

8-20-2024

Large-scale experimental platform for dynamic simulation of mountain hazards (LEADS)

Gongdan ZHOU

Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610029, China

See next page for additional authors

Recommended Citation

ZHOU, Gongdan; CUI, Peng; WU, Hongwei; YOU, Yong; ZHONG, Wei; SONG, Dongri; ZHOU, Chuiyi; SHEN, Hongwei; SHANG, Mingsheng; and ZHANG, Xuerui (2024) "Large-scale experimental platform for dynamic simulation of mountain hazards (LEADS)," *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*: Vol. 39 : Iss. 8 , Article 15.

DOI: <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20240803002>

Available at: <https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol39/iss8/15>

This Key Research Infrastructures in CAS Field Stations is brought to you for free and open access by Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). It has been accepted for inclusion in Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version) by an authorized editor of Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). For more information, please contact lcyang@cashq.ac.cn, yjwen@cashq.ac.cn.



Large-scale experimental platform for dynamic simulation of mountain hazards (LEADS)

Abstract

Mountain hazards involve complex multiphase media composed of granular materials and fluids. The challenges related to scale effects and similarity issues in physical modelling of these hazards are key problems in both fundamental research on dynamics of granular materials and applied research in disaster prevention and mitigation. Supported by the Chinese Academy of Sciences' key scientific infrastructure construction project at the field station network, the National Dongchuan Debris Flow Observation and Research Station in Jiangjia Gully, Dongchuan District, Kunming City completed the construction of the large-scale experimental platform on dynamic simulation of mountain hazards (LEADS) in 2024. This platform is the world's largest, most automated, and best synchronized system for data collection among international advanced experimental platforms for physical modelling of mountain hazards. The LEADS platform fully adheres to the similarity criteria for simulating multiphase media in mountain hazards, accurately reveals the dynamic evolution mechanisms of these media as well as the regulation mechanisms of mitigation structures, and effectively aids in the engineering design. LEADS serves as a national treasure in China's disaster reduction field and is set to become a demonstration base for basic and fundamental research on mountain hazards dynamics and for the development, testing, and promotion of new disaster prevention and control structures. It will significantly promote the research level of mountain hazards in China and will lead the development of the relevant scientific fields.

Keywords

mountain hazards, experimental platform, physical modelling, large scale, dynamic process

Authors

Gongdan ZHOU, Peng CUI, Hongwei WU, Yong YOU, Wei ZHONG, Dongri SONG, Chuiyi ZHOU, Hongwei SHEN, Mingsheng SHANG, and Xuerui ZHANG

引用格式: 周公旦, 崔鹏, 吴宏伟, 等. 山地灾害大尺度动力学模拟实验平台. 中国科学院院刊, 2024, 39(8): 1458-1467, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240803002.

Zhou G D, Cui P, Wu H W, et al. Large-scale experimental platform for dynamic simulation of mountain hazards (LEADS). Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(8): 1458-1467, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240803002. (in Chinese)

山地灾害大尺度动力学模拟实验平台

周公旦¹ 崔鹏^{1*} 吴宏伟² 游勇¹ 钟卫¹ 宋东日¹ 周垂一³ 沈宏伟³ 尚明生⁴ 张学睿⁴

1 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 成都 610029

2 香港科技大学 香港 999077

3 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 杭州 310014

4 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 重庆 400714

摘要 山地灾害体是复杂颗粒物质和流体所组成的多相介质。山地灾害物理模拟的尺度效应和相似性问题是关系颗粒物质动力学和防灾减灾研究的核心难题。在中国科学院野外站网络重点科技基础设施建设项目的支持下, 中国科学院东川泥石流观测研究站、云南东川泥石流国家野外科学观测研究站于2024年在昆明市东川区蒋家沟建成了山地灾害大尺度动力学模拟实验平台(LEADS平台), 这是全世界山地灾害物理模拟规模最大、自动化监测程度最高、系统数据采集同步性最佳的实验平台。LEADS平台充分满足山地灾害多相介质模拟的相似性准则、准确反映复杂介质的动力演化机制和防治工程体的调控机理、可以有效地指导工程设计, 是我国减灾领域的国之重器, 将成为山地灾害动力学研究和新型防治工程结构研发、测试、推广的实验示范基地。

关键词 山地灾害, 实验平台, 物理模拟, 大尺度, 动力过程

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20240803002

CSTR 32128.14.CASbulletin.20240803002

1 山地灾害大尺度模拟实验平台建设目的和意义

1.1 平台建设背景与科学意义

滑坡、泥石流和山洪等山地灾害在世界范围内广

泛分布。它们暴发突然, 运动速度快, 具有极大的冲击力, 能够瞬间冲毁桥墩、房屋、路基, 破坏山区生态环境, 严重威胁山区城镇、水利水电工程、干线公(铁)路、输油气管道及广大人民群众生命财产安全, 在全世界范围内造成了巨大的灾难。近年来, 随着全

*通信作者

资助项目: 中国科学院野外站网络重点科技基础设施建设项目(KFJ-SW-YW001), 香港研究资助局研究基金(T22-603/15N、AoE/E-603/18)

修改稿收到日期: 2024年8月9日

球气候变化异常和人类社会经济活动的不断增强,极端天气和山地灾害事件日益增多,规模和范围越来越大,所造成的损失与危害呈急剧上升的趋势,死亡人数占全世界自然灾害死亡人数的比例居高不下。中国是一个山地大国,山区面积约占国土陆地面积的2/3,聚集了全国约25%的人口、71.4%的县级行政区,山地灾害问题极其严重^[1,2]。当前,山区防灾减灾迫切需求是准确认识泥石流、山洪、滑坡等多相介质的动力演化规律,以及揭示防治工程对灾害体的调控机理。其中设计和开展物理模型实验是人们依据基础理论、严格控制边界条件,对山地灾害全过程开展精细化模拟研究的重要手段。

1.2 国内外同类装置情况

自20世纪80年代以来,欧洲(主要是德国、意大利、法国、瑞士、奥地利)学者开展了大量的颗粒流、泥流动力学的室内水槽实验,用以模拟滑坡、泥石流等山地灾害的运动过程^[3-5]。但模拟实验的尺度非常小(实验总体积小于 0.1 m^3),颗粒物质流动的距离非常短(2—10 m),模拟的滑坡、泥石流往往在斜坡上尚未充分发展就在水平面上堆积,实验中观察到的现象同自然现象所呈现出的高速远程特征差异明显。

泥石流在日本是一种常见且危害性极大的山地灾害。为此,日本学者研发了大量的具有一定规模的泥石流实验装置,其结构精良,产出过很多科研成果。这其中最具代表性的是隶属于日本国土交通省国土技术政策综合研究所土砂灾害研究部“土砂灾害研究室和砂防研究室”所开发的泥石流实验用水槽:其泥石流流动距离可达10 m,且在堆积区内可以模拟实际的地形和防治工程,包括下游建筑物。但是,大量学者(包括日本国内的研究者)都质疑这样尺度的泥石流模型太小(实验总体积小于 0.5 m^3),不能真实反应实际的泥石流和防治工程的相互作用过程^[6-11],该研究结果要慎重用于实际防治工程的设计中。

国内外学者基于这些物理模型实验结果,提出

了对泥石流、滑坡动力学特性的不同认识,并据此在全世界各地设计和修建了大量的防治工程,尽管这些山地灾害的规模很多都在原先的“设计标准”考虑之内,但这些防治工程很多都是运行不久就被泥石流、高速滑坡(碎屑流)重新破坏了。究其原因,最突出的就是这些物理模型实验都是小规模 and 严重缩尺型的,其模拟实验的水槽尺寸一般是2—10 m长(即泥石流、滑坡体流动距离),模型沟道宽0.2—1 m,模拟的泥石流、滑坡体积在 $0.1\text{—}3\text{ m}^3$ 之间,且模拟的泥石流和滑坡颗粒物质的最大粒径不能超过0.1 m。此外,实际操作中,实验用颗粒材料往往是缺乏科学依据的任意配置,或者直接将野外泥石流物料筛分并剔除0.05 m或0.1 m以上的大颗粒后做实验。中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所已建的水槽尽管运动距离达45 m,但坡度较小(12°),对充分发展的高速远程的山地灾害模拟效果仍然不佳,无法模拟下游防治工程的调控效果。目前全世界最大规模的泥石流、滑坡—碎屑流物理模型实验装置是美国联邦地质调查局(USGS)在俄勒冈州修建的大型泥石流实验用水槽^[12,13],其尺寸为长96 m,宽2 m,深1.2 m,坡度为 31° ,但其能模拟的泥石流体积也不超过 20 m^3 ,而模拟泥石流颗粒物质的最大粒径也不能超过0.1 m。这些严重缩尺的物理模型实验同野外大量动辄几万乃至上百万立方米级($10^4\text{—}10^6\text{ m}^3$)且富含粗大块石(0.2—10 m)的泥石流原型相比(最基本的模拟材料本身就与原型不相似),能多大程度反应真实现象的物理力学机理,值得深思和细究。2015年,国际泥石流研究专家Richard Iverson在运用量纲分析(dimensional analysis)方法后进一步推测,泥石流体内孔隙水压力和泥浆体黏滞度是2个影响泥石流动力学的重要参数,且会随着流动尺度的大小而发生本质的变化,具有明显的尺度效应(scaling effect)^[14]:即小规模实验不能反映大尺度原型的动力特性,2个参数的相对重要性在大小不

同尺度的泥石流运动中恰好相反。尤其是2008年汶川地震后,泥石流呈现出多发、群发、规模特别巨大等特点,其动力学特性有别于一般规模的泥石流,超出了人们原有的认知水平。用常规小尺度(即小规模)的物理模型实验去试图揭示这些大规模的泥石流事件的动力学机制更具争议性。

实际情况表明,震后泥石流的防治工程修建通常没多久就被破坏了,反复修建、反复受灾:一方面浪费了国家大量的人力、物力;另一方面泥石流没有得到根本的治理和控制,人民群众深受其害。研究注意到,近年来为突破模型实验的尺度效应,一些国家已经在积极尝试更大规模的山地灾害模拟实验。2009年,韩国国立江陵原州大学在平昌郡选择了1条天然山沟,在其上游修建了1个600 m³体积的料箱(泥石流物料+水),尝试模拟泥石流在沟道中的真实运动^[14]。但由于山沟沟道的边界条件太复杂,反而不利于对泥石流动力学特性的定量描述,而且山沟沟道床面物质松散,泥石流侵蚀沟道极大改变了沟床形态,导致实验难以重复,且泥石流将传感器也一并冲毁,实验成本高昂,后续实验计划难以为继。

综上所述,从对自然现象的本质认识出发并结合部分山地灾害防治工程失败的惨痛教训,要研究泥石流、山洪、滑坡这些由大量颗粒物质(宽级配)和流体(水或空气)充分掺混而高速流动的多相介质的动力学特性,以及它们和防治工程结构的相互作用机理,当前最迫切需要解决的科研设施瓶颈,就是如何突破现有物理模型实验装置的尺度效应和相似性难题,真实反应山地灾害原型动力学机制和防治工程对它们的调控原理,有效指导工程设计和减灾。

2 实验平台建设目标、难点及解决方案

2.1 建设目标

为满足我国的重大防灾减灾需求,中国科学院东川泥石流观测研究站、云南东川泥石流国家野外科学

观测研究站(以下简称“东川站”)立足于建设世界一流的自动化监测大规模山地灾害动力全过程的实验装置,旨在突破当前科研基础设施瓶颈。“山地灾害大尺度动力学模拟实验平台”着重解决山地灾害多相介质起动—运动—堆积,以及与工程体相互作用全过程物理模拟的尺度效应和相似性难题,揭示防治工程对泥石流等山地灾害的调控机理,将显著提升我国山地灾害研究的水平,使东川站的国际泥石流研究基地地位得到进一步巩固和加强,引领学科发展。

2.2 建设难点与解决方案

(1) 科学选址、合理施工,确保大实验装置的地质稳定性和长期便利化运行。研发团队充分调研美国、韩国、日本等大型山地灾害实验设施优、缺点,结合山地灾害大尺度模拟的几何尺寸要求,如展宽、长度、坡度、落差等,深入研究装置的空间布局。工程实施前,在核心流域组织了多次选址调研、考察与论证。为满足实验平台的功能所需,充分考虑和评估实验平台空间布展性。例如,山坡高差70多m、坡度约30°、工程宽度超20m、灾害体运动距离超100m等,交通便利性,如便于工程施工和实验活动开展,以及经济可行性,如土地征用费用经济合理且可行。开展岩土工程勘察,查明平台范围内受力地层的结构类别、分布,明确不良地质作用的分布范围与实验用水源地(地下水)的发育条件,评价地基的稳定性和承载力,满足地质稳定性要求。根据地勘报告设计实验平台主体结构和附属实验设施。

(2) 研发实验平台关键机械装置(闸门),满足快速开启和闭水需要。大尺度的滑坡、泥石流等山地灾害动力学模拟实验一次性用料最大可达500 m³,料箱闸门承受背后土体和水体的共同侧向压力较大,确保闸门开启前(实验准备阶段)的闭水性是关键。同时,闸门的快速开启和释放颗粒物质是满足大规模岩土体失稳起动(理想Dam Break型)形成泥石流、碎屑流等山地灾害的初始边界条件模拟等相似性要求的

核心。为此团队研制特殊Ⅱ型重型闸门（40 t），可同时满足高应力环境下（200 kPa）的密水性和快速开启性要求（5 s内转角超45°）；研发闭锁系统联动和一键自动控制快速开启技术（智能化），保证系统安全可靠；研建液压缸带动楔型锁轴结构，提升系统报警自锁和运行安全度。

（3）多源数据同步采集和精准传输。为保证实验平台较大空间范围内数10种不同传感器多源数据（声、光、电、磁、热）的采集，团队研发了边缘侧分布式毫秒级采、存、算、显一体化数据管理系统，避免传统大规模物联网平台需数据上云导致的传输延迟、传输带宽制约等，具有毫秒级精准传感器采集控制能力，可任意自定义采集数据类型。数据采集系统具有高鲁棒性，可在恶劣环境下进行原位采存算显一体化处理，能达到亿级/秒的数据平台吞吐和计算支持能力。

3 实验平台的组成和功能

“山地灾害大尺度动力学模拟实验平台”主体主要包括4部分：① 实验顶部平台，包括供水水箱、数据采集系统控制室、实验配料箱、重型闸门及其快速

启闭控制装置、人工降雨模拟装置等；② 实验水槽主体装置；③ 底部水平护坦与观测塔；④ 数据采集系统，包括数据采集与传输设备、系统操作平台。各功能组成部分研建情况如下（图1和2）。

3.1 实验顶部平台

为模拟滑坡、堰塞湖/冰湖溃决、山洪、泥石流等山地灾害（链）的“起动—运动—链生演化”全过程，“山地灾害大尺度动力学模拟实验平台”在顶部平台上布置了多套装置，包括水箱（最大蓄水能力100 m³）、实验料箱（最大储料能力500 m³）、全自动化重型闸门及快速启闭系统、人工降雨装置及其控制系统、实验平台控制室、变电室。实验过程中所使用的近一半机械结构都被布置到顶部平台中，因此，顶部平台是山地灾害大尺度动力学模拟实验能否正常开展的关键。

实验物料从实验平台所在的天然泥石流沟道（蒋家沟）采集后，现场筛分，随后使用大型运料车将物料沿盘山进场道路向顶部平台运输，并堆填在顶部平台储料箱中。装料后，可通过与水箱相连的沿储料箱深度方向均匀分布的出水管道将物料均匀润湿直至饱和。在此过程中，闸门所承受的土—水共同侧压力逐

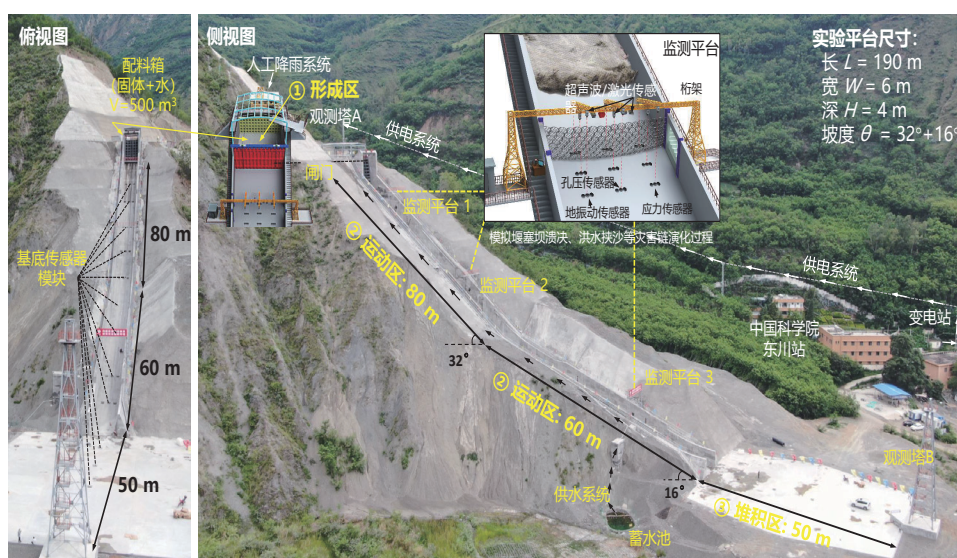


图1 山地灾害大尺度动力学模拟实验平台整体效果图

Figure 1 Overview of large-scale experimental platform for dynamic simulation of mountain hazards (LEADS) platform



图2 实验平台重要观测断面及仪器布置

Figure 2 Important monitoring sections and instruments arrangement of LEADS platform

- (a) 监测断面; (b) 重型闸门; (c) 监测断面仪器布置; (d) 底部模块及仪器布置
(a) Monitoring sections; (b) Gate system; (c) Instrumentations of monitoring section;
(d) Basal stress plate and instrumentations

渐增大, 必须确保闸门开启前具备绝对密水性。为此, 团队在闸门底部研发了一个重型闸门止水装置, 保障了闸门在高压条件下的密水性问题。同时, 通过三相电机动力设备牵引两股钢绞线链接重型闸门, 可实现闸门的快速开启 (在5 s内开启45°以上), 以“瞬时”释放料箱内部物质。为了模拟降雨条件下土体失

稳和滑坡形成的过程, 储料箱顶部安装大型人工降雨设备, 并在料箱底部布置有可收集渗流的集水槽, 通过料箱后方配置的可自由控制水深的水池, 可使储料箱能够有效模拟降雨条件下滑坡体内渗流场的时空变化, 进而精细化研究滑坡启动机理。

此外, “山地灾害大尺度动力学模拟实验平台”将数据采集系统、实验控制系统、实验监控系统集成在顶部平台的控制室内, 实现了实验的全过程监控, 避免了因实验操作流程繁杂而引起的各类安全问题。机房中包含配电箱、闸门启闭控制柜、液压系统启闭控制柜、终端服务器、大屏显示器、监控控制器、网络通信站等设备。通过将闸门启闭系统与液压系统启闭控制柜并联, 实现了重型闸门的一键启动与紧急终止; 实验数据依靠光线通信采集, 存储在终端局域网服务器中, 保证了实验数据的安全。

3.2 水槽主体

“山地灾害大尺度动力学模拟实验平台”的水槽主体是多相介质山地灾害体的运动区域 (图1), 该部分是研究灾害动力过程的关键区域。水槽主体为钢筋混凝土结构, 总长140 m, 宽6 m, 深4 m; 其中, 上游第一段坡角为32°, 长度80 m; 下游第二段坡角为16°, 长度60 m。在距离闸门开启位置向下游16 m、60 m、110 m处布置有3道监测平台, 每一道监测平

台中分别设置有超声波传感器、激光传感器、微型激光雷达、热红外成像仪、监控摄像机、宽频地震仪、应力传感器和孔压传感器（图2）。

为了获取山地灾害体在运动过程中的动力学参数时空分布规律，更好地理解山地灾害体内部颗粒场的结构特性和固液耦合动力学机制，水槽主体底部沿程布置有8排×3列的传感器安装孔位，16°坡与32°坡分别布置3排和5排预留孔位，每个孔位可安装1个应力传感器、1个孔隙水压力传感器、1个切应力传感器及1个宽频地震动传感器。3个监测平台顶部垂直于流体表面安装有高清摄像机，配合热红外成像仪和微型激光雷达，可精细化地捕捉流体的完整流场信息。同时，为验证实验过程中监测到的多种实验数据，监测平台的水槽侧面安装有透明钢化玻璃窗，并布设高速摄像机，以记录断面流体的流速、流深、流量等视觉信息；此外，流体的紊动特性可利用配置有全球定位系统（GPS）惯性制导无线示踪球进行获取。水槽主体两侧壁沿程共布设有4道柔性网防治工程安装孔位（32°坡与16°坡各2处，自闸门开启位置向下依次距离为19 m、61.5 m、85.5 m、112 m），每道柔性网安装位沿竖直方向布置7排柔性防护网挂点，距离闸门最近处额外沿垂直水槽底部方向布置1列7排的柔性网挂点；柔性网锚点处安装有多个拉力传感器，可监测泥石流、碎屑流等山地灾害体对柔性防护网的冲击力。通过柔性网的布置与安装，可研究泥石流与新型防治结构之间的相互作用机理，揭示防治工程对山地灾害体的调控作用。

3.3 底部护坦及观测塔

“山地灾害大尺度动力学模拟实验平台”在水槽主体出口处配置了1块面积为2 000 m²的水平混凝土护坦，便于观测泥石流在高速运动后冲出水槽的堆积形态，以模拟山区泥石流冲积扇的形成演化过程。此外，堆积区护坦上预留有刚性构筑物的安装孔位，可模拟泥石流对下游城镇构筑物的冲击破坏过程；基于

泥石流的堆积范围，提炼构筑物易损性模型。同时，护坦上的预留孔位还可安装柔性防护网结构，通过分析泥石流冲击柔性网过程中的三向冲击力与结构应变，进一步研究防治工程体（柔性网）对泥石流的调控作用。水槽主体中轴延长线50 m处布置有25 m高的观测塔，塔顶安装有2组高清摄像机，可记录实验过程中的山地灾害体“运动—堆积”，以及与防治工程体相互作用全过程。

3.4 实验平台数据采集系统

“山地灾害大尺度动力学模拟实验平台”的实验数据采集系统需具备可对应高精度时间同步采集能力、可动态扩展的海量并发采集对应能力、异构传感器的全流程自适应能力等关键技术。实验平台的数据采集系统整体使用时间敏感网络（TSN）同步技术，实现从传感器光电信号采集、数据转换、平台汇聚和数据管理应用的同步测量、记录与高速传输。采集系统包含五大引擎：硬件驱动引擎、数据采集引擎、数据采集任务驱动引擎、数据传输引擎和通道检测滤波引擎，以保证海量实验数据的高效采集、安全转发，采集精度达到毫秒级。

实验数据采集系统的平台侧应用了内存池技术、异步通信机制、事件驱动策略等技术，以保障野外装置关键数据的可靠存储和海量数据的实时分析展示等功能。采集系统可随采集数据需求的增大动态扩充、横向扩展采集节点，实现采集节点动态调整，提升采集吞吐量；中间层应用多线程框架、消息队列机制，根据数据量大小，自动对大数据吞吐进行削峰填谷，实现数据采集高性能、高可靠，保障系统稳定运行。实验数据采集系统使用自研的异构物联网数据边云一体化管理架构，在支撑高并发数据读写分析的情况下，边侧可自适应解析数10种测控输入/输出（I/O）协议，云侧可任意在应用系统上自定义新的传感器类型和接口类型，并实时嵌入已有数据结构中，实现采集设备和传感器的灵活配置。基于此技术，本实验数

据采集系统可通过页面配置新增传感器,后端自动进行嵌套对应,无需额外进行系统开发,保障了实验准备工作的高效性。

4 科学目标与学科领域支撑作用

“山地灾害大尺度动力学模拟实验平台”以模拟岩土体失稳后的颗粒物质和流体长距离运动演化和成灾过程、突破物理模拟的尺度效应为主线,研究大规模山地灾害动力过程和防治结构调控原理,研发新型防灾减灾方法和技术,核心科学目标包括3个方面。

(1) 模拟山地灾害(链)形成—运动—演化全过程,以大尺度新视角探索多相介质动力学规律。开展大规模模拟实验将有效解决山地灾害全过程物理模拟的尺度效应和相似性问题,揭示山地灾害流动性激增机制,如泥石流颗粒破碎、颗粒分选、相变减阻和滑坡—碎屑流(包括雪崩、冰岩崩、滚石)的气浪效应;探索沟道动床侵蚀和灾害体规模放大、灾害链链生演化等机理;进而研发全新的山地灾害(泥石流、滑坡—碎屑流、山洪等)多相介质本构关系和动力学模型。上述研究将致力于回答2005年*Science*杂志梳理的“125个最具挑战性的科学问题之一”,即“能否发展关于湍流动力学和颗粒材料运动学的综合理论”,推动颗粒物质非平衡态动力学理论的发展。

(2) 明确防治工程体对山地灾害的调控机理,研发、测试和验证新型防治结构,提升工程设计科学化、量化水平。开展大规模山地灾害对准工程尺度的防治结构体的冲击和破坏性模拟实验,明确真实流态下多相介质和防治工程体(多阵次、长周期)的相互作用过程,揭示流域尺度内多级防治结构体对山地灾害的空间协同调控机理,可有效指导工程设计,并成为新型防治工程结构研发、测试、应用推广的实验示范基地。

(3) 支撑新型实验和探测感知新技术测试及应用

推广,推动学科交叉。山地灾害体是最复杂的颗粒体系,模拟实验和原位探测涉及声、光、电、磁、热等多种新技术手段。开展足尺度的山地灾害全过程模拟实验,可以有效测试感知新技术的有效性和实战性,进而优化和提升数据监测采集技术水平,有效服务新技术研发。更重要的是,这些实验能够推动不同学科的交叉融合,如地质学、物理学、工程学和信息技术等,形成综合性的研究体系,为山地灾害的防控提供更加精准和高效的技术支持,从而提升灾害预警和应急响应的能力。

5 取得进展及未来研究计划

(1) 开展不同规模山洪、泥石流、堰塞坝溃决等山地灾害动力过程的模拟研究。截至2024年6月,已开展大规模山洪(50 m^3 与 100 m^3)和泥石流(50 m^3 与 100 m^3)模拟实验各2组、沟道内滑坡堰塞坝级联溃决(2级共 100 m^3)的模拟实验1组(图3)。实验结果成功测试了平台运行的安全性、结构的稳定性,以及数据传输、采集、存储的可靠性,大实验平台满足了任务书的预定全部要求,获得了验收专家现场的一致肯定。未来实验研究计划包括:①基于颗粒物质非平衡态动力学理论,在流域尺度内将山洪、泥石流置于统一的固液两相流框架内开展多尺度模拟研究,揭示临界转化条件;②探索大规模固液两相流超强流动机理,颗粒分选、破碎和减阻效应;③补充环境地震动传感器矩阵布置,完善应力场、温度场、流场立体监测体系,捕捉多相介质非平衡态转变的关键性过程。

(2) 探索大规模泥石流对沟道内多级柔性网的冲击作用。2024年底前,计划联合瑞士布鲁克公司、香港科技大学,开展 150 m^3 、 300 m^3 、 500 m^3 泥石流冲击沟道内多级(4级)柔性网的实验,测试平台在最大负荷(500 m^3 物料)下的结构稳定性与运行安全性,研究柔性网对不同规模泥石流的调控机理,测试单道

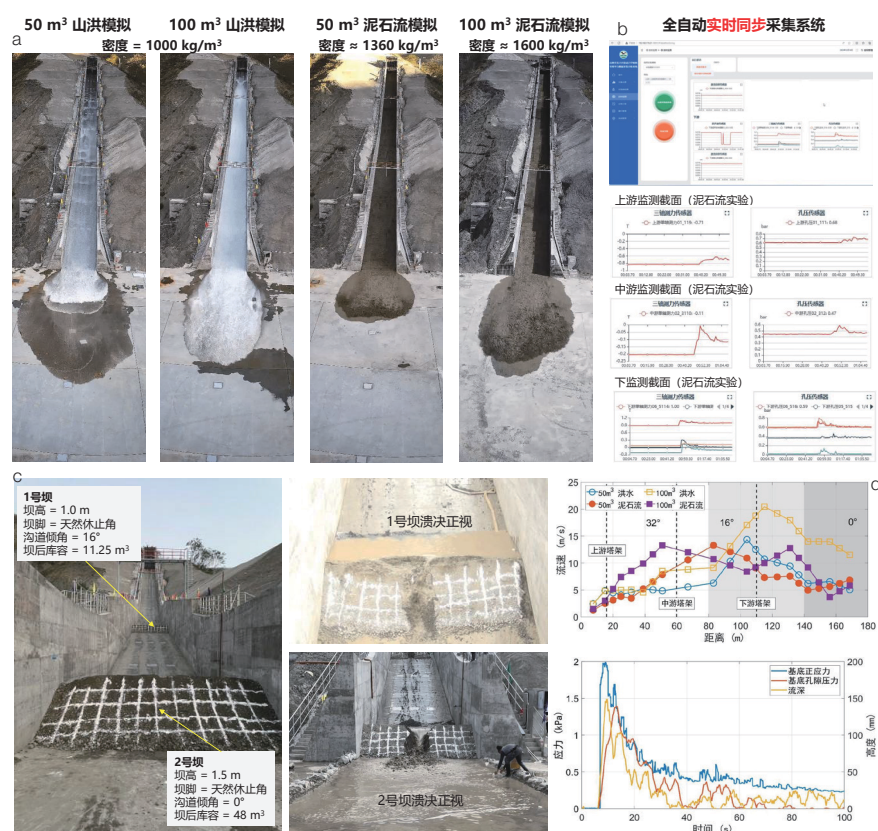


图3 实验平台开展的大型山洪、泥石流、堰塞坝级联溃决实验和获取的动力学参数
Figure 3 Large-scale modelling tests of flash flood, debris flow, and cascade landslide dam failures and the measurements

(a) 山洪、泥石流实验研究; (b) 滑坡坝级联溃决实验研究; (c) 数据采集系统; (d) 动力学参数

(a) Experimental study on flash flood and debris flow; (b) Experimental study on cascading landslide dam failures; (c) Data log system; (d) Dynamical parameters

柔性网的极限抗冲击能力, 探明沟道多级柔性网的空间协同机制, 为新型抗泥石流柔性网产品的性能验证和升级改造提供科技支撑。该实验也有助于积极探索在有防治工程体系条件下的泥石流对山区沟道地貌快速演化的影响机理。

6 运行与管理办法

目前, 东川站成立了“山地灾害大尺度动力学模拟实验平台”运行管理委员会, 制定了实验平台的使用规范和方法, 明确了平台所有者、管理者、使用者

和试验观测者的权利和义务, 明确资料共享、数据交付与保密等原则, 以及服务方式、内容、费用和成果等相关政策。平台运行管理委员会负责安排专人处理平台使用的申请, 协调不同目的试验者的使用顺序, 设置专业观测工人负责仪器日常维护与数据采集, 确保试验数据的准确性和科学性; 指定专人定期对平台内的仪器和设备进行检修和维护, 负责平台的正常和安全运行。

东川站“山地灾害大尺度动力学模拟实验平台”将面向国内外工程地质学、自然地理学、流体动力学、岩土工程学、水利学及相关研究领域的科学家开放, 采取试验站统筹管理、试验观测、数据获取、质量控制与交付的服务模式, 建设成面向国内外开放、多领域立体试验的共同利用平台, 为山地灾害防治研究提供科学服务。

(相关内容请见封三)

参考文献

- 康志成, 李焯芬, 马蔼乃, 等. 中国泥石流研究. 北京: 科学出版社, 2004.
Kang Z C, Li Z F, Ma A N, et al. Debris Flows in China. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- 崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题. 地理科学进展, 2014, 33(2): 145-152.
Cui P. Progress and prospects in research on mountain

- hazards in China. *Progress in Geography*, 2014, 33(2): 145-152. (in Chinese)
- 3 Savage S B, Hutter K. The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: Analysis. *Acta Mechanica*, 1991, 86(1): 201-223.
 - 4 Coussot P. *Mudflow Rheology and Dynamics*. London: Routledge, 2017.
 - 5 Armanini A, Capart H, Fraccarollo L, et al. Rheological stratification in experimental free-surface flows of granular – liquid mixtures. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 532: 269-319.
 - 6 Okura Y, Kitahara H, Sammori T, et al. The effects of rockfall volume on runout distance. *Engineering Geology*, 2000, 58(2): 109-124.
 - 7 Moriwaki H, Inokuchi T, Hattanji T, et al. Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator. *Landslides*, 2004, 1: 277-288.
 - 8 Ochiai H, Sammori T, Okada Y. Landslide experiments on artificial and natural slopes. *Progress in Landslide Science*, 2007: 209-226.
 - 9 Takahashi T. *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. London: Taylor & Francis, 2007.
 - 10 Bowman E T, Take W A, Rait K L, et al. Physical models of rock avalanche spreading behaviour with dynamic fragmentation. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(4): 460-476.
 - 11 Iverson R M. Scaling and design of landslide and debris-flow experiments. *Geomorphology*, 2015, 244: 9-20.
 - 12 Iverson R M, Costa J E, LaHusen R G. Debris-flow flume at HJ Andrews experimental forest, Oregon. US Geological Survey, Dept. of the Interior, 1992.
 - 13 Iverson R M. The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*, 1997, 35(3): 245-296.
 - 14 Paik J, Son S, Kim T, et al. A real-scale field experiment of debris flow for investigating its deposition and entrainment// AGU Fall Meeting Abstracts. 2012: EP53A-1010.

Large-scale experimental platform for dynamic simulation of mountain hazards (LEADS)

ZHOU Gongdan¹ CUI Peng^{1*} WU Hongwei² YOU Yong¹ ZHONG Wei¹ SONG Dongri¹ ZHOU Chuiyi³
SHEN Hongwei³ SHANG Mingsheng⁴ ZHANG Xuerui⁴

(1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610029, China;

2 Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China;

3 Huadong Engineering Corporation Limited, Power China, Hangzhou 310014, China;

4 Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract Mountain hazards involve complex multiphase media composed of granular materials and fluids. The challenges related to scale effects and similarity issues in physical modelling of these hazards are key problems in both fundamental research on dynamics of granular materials and applied research in disaster prevention and mitigation. Supported by the Chinese Academy of Sciences' key scientific infrastructure construction project at the field station network, the National Dongchuan Debris Flow Observation and Research Station in Jiangjia Gully, Dongchuan District, Kunming City completed the construction of the large-scale experimental platform on dynamic simulation of mountain hazards (LEADS) in 2024. This platform is the world's largest, most automated, and best

*Corresponding author

synchronized system for data collection among international advanced experimental platforms for physical modelling of mountain hazards. The LEADS platform fully adheres to the similarity criteria for simulating multiphase media in mountain hazards, accurately reveals the dynamic evolution mechanisms of these media as well as the regulation mechanisms of mitigation structures, and effectively aids in the engineering design. LEADS serves as a national treasure in China's disaster reduction field and is set to become a demonstration base for basic and fundamental research on mountain hazards dynamics and for the development, testing, and promotion of new disaster prevention and control structures. It will significantly promote the research level of mountain hazards in China and will lead the development of the relevant scientific fields.

Keywords mountain hazards, experimental platform, physical modelling, large scale, dynamic process

周公旦 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所研究员。中国-意大利水文地质灾害联合实验室秘书长、国际防灾减灾科学联盟(ANSO-DRR)秘书长。长期从事山地灾害动力学和颗粒物非平衡态研究。E-mail: gordon@imde.ac.cn

ZHOU Gongdan Professor of the Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences (CAS); Secretary-general of the Sino-Italian Joint Laboratory on Geological and Hydrological Hazards, and Secretary-general of the Alliance of International Science Organization on Disaster Risk Reduction. He has been focusing on the research of dynamics of mountain hazards and nonequilibrium state of granular matter. E-mail: gordon@imde.ac.cn

崔 鹏 中国科学院院士。中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所研究员、中国科学院地理资源与科学研究所研究员。中国-巴基斯坦地球科学研究中心中方主任。长期从事泥石流、滑坡、堰塞湖等山地灾害与水土保持领域的研究。E-mail: pengcui@imde.ac.cn

CUI Peng Academician of the Chinese Academy of Sciences. Professor of the Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences (CAS), and Professor of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS; Co-Director General (Chinese side) of China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences. Dr. CUI has been long engaged in geo-hazards researches with a focus on debris flow, landslide, and dammed lake, as well as in water and soil conservation studies. E-mail: pengcui@imde.ac.cn

■ 责任编辑：张帆