenziale nella gestione e mitigazione del rischio idrogeologico. Lo studio della fase di innesco di un flusso granulare è fondamentale per stimare la quantità di sedimenti coinvolta nel flusso e per prevederne l'accadimento. La pioggia gioca un ruolo cruciale nella stabilità del pendio dal momento che può innescare flussi granulari secondo diversi meccanismi. La conoscenza della dinamica dei flussi granulari permette di stimare la distanza di propagazione e la forze di impatto di tali flussi. Essa dipende fortemente dalle caratteristiche dei sedimenti e dalla loro concentrazione nel miscuglio granulare. Il contorno influenza la dinamica dei flussi granulari provocando l'instaurarsi di differenti meccanismi di dissipazione. Ad oggi, l'effetto del contorno sulla dinamica dei flussi granulari non è del tutto compreso. Inoltre, un legame reologico unico, capace di descrivere tutti i differenti meccanismi di dissipazione, rappresenta ancora un problema aperto.

Questa tesi di dottorato si focalizza principalmente sull'effetto del contorno sulla dinamica dei flussi granulari secchi canalizzati a scala di

laboratorio. Sono state impiegate tecniche di tipo ottico per studiare flussi non disturbati dai dispositivi di misura. La dinamica è stata studiata tramite misure di velocità e concentrazione alla parete e al pelo libero. E' stato impiegato il software open source PIVlab [Thielicke and Stamhuis, *Journal of Open Research Software*, 2014] per misurare la velocità alla parete e al pelo libero mentre il metodo stocastico-ottico [Sarno et al., *Granular Matter*, 2016], sviluppato al Laboratorio di IDraulica Ambientale e Marittima, (LIDAM), Università di Salerno, è stato impiegato per misurare la concentrazione alla parete. Sono stati condotti diversi esperimenti in canale e sono state analizzate diverse portate massiche. Gli esperimenti possono dividersi in due gruppi: esperimenti su fondo fisso e esperimenti su fondo mobile. Il primo gruppo di esperimenti è stato condotto nello stesso canale per indagare sugli effetti della scabrezza del fondo e dell'angolo di inclinazione del canale su flussi in condizioni di moto permanente. Sono stati studiati cinque fondi fissi e due angoli di inclinazione del canale. Il secondo gruppo di esperimenti è stato condotto su fondo erodibile/sciolto per studiare gli effetti della larghezza del canale su flussi in condizioni di moto uniforme. Sono stati impiegati due canali con due differenti larghezze.

Sono stati individuati diversi strati: uno strato superiore collisionale, caratterizzato da un andamento decrescente della concentrazione andando verso il pelo libero; uno strato frizionale-collisionale nella zona centrale, dove la concentrazione raggiunge un valore approssimativamente costante e pari a circa la loose random packing del materiale granulare (≈ 0.6); uno strato inferiore, osservabile solo nelle prove su fondo fisso, dove la

concentrazione è minore di 0.6 a causa della presenza del fondo fisso. Sono state individuate tre forme principali dei profili di velocità longitudinale: Bagnold, lineare ed esponenziale. Negli esperimenti su fondo fisso, la presenza di queste forme dipende dalla resistenza indotta delle pareti, dagli sforzi normali e dalla condizione al contorno di tipo cinematico osservabile al fondo. Queste forme possono coesistere in maniera stratificata in uno stesso flusso granulare. Ciò indica che in un flusso granulare possono verificarsi differenti regimi di moto. Negli esperimenti su fondo mobile, è stato trovato che, al variare della portata massica, ovvero del tirante, i profili di velocità collassano su una stessa curva. L'angolo di inclinazione del pelo libero è l'unica quantità che cambia con la portata massica e, dunque, potrebbe riassumere in sé le forze dissipative, ovvero le forze attive, che si verificano in un flusso granulare su fondo erodibile. Sia nelle campagne sperimentali su fondo fisso che su fondo mobile, se la portata massica è abbastanza elevata, si verifica una debole circolazione secondaria nel piano della sezione. Di conseguenza, i flussi granulari dovrebbero essere considerati debolmente tridimensionali.

La seconda parte di questa ricerca è stata dedicata allo studio dei flussi granulari a scala di bacino. Essa è stata condotta durante il periodo di studio all'estero in collaborazione con il Prof. Marcel Hürlimann (Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona). L'obiettivo è stato quello di identificare e classificare tutti i processi avvenuti nel bacino del Rebaixader (Pirenei Centro Meridionali) nel 2017. In questo modo è stato possibile distinguere in maniera appropriata le piogge innescanti. Sono stati analizzati i dati registrati dalle stazioni di monitoraggio installate nella

Abstract

zona di propagazione (stazione FLOW) e nella zona di innesco (stazione INF).

E' stato proposto un sistema di classificazione basato sulle misure di tirante e vibrazioni del terreno dovute al passaggio di un flusso nella zona canalizzata. Sono stati individuati tre tipi di processo: processi di tipo colata di detrito, processi di tipo trasporto di sedimenti e processi di erosione e accumulo di sedimenti ai piedi della zona di innesco. Sono state analizzate le misure di pressione neutra e contenuto volumetrico d'acqua registrate dalla stazione INF. Non è stata trovata una chiara relazione tra piogge innescanti e dati di infiltrazione a causa della forte eterogeneità del terreno e del breve periodo di osservazione.