

基于光弹测试技术的颗粒柱坍塌启动 细观行为分析

戴国威¹, 毛无卫^{1,2}, 黄雨^{1,2}, 郑虎^{1,2*}

1. 同济大学 土木工程学院地质与水利工程系, 上海 200092

2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092

摘要: 为揭示突发型滑坡启动过程的细观动力学机制, 本研究基于光弹性测力技术与颗粒柱坍塌物理模型, 实现了岩土颗粒材料在瞬态启动阶段颗粒位移与力链网络演化的同步系统观测。结果表明, 滑坡启动过程中力链断裂重组与剪切带形成在时空上具有高度一致性。在形成稳定颗粒流之前, 颗粒加速阶段与体系内部应力水平的快速衰减呈显著相关, 表明应力释放是驱动滑坡突发启动的重要动力学机制。进一步分析发现, 突发型滑坡启动过程中颗粒尺度动力学行为可划分为两种不同模式: 一是滑动区内颗粒沿主滑移方向发生系统性位移; 二是非滑动区内颗粒表现出不规则的非局域位移特征, 该非局域运动主要受局部剪切扰动及力链传递过程控制。

关键词: 颗粒启动; 光弹性技术; 力链网络; 突发型滑坡

中图分类号: P642.22

收稿日期: 2026-2-28

Microscopic initiation behavior analysis of granular column collapse based on photoelastic technology

Guowei Dai¹, Wuwei Mao^{1,2}, Yu Huang^{1,2}, Hu Zheng^{1,2*}

1. Department of Geological and Hydraulic Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, 200092,

China

Abstract: To elucidate the mesoscopic mechanisms underlying the initiation of sudden-failure landslides, this study employs photoelastic experimental techniques combined with a granular column collapse model, to achieve simultaneous observation of granular displacement and force-chain network evolution during the transient initiation stage. The results reveal a strong spatiotemporal consistency between the evolution of the internal force-chain network and the formation of shear bands (failure line). Prior to the development of granular flow, particle acceleration is closely correlated with a reduction in the internal stress level of the system. At the particle scale, the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42277156) .

作者简介: 戴国威 (1998-), 男, 博士研究生, 主要从事颗粒物力学、工程地质灾害等研究. E-mail: Daigw@tongji.edu.cn, ORCID: 0000-0003-2477-7618

***通讯简介:** 郑虎(1986-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害防治与岩土颗粒物力学研究. E-mail: zhenghu@tongji.edu.cn, ORCID: 0000-0002-9606-9947

引用格式: 戴国威, 毛无卫, 黄雨, 郑虎, 2026. 基于光弹测试技术的颗粒柱坍塌启动细观行为分析. 地球科学, XX(X): XXX-XXX.

Citation: Dai Guowei, Mao Wuwei, Huang Yu, Zheng Hu, 2026. Microscopic behavior analysis of sudden failure landslide initiation based on photoelastic technology. Earth Science, XX(X): XXX-XXX.

initiation process can be characterized by two distinct dynamic patterns: systematic displacement within the sliding zone and irregular nonlocal displacement in the non-sliding zone, the latter being primarily driven by localized shear fluctuations and stress transmission within the granular assembly.

Keywords: granular initiation, photoelastic technology, force chain network, sudden-failure landslide

0 引言

我国是全世界滑坡地质灾害最严重的国家之一,实施滑坡提前预警与预报是主动防控滑坡灾害的重要手段(许强等, 2025; 唐辉明等, 2025)。突发型滑坡通常表现为大量岩土颗粒材料的瞬时失稳与加速运动,其失稳后短时间内突然加速且缺乏明显前兆特征,极易造成严重灾难性后果(Johnson and Campbell, 2017; Hu *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2023)。因此,为尽可能提前突发型滑坡的预警时间,亟需识别能够反映启动阶段灾变演化特征的前兆指标。深入揭示突发型滑坡的细观启动机制,对于精准预测其灾害特征、提升我国工程地质灾害风险防控能力与灾害韧性具有重要意义(唐辉明等, 2022)。

作为一种与滑坡灾害动力学高度相似的简化构型,颗粒流坍塌模型被广泛应用于研究岩土颗粒流瞬态演化过程和冲击堆积行为(Courrech Du Pont *et al.*, 2003; Shao *et al.*, 2018)。基于物理模型试验和数值模拟方法,国内外学者已系统探究了颗粒柱坍塌的宏观启动特征及其对流动行为的影响。Lee 和 Kuan (2021) 通过水下颗粒柱坍塌模型实验指出:当破坏角接近 90° 时,以退蚀型破坏(Brenching)为主导;反之则表现为滑动型破坏(Sliding)。此外,初始堆积几何构型及颗粒特性对颗粒系统的坍塌动力学具有显著控制作用。对于低宽高比颗粒柱(Jing *et al.*, 2018)和松散颗粒堆积系统(Rondon *et al.*, 2011),系统呈现类似整体自由落体的运动。然而,随着堆积密度增大至较密实状态,颗粒柱呈现逐步垮塌的退蚀

型破坏(Lee and Kuan, 2021)。与此同时,流体相通过改变粘度(Ladd and Reber, 2020)和促进固液相互作用(Zhang and Tahmasebi, 2022; Wang *et al.*, 2025),对颗粒体系内部应力分布和整体流动行为产生显著影响。

尽管针对干/湿颗粒柱坍塌行为已开展大量研究,并取得了一定进展,但是对颗粒柱启动过程中的细观动力学仍认知有限,其关键原因在于缺乏能够获取颗粒尺度运动与内部应力信息的有效实验手段。数字图像相关法(DIC)和粒子图像测速法(PIV)的应用(Fern *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2023),能够在时空尺度上实现颗粒运动的连续观测,有助于进一步理解剪切带形成(Chen *et al.*, 2010)、滑坡流动性(Yu and Su, 2021)以及碎屑体堆积形态(Yang *et al.*, 2019)。然而,这类方法难以直接获取颗粒体系内部应力分布及其演化过程(Zheng *et al.*, 2019a)。光弹测试技术是直接观测力链网络最有效的方法之一,基于双折射原理,可以定量提取内部应力和力链网络特征(Howell *et al.*, 1999)。近年来,围绕力链结构、配位数及组构张量等细观参数的定量分析已取得重要进展(Majmudar and Behringer, 2005; Wang *et al.*, 2020; 郑虎等, 2023)。Thomas 等的光弹性实验揭示了密集颗粒流中动态力链分布和应力波动(Thomas *et al.*, 2019),为深入探讨颗粒流的细观动力学机制提供了关键技术支持。

基于此,本文采用光弹性测试技术,系统开展颗粒柱坍塌物理模型试验,旨在揭示颗粒柱崩塌过程中的细观启动机制。结合光弹响应特征与粒子追踪测速(PTV)分析方

法,对坍塌过程中颗粒运动学行为与力链网络演化进行了定量表征与结构观测,系统刻画了颗粒柱由稳定状态向失稳启动转化的动力学过程。试验结果表明,颗粒柱坍塌呈现典型的滑动型破坏模式,且力链网络的重组过程与剪切带的形成在时空演化上高度一致。进一步地,从力链结构重排与非局域颗粒次级运动的角度出发,阐明了颗粒体系内部应力传递与局部剪切扰动在坍塌启动中的关键作用机制。本文研究旨在深化对颗粒尺度动力学主导下的滑坡突发启动机制的理解,为颗粒类滑坡灾害的细观力学建模与失稳判识提供实验依据和理论支撑。

1 光弹性颗粒启动模型试验

1.1 试验装置

为研究突发型滑坡变形失稳的细观行为和启动机制,本研究采用了颗粒柱坍塌试

验模型。该模型可通过控制单一的几何参数(纵横比 H/L 等)和初始体积分数(Rondon *et al.*, 2011; 来志强等, 2021; 夏嘉诚等, 2025),能够模拟复现滑坡体等从稳定到失稳的过程。图 1 展示了本实验采用的准二维光弹颗粒斜槽实验装置实物图。该装置主体由一个长 120 cm、高 50 cm、宽约 8 mm 的模型箱构成,其中模型箱内部流槽宽度设置为略大于光弹颗粒材料厚度(6.50 ± 0.16 mm),以减少启动过程的侧壁摩擦影响和颗粒面外转动。为方便观测颗粒流坍塌行为,模型箱前后侧均为透明白色有机玻璃板,左右侧及底部由有机玻璃板封闭,内部形成可供试验材料流动的流槽。此外,为控制颗粒柱的坍塌过程,在槽内距离左侧边界 $L_0 = 30$ cm 的位置安置了垂直的挡板,在垂直挡板和模型箱左侧边界之间形成一个储料仓。试样填料完成后移动挡板使颗粒柱坍塌,颗粒柱在重力作用下发生失稳启动。

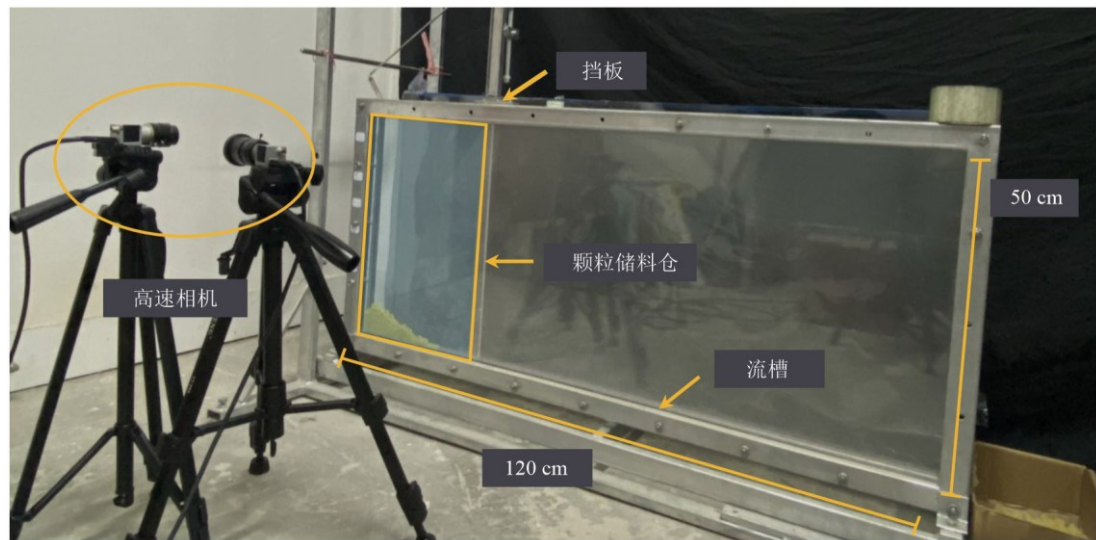


图 1 光弹性流槽试验系统

Fig. 1 Diagrams of the photoelastic experimental flume system

颗粒光弹技术是直观观察力链网络最有效的试验方法,通过偏振滤光片观察时,可以揭示双折射材料的内部应力(Howell *et*

al., 1999; Majmudar and Behringer, 2005)。本研究引入光弹性实验技术来直观观测颗粒柱坍塌启动过程中颗粒运动和细观力链

网络演化规律。根据光弹试验原理，颗粒柱模型试验基本光路设计如图 2a 所示。通过在物理光源与光弹性颗粒之间、以及光弹性颗粒与高速相机之间安置一对正交的偏振片，从而在试验模型系统中形成了稳定的偏振光场。其中，光源提供的稳定且均匀的可见光，通过偏振片将转变为偏振光穿过光弹性颗粒。处在偏振场中的光弹材料在外力作用下发生变形会产生与受力大小相关的双折射现象，通过测量光弹材料上产生的不同干涉条纹（等差线和等色线）可以定量获取

内部应力大小和分布特征(Zhao *et al.*, 2019)。同时，两台高速相机 (Basler acA2000-165uc, 2040×1086 pixels) 被平行放置在模型箱前方 1.5 米处，以记录颗粒柱坍塌启动过程。试验过程中采用分光镜对白光和偏振光下的同一区域试验图像实现同步拍摄。其中，白光下的颗粒图像用于追踪颗粒的空间位置变化，如图 2b 所示。偏振图像是在颗粒样品被偏振光照射时拍摄的，用于捕捉光弹性响应与计算接触力，如图 2c 所示。

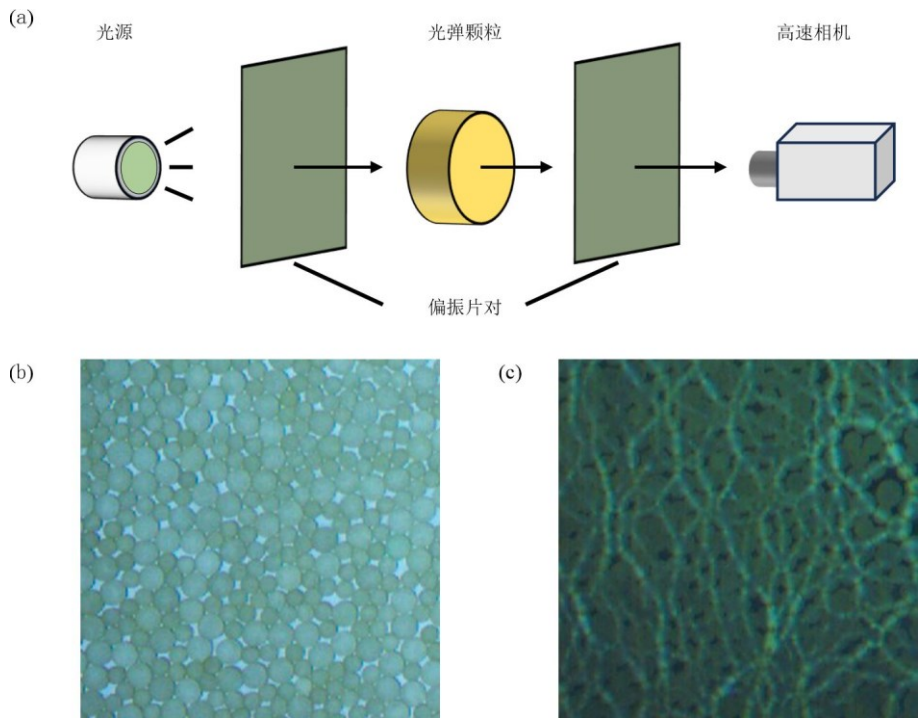


图 2 光弹性测试技术原理及试验图像

Fig. 2 Schematic Image of the Photoelastic Technique and Typical Experimental Images

(a) Schematic image of the photoelastic technique; (b) granular image in the normal white light; (c) the photoelastic response while in the polarized light

1.2 光弹性材料与试验方案

本研究采用的试验材料是定制加工的准二维颗粒圆盘，由聚氨酯板 (Vishay PSM-4) 切割而成，材料密度约为 1.04 g/cm^3 ，弹性模量约为 4 MPa 。已有研究表明，该材料在光弹性实验中具有良好的响应特性，能够

清晰反映颗粒间接触力的分布与演化 (Wang *et al.*, 2020)。通过休止角测得试验材料的摩擦系数约为 0.7。为避免颗粒因规则排列而发生结晶阻塞现象，试验选用两种不同直径的光弹颗粒，大颗粒直径 $D = 12.82\text{ mm}$ ，小颗粒直径 $d = 8.89\text{ mm}$ 。大小光弹颗粒的数量比约为 2:3。通过人工布设，

初始颗粒柱包含约 1000 枚双分散的光弹颗粒, 初始体积分数约为 74.23%, 需要说明, 体积分数(颗粒体积与总体积之比)是颗粒物理研究中常用的可控参数, 适用于实验室条件下颗粒堆积状态的定量表征(Liu and Nagel, 1998)。同时, 为降低颗粒与侧壁之间的摩擦干扰, 试验前在有机玻璃底板及表面均匀撒布滑石粉。

样品制备时, 首先将全部光弹性颗粒布置于储料区内, 储料区设置为固定的几何纵横比 $\sqrt{H_0}/\sqrt{L_0}=360\text{mm}/300\text{mm}=1.2$ 。所有颗粒在初始摆放时其轴向与模型两侧面保持垂直, 即圆盘颗粒平面平行于侧壁。由于流槽宽度与颗粒厚度接近, 颗粒转向受到显著抑制, 对光弹性测量结果的影响可忽略不计。随后, 以约 0.2 s 的时间快速抽离挡板, 挡板移除时间显著小于颗粒柱的自由落体特征时间尺度 $\sqrt{2H_0/g}$ (g 为重力加速度, 9.8 m/s^2)。从而确保挡板移除过程对颗粒柱初始坍塌行为的影响可忽略不计, 这一判断亦得到了后续实验图像的验证。挡板开启后, 颗粒柱在自身重力作用下失稳启动并发生坍塌, 整个过程由两台高速相机以 100 帧/秒的采样频率同步记录, 分别采集同一时间序列下的白光与偏振光图像, 用以分析颗粒崩塌的宏观运动特征与内部力链网络的演化规律。

1.3 数据采集与图像处理

本研究采用粒子追踪测速法(Particle Tracking Velocimetry, PTV)处理高速相机记录的白光试验图像, 以获取颗粒位置信息并量化颗粒启动运动学特征。PTV 算法能够直接识别并追踪到系统中每个颗粒在连续两帧图像之间的位移, 进而计算局部颗粒速

度场。为提高颗粒识别的准确性与追踪效率, 本文采用了一种结合粒子示踪测速与数字图像处理技术的递归跟踪方法。该方法基于运动相似性原则构建候选粒子目标区域矩阵, 能够实现间隔两帧图像中颗粒位置的精确匹配。在进行 PTV 分析之前, 我们首先对原始图像进行预处理, 包括灰度转换和自适应二值化, 以增强图像质量并提高光弹颗粒边界的识别能力, 如图 3b 和 3c 所示, 预处理后的二值图像具有良好的分割效果, 便于后续提取颗粒的形态特征。随后, 采用霍夫变换识别并定位图像中的颗粒, 获取其质心坐标与几何尺寸(图 3d)。基于上述识别结果, 进一步利用 PTV 算法计算颗粒的位移与速度。在计算过程中, 速度测量误差约为 0.08 m/s, 该误差主要来源于颗粒识别与匹配过程中亚像素定位误差(约 1 像素)与时间间隔(0.01 s)的共同影响, 与已有光弹颗粒流动研究(如 Thomas and Vriend, 2019)一致, 处于可接受范围内, 不影响对颗粒运动趋势的分析结论。

颗粒间的接触力信息及其构成的力链网络通过偏振图像分析获取。在颗粒尺度接触力提取方法中, 目前常用的主要有力求解法(Daniels *et al.*, 2017)和平均灰度梯度法(Zhao *et al.*, 2019)。力求解法能够获得颗粒间各接触点的矢量力信息, 具有较高的精度, 但其计算过程复杂、耗时较长。相比之下, 平均灰度梯度法虽然无法解析单个颗粒的接触矢量力, 但在研究所适用的应力范围内能够有效反映颗粒尺度的应力分布特征。综合考虑计算效率与实际分析需求, 本研究采用平均灰度梯度法重建颗粒尺度接触力, 以揭示颗粒启动过程中力链网络的演化规律。

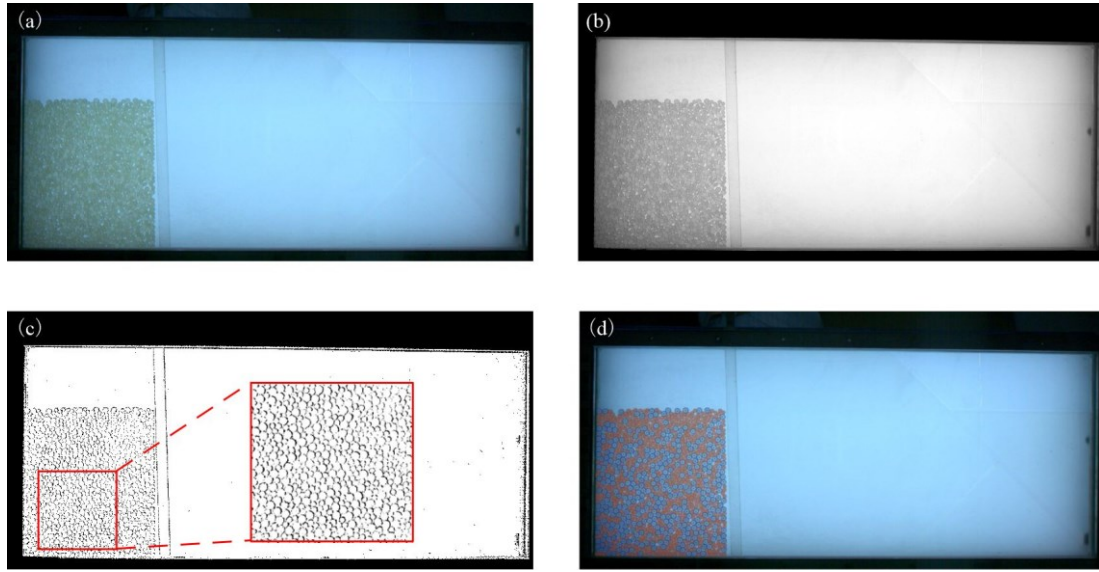


图 3 试验图像的粒子追踪识别过程

Fig. 3 PTV Analysis Process of Experimental Images

(a) Original image; (b) Preprocessed image after grayscale conversion; (c); binary image after adaptive binarization (d) Output image

2 试验结果分析

2.1 颗粒启动行为观测

本研究重点关注颗粒柱坍塌的初始阶段（对应突发型滑坡的瞬态启动），在实验中被记录为一个持续约 0.12 s 的瞬态时间窗口。图 4 展示了颗粒柱瞬态启动过程中不同时刻的颗粒运动形态，上列为高速相机记录的试验图像，下列为通过 PTV 技术处理获得的对应速度场，黄色虚线代表了颗粒系统的初始位置。从图 4a-d 可以看出，颗粒柱坍塌启动具有明显的区域演化特征。在自重作用下，颗粒柱前缘的颗粒首先变形并开始运动，随后顶部颗粒迅速向下滑移，累积的滑移变形最终演化为整个颗粒系统失稳并进入流动状态。在提取的瞬态启动时间窗口下，颗粒柱前缘沿流动方向的累积位移已超过 2 倍颗粒直径。同时，从该阶段的试验图像能够清晰观察到，挡板开启速度显著大于颗粒运动速度，表明其移除过程对颗粒柱初始崩塌行为的影响很小。

破坏线与破坏角是描述颗粒柱坍塌行为的重要特征参数，两者共同反映了滑动剪切带的形成与发展，并指示了颗粒柱的坍塌模式。为标定颗粒系统启动的破坏线，本研究采用了半经验的速度判据，用以界定滑动区与静止区，滑动区与静止区的边界为破坏线。如图 4h 所示，选取 0.08 m/s 为临界速度，可得到图中红色虚线即为颗粒柱失稳启动的破坏线。根据速度场演化图像可以看出，该破坏线初步形成于 $T = 0.04$ s，随后由于颗粒运动变形和剪切带逐渐扩展，至 $T = 0.10$ s 时形成贯穿的滑动面，上部颗粒沿着滑动面发生整体滑移。破坏线与水平方向夹角为破坏角，当破坏角小于 90° 时，颗粒系统沿剪切面发生整体滑动，表现为滑动型破坏；反之为退蚀型破坏 (Bougouin and Lacaze, 2018; Lee and Kuan, 2021)。本实验条件下所测得颗粒破坏角为 $59.6^\circ (<90^\circ)$ ，表明该坍塌过程属于典型的滑动型破坏，近似楔形块体沿破坏线发生整体瞬态滑动。

变形监测是突发型滑坡识别和现场监

测最常用的方法之一（许强等，2008；朱武等，2022）。在本研究中，试验结果表明颗粒位移场与速度场的演化趋势在空间上具有较好的一致性。但整体滑移破坏的前兆信号（破坏线的形成）在速度场中的出现比位移场提前约 0.03 s，这一现象暗示颗粒速度更适合作为判定颗粒柱失稳启动的敏感指

标。基于图像处理技术同时获取了颗粒柱坍塌过程中的垂直位移、水平位移及位移矢量分布，如图 5 展示。可以看出，沿流动方向颗粒柱前缘底部颗粒位移较小，而沿重力方向颗粒柱体右侧颗粒位移较大，该分布特征主要归因于重力与边界约束的共同作用。

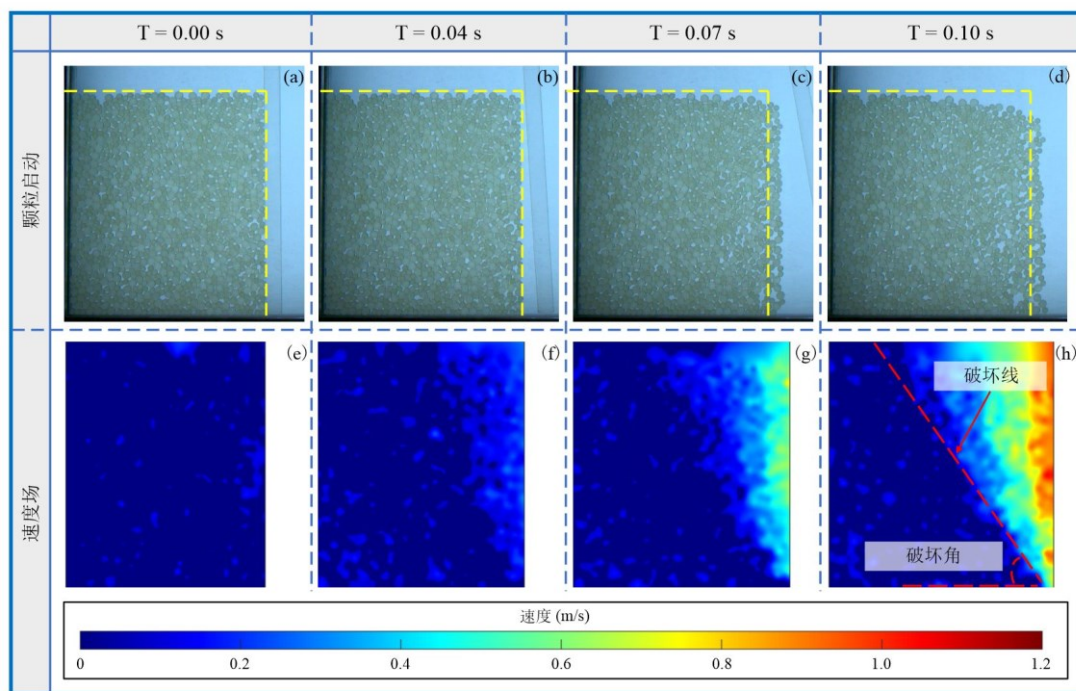


图 4 颗粒柱坍塌启动过程颗粒运动行为

Fig. 4 Particle Movement of the Granular Column Collapse

(a-d) Snapshots of the granular column collapse and (e-h) velocity field evolution of granular column at different times. The yellow dotted line marks the initial granular packing

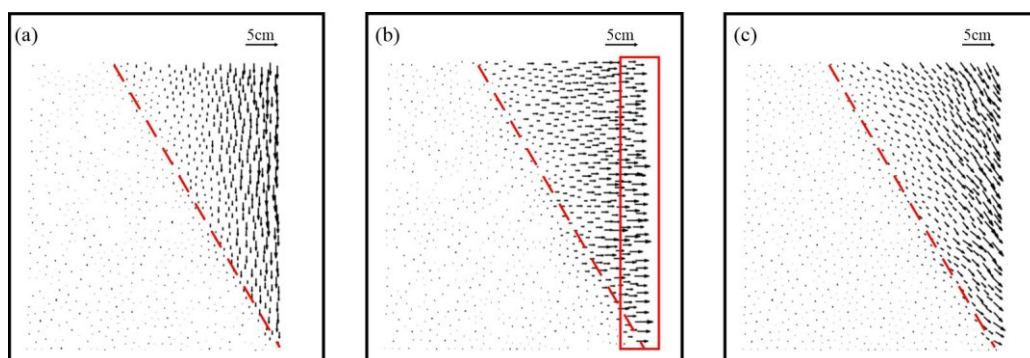


图 5 颗粒柱失稳启动的位移矢量特征

Fig.5 (a) The vertical displacement, (b) horizontal displacement, and (c) displacement field of granular column during collapse

2.2 力链网络特征

基于光弹测试技术进行颗粒材料力学特性相关试验研究的最大优势是可以直观地观测到颗粒系统失稳启动过程内部应力的网络结构。图 6a-d 为对应时刻下同步采集到的光弹性响应图像，从力链网络的演变过程可见，颗粒柱坍塌启动于 $T=0.04\text{ s}$ ，此时颗粒柱前缘区域的力链率先失稳崩溃（见图 6b 和图 6f），与初始填充状态下相对完整的力链网络（图 6a 和图 6e）呈现显著差异。

由图可看出，在竖向荷载作用下，初始状态颗粒中的力链结构形态分布比较均匀。系统中较为密集的力链主要分布在中下部区域，且主要表现为近似直线的颗粒簇，这些簇的长度可以达到十个或更多颗粒（图 6a）。在偏振场中，力链的明暗程度代表着颗粒间接触力的强弱。初始状态下颗粒柱体

底部颗粒显示出强烈的光弹性响应，而上部颗粒几乎无响应，主要在于底部颗粒承受了来自上部堆积体的自重压力。

对比启动过程中的颗粒运动特征发现，以剪切面扩展和楔形滑体形成为标志的颗粒运动行为，与细观尺度上力链网络的断裂与重组在时间和空间中具有显著的关联性。类似的试验现象在 Zheng 等（2019a）的颗粒光弹双轴试验以及 Gou 等（2023）的环剪试验中也曾被报道。随着颗粒柱坍塌过程的持续演进，密集的力链网络由于颗粒自由运动导致接触力减小，原先的强力链断裂为弱力链或是消失，尤其在破坏线上部的滑动区内，尽管部分颗粒仍能保持接触，但力链强度和接触力已明显减弱，无法承担有效荷载传递，颗粒状态转变为以颗粒流运动为主。

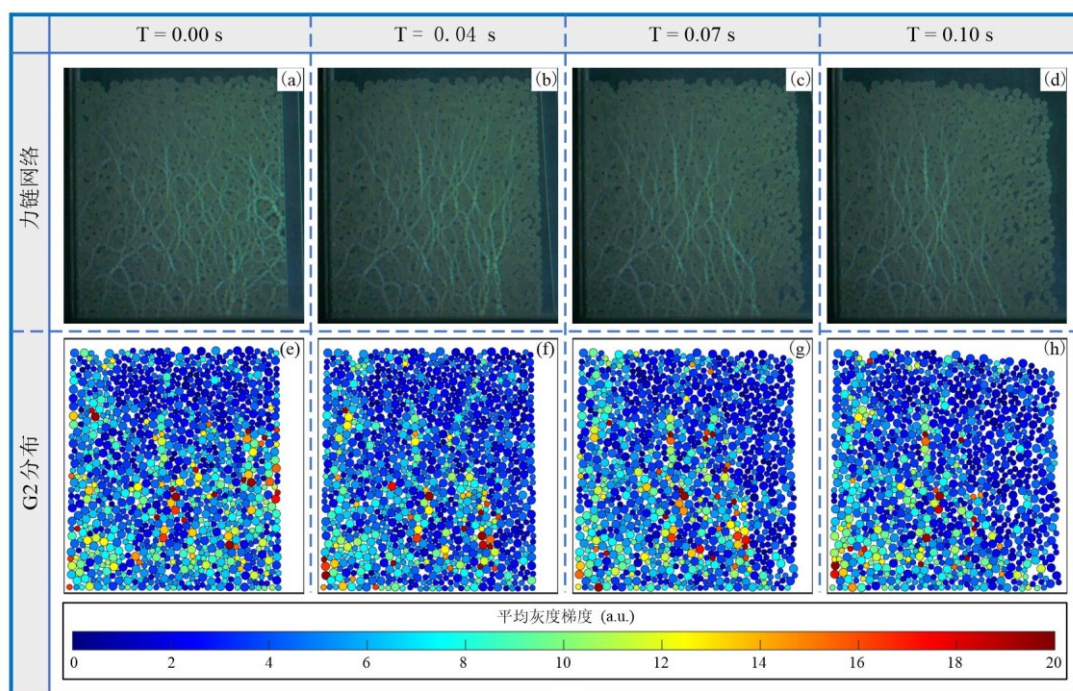


图 6 颗粒柱坍塌启动过程力链网络演化

Fig. 6 Force Chain Network Evolution of the Granular Column Collapse

(a-d) Snapshots of the force chain network and (e-h) $\langle G^2 \rangle$ distribution of each individual particles of granular column at different time. a.u. represents arbitrary unit.

光弹性响应图像除了能够定性地描述颗粒力链传递特征之外，还可以通过平均灰度梯度值 $\langle G^2 \rangle$ ，来定性比较各个颗粒的接触力大小。由图 6e-h 可以看出，颗粒系统内不同颗粒的 $\langle G^2 \rangle$ 值在时间和空间上也表现出一定的差异性。需要说明，颜色柱表示单个颗粒平均灰度梯度的相对大小，不代表绝对接触力值。在颗粒柱尚未失稳启动时，颗粒 $\langle G^2 \rangle$ 值的空间排布呈现出显著的各向异性。承载较高接触力（即更大 $\langle G^2 \rangle$ 值）的颗粒主要沿重力（垂直）方向排列，几乎从颗粒柱自由表面贯通至底部。随着坍塌过程的持续演进，颗粒柱体右上方区域的 $\langle G^2 \rangle$ 值逐渐衰减直至为零，此时颗粒间已无应力传递。这个零 $\langle G^2 \rangle$ 区域自右上区域逐渐向内及向下扩展，最终形成一个楔形的区域——与颗粒运动界定的滑动区在空间上几乎完全重合（见图 4）。

为进一步描述颗粒柱启动过程中力链

网络的几何构型及其演化规律，本研究采用强力链颗粒和弱力链颗粒对力链网络进行定义（Ladd and Reber, 2020; 孙其诚和王光谦, 2008）。具体而言，通过统计颗粒系统多有颗粒的平均 $\langle G^2 \rangle$ 值，将 $\langle G^2 \rangle$ 值高于系统平均值的颗粒定义为强力链颗粒（Strong force chain particle），其余则归为弱力链颗粒（Weak force chain particle）。图 7 为颗粒启动过程中强无力链的空间分布及其动态演变，图中圆盘代表颗粒的空间位置，其中红色的圆盘表示强力链颗粒，黑色表示弱力链颗粒，两种圆盘的分布特征直接反映了颗粒材料该状态下的内部受力分布。结果表明，以强接触力主导的力链网络数量较少，承担了绝大部分外界荷载，构成颗粒系统内部应力传递的路径，在几何方向上与外界荷载作用方向具有相关性，这种结构类似于土体中的骨架结构。而弱力链颗粒散布于系统各处，数目较多，对强力链的稳定起到辅助作用，参与强力链断裂后的重构。

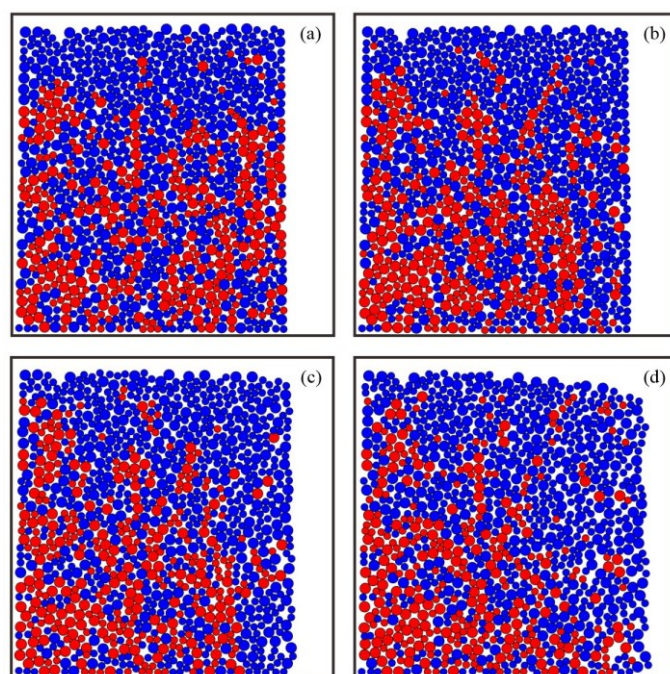


图 7 颗粒柱坍塌启动过程强力链分布特征

Fig. 7 Distribution of strong force chains in granular collapse at (a) $T = 0.00s$, (b) $T = 0.04s$, (c) $T = 0.07s$, and (d) $T = 0.10s$. The strong force chain particles are represented by red circle and weak ones are represented by blue circle

3 颗粒启动细观机制

岩土颗粒材料的宏观变形特征受其颗粒细观行为的根本影响。在剪切荷载作用下，岩土颗粒系统的颗粒运动与力链重组主导细观力学响应过程，这一过程在宏观尺度上表现为位移场和速度场的演变(Yu and Su, 2021; Zheng *et al.*, 2019b)。因此，理解细观颗粒行为与宏观变形间的物理关联的关键在于力链结构，它扮演着连接二者的桥梁，揭示了颗粒系统在形成剪切带时微观行为、变形和力学响应之间的关联机制(Li *et al.*, 2024)。

通过对颗粒运动行为分析发现，即使在远离滑动区的位置，颗粒也并非完全静止，这些区域同样存在明显的不均匀颗粒运动。为深入探究这一机制，本研究以 0.08 m/s 为速度阈值，筛选并分析了非滑动区范围内的颗粒行为，结果表明非滑动区颗粒在启动过程中发生明显的位移，并且这些位移的空间

分布呈现出一定的不规则性，与声发射技术所捕捉到的黏滑事件中的微小滑移相类似(Gou *et al.*, 2023)。

颗粒柱坍塌启动过程中观察到的非局域位移，揭示了滑坡失稳流动前的一种微观前兆，这表明颗粒系统失稳前的复杂动力学行为，在滑动区和非滑动区存在着两种密切相关的颗粒行为：滑动区的主位移与非滑动区的非局域位移。主位移是局部颗粒的集体运动，由于颗粒的结构系统无法再承受剪应力，力链网络在坍塌失效发生之前就开始断裂，其影响范围为无外界限制的局部颗粒与其邻近区域；而非局域位移远离滑动区，不会产生颗粒的系统性运动，但会出现一些显著的响应特征(Fazelpour *et al.*, 2022; Tang *et al.*, 2018)。力链网络结构在该区域能够断裂并重新排列，强力链在非滑动区域增强，在滑动区域减弱，实现不同区域之间的力传递。

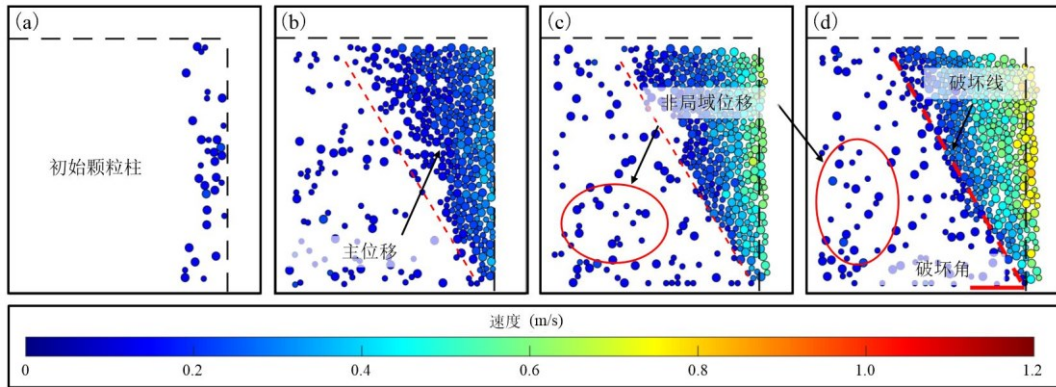


图 8 颗粒坍塌启动过程的非局域颗粒运动

Fig. 8 The nonlocal particle motion of collapsing system at

(a) $T = 0.01s$, (b) $T = 0.04s$, (c) $T = 0.07s$, and (d) $T = 0.10s$

颗粒柱启动过程中的主位移和非局域位移直观展示了突发型滑坡发生前的前兆特征，表明突发型滑坡的启动并非完全遵循以剪切带孕育发展的渐进式机制。试验结果表明，滑坡瞬态启动阶段的主位移与非局域位移在诱发机制和运动特征上存在本质差

异。系统性的主位移运动由力链结构失效与颗粒自由落体加速所引发，受重力和边界荷载主导，主要涉及局部颗粒间的相互作用；而非局域位移不伴随明显的力链网络失效，表现出显著的非局域特性，与滑动层和静止层之间的剪切运动所引发的剪应力波动有

关 (Thomas *et al.*, 2019)。

为进一步揭示力链网络演化与非局域位移的内在联系,本研究在试样系统中定义了三个不同力学响应区域:滑动区 (Region1)、过渡区 (Region2) 和准静态区 (Region3), 对各个区域内的应力传递 (以强力链演化为代表) 进行了统计学分析。图9为不同代表性区域内强力链颗粒数量及其占比的时间演化过程。可以看出, 颗粒柱在启动过程的应力传递主要分为两个阶段。第一阶段, 整体弱化: 由于颗粒柱右侧挡板

移除导致系统失去侧向支撑, 各区域内的强力链颗粒数量及其占比均呈现下降趋势, 直至达到阶段性低点 ($T=0.04s$)。第二阶段, 内部传递: 滑动区内强力链网络持续减弱, 过渡区与准静态区内逐渐增加, 表明系统内部应力传递导致力链网络发生空间重分布。这一特征与图 7(a)–(d) 中光弹性响应所揭示的力链网络变化规律相一致。结合非局域位移的运动特征可以发现, 应力传递在时间与空间域上与非局域运动具有显著的关联性, 表明颗粒柱在启动过程中的非局域位移是由系统内部的应力传递所驱动。

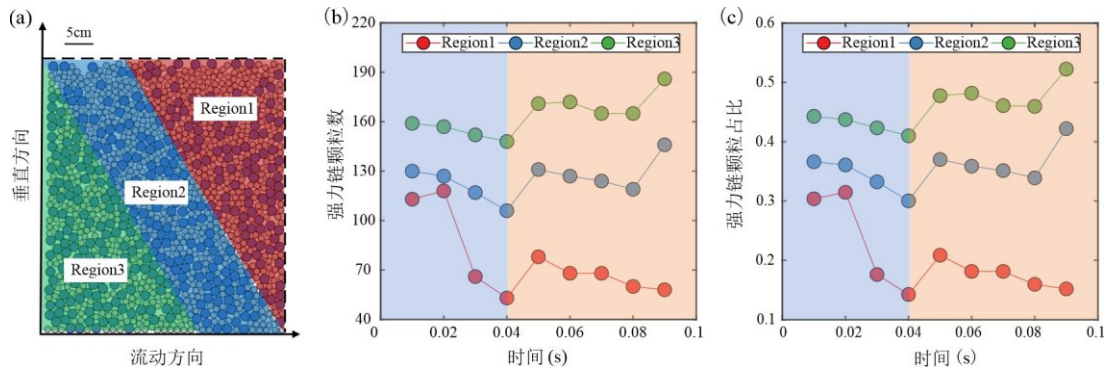


图9 颗粒柱不同区域范围内强力链网络演化

Fig. 9 Evolution of strong chain networks in different regions of granular column.

(a) Three regions defined in granular column; the evolution of (b) SFC particles number and (c) its proportion during collapsing

4. 结论与展望

本文基于光弹测试技术和颗粒柱坍塌试验模型, 从颗粒尺度位移和细观尺度力链, 系统展示了突发型滑坡瞬态启动过程的运动学行为和力链网络演化特征, 并进一步揭示了突发型滑坡失稳启动不同时空演化的细观机制, 具体结论如下:

(1) 颗粒柱坍塌启动过程中力链网络断裂重组与剪切带形成在时空上具有一致性。进一步基于颗粒速度场和位移场分析, 宏观楔形体滑移和颗粒破坏特征表现为经典的滑动型坍塌模式。

(2) 颗粒柱坍塌启动表现出复杂的动力学行为, 不仅遵循以剪切带孕育发展的渐进式演化模式, 且在远离滑动区的区域观测到明显的不规则颗粒运动 (非局域响应)。强力链颗粒数目及其占比的统计学分析表明, 应力波动通过力链进行传递诱发了非局域位移。

(3) 在空间上, 颗粒柱坍塌启动的细观机制包含两种不同模式: 在滑动区, 力链结构重排和颗粒加速在启动过程中占主导, 产生局部颗粒的集体运动; 在非滑动区, 局部剪切运动诱发应力波动, 通过应力传递激活远离滑动区的颗粒非局域位移。

本研究的重要贡献在于建立了突发型滑坡瞬态启动过程颗粒运动行为及力学特征间的时空关联。但当前试验模型该模型难以完全模拟真实滑坡体在复杂三维应力状态下的响应特征，尤其是在大尺度、快速演化下的力学行为。未来需结合三维离散元模拟，构建多参数影响下颗粒流模型，系统解析颗粒滑动模式与力链演化规律的动态关联。

References

- Bougouin, A., Lacaze, L., 2018. Granular Collapse in a Fluid: Different Flow Regimes for an Initially Dense-Packing. *Physical Review Fluids*, 3:064305. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.3.064305>
- Chen, N.Sh., Zhou, W., Yang, Ch.L., et al., 2010. The Processes and Mechanism of Failure and Debris Flow Initiation for Gravel Soil with Different Clay Content. *Geomorphology*, 121:222-230. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.017>
- Courrech Du Pont, S., Gondret, P., Perrin, B., et al., 2003. Granular Avalanches in Fluids. *Physical Review Letters*, 90:044301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.044301>
- Daniels, K.E., Kollmer, J.E., Puckett, J.G., 2017. Photoelastic Force Measurements in Granular Materials. *Review of Scientific Instruments*, 88:051808. <https://doi.org/10.1063/1.4983049>
- Fazelpour, F., Tang, Z., Daniels, K.E., 2022. The Effect of Grain Shape and Material on the Nonlocal Rheology of Dense Granular Flows. *Soft Matter*, 18:1435-1442. <https://doi.org/10.1039/D1SM01237A>
- Fern, E.J., De Lange, D.A., Zwanenburg, C., et al., 2017. Experimental and Numerical Investigations of Dyke Failures Involving Soft Materials. *Engineering Geology*, 219:130-139. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.07.006>
- Gou, H.X., Hu, W., Xu, Q., et al., 2023. Stick-Slip Nucleation and Failure in Uniform Glass Beads Detected by Acoustic Emissions in Ring-Shear Experiments: Implications for Identifying the Acoustic Emissions of Earthquake Foreshocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(8):e2023JB026612. <https://doi.org/10.1029/2023JB026612>
- Howell, D., Behringer, R.P., Veje, C., 1999. Stress Fluctuations in a 2D Granular Couette Experiment: A Continuous Transition. *Physical Review Letters*, 82:5241-5244. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.5241>
- Hu, W., Chang, C.S., McSaveney, M., et al., 2020. A Weakening Rheology of Dry Granular Flows with Extensive Brittle Grain Damage in High-Speed Rotary Shear Experiments. *Geophysical Research Letters*, 47(11):e2020GL087763. <https://doi.org/10.1029/2020GL087763>
- Jing, L., Yang, G.C., Kwok, C.Y., et al., 2018. Dynamics and Scaling Laws of Underwater Granular Collapse with Varying Aspect Ratios. *Physical Review E*, 98:042901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.98.042901>
- Johnson, B.C., Campbell, C.S., 2017. Drop Height and Volume Control the Mobility of Long-Runout Landslides on the Earth and Mars. *Geophysical Research Letters*, 44(24): 12091-12097. <https://doi.org/10.1002/2017GL076113>
- Ladd, C.R., Reber, J.E., 2020. The Effect of a Liquid Phase on Force Distribution During Deformation in a Granular System. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(8): e2020JB019771. <https://doi.org/10.1029/2020JB019771>
- Lee, C.H., Kuan, Y.H., 2021. Onset of Submerged Granular Collapse in Densely Packed Condition. *Physics of Fluids*, 33:121705. <https://doi.org/10.1063/5.0072335>
- Li, Y., Hu, W., Xu, Q., et al., 2024. Velocity Profile Geometries and Granular Temperature Distributions in Very Dense Granular Flows. *Geophysical Research Letters*, 51(2):e2023GL104410.

<https://doi.org/10.1029/2023GL104410>

Liu, A., Nagel, S., 1998. Jamming is not just cool anymore. *Nature*, 396: 21–22. <https://doi.org/10.1038/23819>

Majmudar, T.S., Behringer, R.P., 2005. Contact Force Measurements and Stress-Induced Anisotropy in Granular Materials. *Nature*, 435:1079–1082. <https://doi.org/10.1038/nature03805>

Rondon, L., Pouliquen, O., Aussillous, P., 2011. Granular Collapse in a Fluid: Role of the Initial Volume Fraction. *Physics of Fluids*, 23:073301. <https://doi.org/10.1063/1.3594200>

Shao, X.X., Zhang, H.Y., Tan, Y., 2018. Collapse Behavior and Microstructural Alteration of Remolded Loess under Graded Wetting Tests. *Engineering Geology*, 233:11–22. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.025>

Tang, Z., Brzinski, T.A., Shearer, M., et al., 2018. Nonlocal Rheology of Dense Granular Flow in Annular Shear Experiments. *Soft Matter*, 14:3040–3048. <https://doi.org/10.1039/C8SM00047F>

Thomas, A. L., Tang, Z., et al., 2019. Force fluctuations at the transition from quasi-static to inertial granular flow. *Soft Matter*, 15:8532. <https://doi.org/10.1039/c9sm01111k>

Thomas, A. L., Vriend, N. M., 2019. Photoelastic study of dense granular free-surface flows. *Physical review E*, 100: 012902. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.100.012902>

Wang, D., Zheng, H., Yuan J., et al., 2020. Shear of Granular Materials Composed of Ellipses. *Granular Matter*, 22:5. <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0965-8>

Wang, M., Niu, X.Q., et al., 2025. Flow and Deposit Characteristics of Submerged Granular Column Collapse under Different Densities Ambient Fluids. *Journal of Earth Science*, 36(6):2642–2657. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1713-2>

Wu, Y.S., Wang, D.M., Li, P.S., et al., 2023. Experimental

Investigation of Dry Granular Flows Down an Inclined Channel against a Wall-Like Obstacle of Limited Width. *Acta Geotechnica*, 18:2141–2154. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01714-2>

Yang, Q.Q., Su, Z.M., Cheng, Q.G., et al., 2019. High Mobility of Rock-Ice Avalanches: Insights from Small Flume Tests of Gravel-Ice Mixtures. *Engineering Geology*, 260:105260. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105260>

Yu, F.W., Su, L.J., 2021. Experimental Investigation of Mobility and Deposition Characteristics of Dry Granular Flow. *Landslides*, 18:1875–1887. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01593-2>

Zhang, X.M., Tahmasebi, P., 2022. Coupling Irregular Particles and Fluid: Complex Dynamics of Granular Flows. *Computers and Geotechnics*, 143:104624. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104624>

Zhao, Y.Q., Zheng, H., Wang, D., et al., 2019. Particle Scale Force Sensor Based on Intensity Gradient Method in Granular Photoelastic Experiments. *New Journal of Physics*, 21: 023009. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab05e7>

Zheng, H., Dai, G.W., Bester, C.S., et al., 2023. Development of a Biaxial Apparatus for Jamming Profiles of Photoelastic Granular Media. *Review of Scientific Instruments*, 94(3):035110. <https://doi.org/10.1063/5.0125720>

Zheng, H., Wang, D., Behringer, R.P., 2019a. Experimental Study on Granular Biaxial Test Based on Photoelastic Technique. *Engineering Geology*, 260:105208. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105208>

Zheng, H., Wang, D., Tong, X.M., et al., 2019b. Granular Scale Responses in the Shear Band Region. *Granular Matter*, 21:107. <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0958-7>

附中文参考文献

来志强, 江恩慧, 赵连军, 等, 2021. 颗粒柱坍塌运动与堆积特性的研究综述. *上海交通大学学报*, 55(04):421433.

- Lai, Z.Q., Jiang, E.H., Zhao, L.J., et al., 2021. Review of Movement and Accumulation Characteristics of Granular Column Collapse. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 55(4): 421-433 (in Chinese with English abstract).
- 孙其诚, 王光谦, 2008. 静态堆积颗粒中的力链分布. *物理学报*, 57(8): 4667-4674.
- Sun, Q.C., Wang, G.Q., 2008. Force distribution in static granular matter in two dimensions. *Acta Physica Sinica*, 57(8): 4667-4674 (in Chinese with English abstract).
- 唐辉明, 葛云峰, 张抒, 等, 2025. 滑坡预测预报研究进展与挑战. *中国科学基金*, 39(6):993-1005.
- Tang, H.M., Ge, Y.F., Zhang, S., et al., 2025. Advances and challenges in landslide prediction and forecasting. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 39(6): 993-1005 (in Chinese).
- 唐辉明, 李长冬, 胡伟, 等, 2022. 重大滑坡启滑的物理机制是什么? . *地球科学*, 47(10):3902-3903.
- Tang, H.M., Li, C.D., Hu, W., et al., 2022. What is the Physical Mechanism of Landslide Initiation?. *Earth Science*, 47(10): 3902-3903 (in Chinese).
- 夏嘉诚, 彭铭, 景路, 等, 2025. 粒径分布特征对水下颗粒柱坍塌过程影响. *地球科学*, 50(10):3916-3928.
- Xia, J.C., Peng, M., Jing, L., et al., 2025. Effect of Particle Size Distribution on Collapse of Immersed Polydisperse Granular Columns. *Earth Science*, 50(10): 3916-3928 (in Chinese with English abstract).
- 许强, 汤明高, 徐开祥, 等, 2008. 滑坡时空演化规律及预警预报研究. *岩石力学与工程学报*, 27(6): 1104-1112.
- Xu, Q., Tang, M.G., Xu, K.X., et al., 2008. Research on Space-Time Evolution Laws and Early Warning-Prediction of Landslides. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(6): 1104-1112 (in Chinese with English abstract).
- 许强, 陈国庆, 魏涛, 等, 2025. 突发型滑坡形成过程中应力-滑动力-变形动态变化特征研究. *岩石力学与工程学报*, 44(1): 1-15.
- Xu, Q., Chen, G.Q., Wei, T., et al., 2025. Dynamic characteristics of stress, sliding force and deformation during the evolution of sudden failure landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 44(1): 1-15 (in Chinese with English abstract).
- 郑虎, 牛文清, 毛无卫, 等, 2023. 颗粒材料双轴压缩试验的光弹测试. *同济大学学报(自然科学版)*, 51(11):1719-1724.
- Zheng, H., Niu, W.Q., Mao, W.W., et al., 2023. Biaxial Compression Experimental of Granular Media Based on Photo-Elastic Technique. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 51(11): 1719-1724 (in Chinese with English abstract).
- 朱武, 张勤, 朱建军, 等, 2022. 特大滑坡实时监测预警与技术装备研发. *岩土工程学报*, 44(7): 1341-1350.
- Zhu, W., Zhang, Q., Zhu, J.J., et al., 2022. Real-time monitoring and early warning technology for huge landslides. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 44(7): 1341-1350 (in Chinese with English abstract).