

基于固液耦合的滑坡碎屑流侵蚀流化机理研究

霍子豪, 张仕林, 胡卸文, 谢维维, 唐健峰, 贺旭荣, 王文沛

Erosion fluidization mechanism of landslide debris flow based on solid-liquid coupling

HUO Zihao, ZHANG Shilin, HU Xiewen, XIE Weiwei, TANG Jianfeng, HE Xurong, and WANG Wenpei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401014>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

巫溪县西溪河北岸高位高危碎屑流滑坡特征与机理研究

A study of the characteristics and mechanism of high-risk debris flow landslide on the northern bank of the Xixi River in Wuxi county
李浩, 乐琪浪, 孙向东, 杨秀元, 李刚, 李兴虎 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 13-13

滑坡碎屑流冲击拦挡结构的离散元模拟

Discrete element simulation of the impact of landslide debris flow on resistive structures
张睿骁, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 148-148

滑坡-碎屑流冲击导引结构的离散元模拟

Discrete element simulation of the landslide-debris flow impact guiding structure
张睿骁, 樊晓一, 姜元俊, 杨海龙 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 161-168

基于流固耦合的强震大型滑坡水力激发效应研究

A study of the pro-water pressure for initiation of a large landslide triggered by a strong earthquake based on fluid-structure coupling
时幸幸, 崔圣华, 裴向军, 朱凌, 杨晴雯 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 102-114

滑源区粒序分布及颗粒粒径对碎屑流冲击作用的影响研究

Particle sequence distribution and the effect of particle size on the impact effect in a fluidized landslide-debris flow
张志东, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 49-59

基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究

Research on landslide stability under different water content conditions based on the dynamic residual strength
魏占玺, 谢东武, 毋远召, 马文礼, 李元, 李万花 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 126-136



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401014

霍子豪, 张仕林, 胡卸文, 等. 基于固液耦合的滑坡碎屑流侵蚀流化机理研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 138-149.
HUO Zihao, ZHANG Shilin, HU Xiewen, et al. Erosion fluidization mechanism of landslide debris flow based on solid-liquid coupling [J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 138-149.

基于固液耦合的滑坡碎屑流侵蚀流化机理研究

霍子豪^{1,2}, 张仕林^{1,2}, 胡卸文¹, 谢维维³, 唐健峰¹, 贺旭荣⁴, 王文沛²

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心), 北京 100081; 3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072; 4. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094)

摘要: 干燥的滑坡碎屑流在动力传递过程中, 往往会在坡面或者沟道内, 与松散、高含水基底物质发生剧烈动力侵蚀作用, 导致碎屑流流动规模急剧增加, 对重要工程和人员生命产生巨大威胁。同时, 随着间隙流体和固体颗粒被夹带汇入碎屑流底部, 两者发生物质交换, 使得流动从单相转变为固液两相状态, 从而对碎屑流的流变力学行为产生重要影响。然而, 目前对碎屑流流化机理研究甚少。基于光滑粒子流-离散单元-有限元耦合 (SPH-DEM-FEM) 理论, 在大型物理模型试验基础上, 针对不同含水率工况, 围绕干燥碎屑流与基底物质的复杂动力学过程, 开展耦合数值模拟研究。结果表明: 碎屑流前缘与基底接触作用主要表现为冲切破坏和犁切作用, 接触面以剪切磨蚀为主, 随基底应力和孔隙水压力增加, 碎屑流与含水物质裹挟混合, 并逐渐表现出流态化特征; 侵蚀区在碎屑流冲击加载作用下, 基底应力出现了“超前波动”的现象, 前缘应力因碎屑流冲切作用表现为急剧升高的趋势, 而侵蚀区中部基底应力因颗粒的飞跃, 呈现幅度小、持续久的抛物曲线, 后缘基底应力表现为峰值较前缘降低的曲线; 随着基底物质由干燥工况逐渐向非饱和状态转变, 接触面剪应力和含水率呈正相关趋势, 基底侵蚀率、碎屑流冲击距离和最终堆积厚度随含水率呈现抛物线状相关关系。研究结果对碎屑流流化机理进行了探讨, 并为类似机理研究提供了有效科学思路。

关键词: 流固耦合; 滑坡-碎屑流; 动力侵蚀; 含水率; 机理探讨

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0138-12

Erosion fluidization mechanism of landslide debris flow based on solid-liquid coupling

HUO Zihao^{1,2}, ZHANG Shilin^{1,2}, HU Xiewen¹, XIE Weiwei³, TANG Jianfeng¹,
HE Xurong⁴, WANG Wenpei²

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-Hazards, MNR), Beijing 100081, China; 3. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610072, China; 4. China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China)

Abstract: During power transmission, dry landslide debris flow usually causes severe dynamic erosion when

收稿日期: 2024-01-08; 修订日期: 2024-04-28

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3004301); 国家自然科学基金项目(U2244227); 四川省青年基金项目(2025ZNSFSC1203)

第一作者: 霍子豪(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害成因与防治方面的研究。E-mail: 3266302408@qq.com

通讯作者: 王文沛(1985—), 男, 正高级工程师, 主要从事工程地质、环境地质方面的研究。E-mail: jcywangwenpei@mail.cgs.gov.cn

interacting with loose, water-bearing basement materials on slopes or within channels. This interaction leads to a significant increase in the scale of debris flow, posing a serious threat to infrastructure and human lives. Simultaneously, interstitial fluid is entrained into the bottom of the debris flow with the solid particles. The exchange of materials makes the flow change from single-phase to solid-liquid two-phase state, critically influencing the rheological and mechanical behavior of the debris flow. However, few studies investigated the fluidization mechanism of debris flow. This study employs smoothed particle hydrodynamics-discrete element-finite element (SPH-DEM-FEM) coupling theory, combined with large-scale physical model tests, to investigate the complex dynamic interactions between dry debris flows and substrates under varying moisture conditions. The results show that the contact between the leading edge of the debris flow and the basement is mainly characterized by punching failure and ploughing, and the contact surface is dominated by shear abrasion. With the increases of basement stress and pore water pressure, the debris flow is mixed with water-bearing material, and gradually presents the fluidization characteristics. Under the impact loading of debris flow, the base stress in the eroded area exhibits an “advanced fluctuation” phenomenon. The stress of the leading edge shows a significant increase due to the impact of debris flow. The base stress in the middle of the eroded area shows a parabolic curve with a slight amplitude and a long duration due to the leap of particles. The base stress of the trailing edge presents a curve with a peak value lower than that of the leading edge. With the change of substrate material from dry condition to unsaturated condition, the shear stress, and moisture content of the contact surface show a positive correlation trend. The erosion rate of the substrate, the impact distance of the debris flow, and the final accumulation thickness display a parabolic correlation with the moisture content. The results provide the understanding of the fluidization mechanism in debris flows and provide effective scientific insights for the study of similar mechanisms.

Keywords: fluid-structure interaction; landslide-debris avalanche; dynamic erosion; moisture content; mechanistic studies

滑坡具有运动速度快、致灾范围广和破坏性强等特点,其中高位远程滑坡在失稳滑动过程中会进一步碰撞解体,转化成更为破碎的碎屑流^[1-2],高速流动的碎屑颗粒与堆积物发生强烈相互作用,基底物质产生侵蚀变形^[3],经历从静态到动态的动力转换过程,并被裹挟至颗粒流底部随之以流动形式向下运移,表现出流化现象^[4-5]。受此效应影响,碎屑流流动质量和动量进一步增加,导致运动距离更远,更具破坏力^[6-7]。此外,在强降雨、冰湖溃决、冰川融化等极端情况下,碎屑物质和地表水会相互裹挟混合^[8-9],碎屑流性质不断发生改变,产生由单一固相到固液两相的转变^[10-11],进而使成灾规模放大^[12],造成更严重的伤亡和损失。因此,了解基底动力侵蚀机制,进一步研究碎屑流运动过程中,相变转换对动力学特征的影响具有重要意义。

数值模拟是量化分析碎屑流运动特征最有效的科学研究方式之一,在揭示试验中难以获得的运动特征和机理方面具有明显优势。近几十年以来,众多学者使用了大量数值方法计算碎屑流动力学参数,Kwans等^[13]采用基于网格的有限元法,将泥石流视为

一种连续均匀的流体,分析其运动过程和流变特性。Luo等^[14]基于无网格计算方法,建立泥石流固液两相的本构关系,避免了大尺度变形分析求解时网格畸变和收敛问题。Liu等^[15]使用光滑粒子流体力学、离散单元法和有限元法耦合方式,对泥石流冲击柔性屏障的变形、内力演化和能量耗散机制等进行了定量研究。Mao等^[16]通过建立计算流体力学和离散单元法耦合模型,围绕碎屑流体流变特性进行描述,研究了颗粒级配对裂隙坝体在泥石流影响下的耦合效应。Zeng等^[17]基于弹塑性本构方程,建立流固耦合分析模型,描述了颗粒间的夹带行为,对泥石流在地表结构建筑的冲击、振动效应进行探讨。Gao等^[18]基于颗粒流体力学、接触力学、计算流体力学理论,建立了两相流型滑坡的颗粒接触模型和流体平衡方程,从动力学角度对滑坡中流体和固体颗粒之间的阻力效应进行了研究。Bao等^[19]通过构建有限元-离散元-光滑粒子模型,基于拉格朗日框架计算不同类型材料之间的相互作用,从宏观角度反映岩石的致密特征和破碎过程,对古滑坡动力学过程、滑坡体动态破碎进行了模拟和分析。

虽然大多数研究在数值模型中考虑了水的影响,将碎屑流视为单相流或多相流,但在含水基底物质和滑体之间质量、动量交换方面研究甚少,忽略了运动过程中流体、颗粒和滑体相互裹挟混合作用对碎屑流动力学特征的影响。基于此,采用综合流固耦合方法,以光滑粒子-离散单元耦合理论表征基底固相和流体间的相互作用,研究碎屑流和含水基底物质动力侵蚀机理,探讨流体含量变化在碎屑流动力侵蚀效应中呈现的规律表达。

1 数值方法理论

1.1 光滑粒子流体动力学

光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)基于无网格拉格朗日算法^[20],克服了传统有限元法网格畸变和单元失效的缺点,可以有效处理碎屑流运动中大变形和流体界面的问题^[21]。光滑粒子流法是以携带物理信息、场函数信息的质点描述连续流体,通过求解质点组动力学方程并跟踪每个质点运动轨迹,继而对整个系统力学行为进行计算,此求解过程基本思想为近似计算,关键组成为核函数近似和粒子近似^[22]。近似原理是通过引入光滑核函数 $W(x, h)$, 以加权积分逼近的方式来表示近似域变量^[23-24]。

$$f(x') = \int_{\Omega} [f(x')] \delta(x-x') dx' \quad (1)$$

$$f(x) = \int_{\Omega} [f(x')] W(x-x', h) dx' \quad (2)$$

式中: h ——光滑核函数 W 支持域的光滑长度;

Ω ——包含位置矢量 x 的整个积分域;

$\delta(x-x')$ ——狄拉克函数。

以 Cubic B-Spline 函数作为光滑核函数:

$$W(x, h) = \frac{1}{h(x)^d} \theta(l) \quad (3)$$

$$\theta(l) = C \begin{cases} 1 - 1.5l^2 + 0.75l^3 & |l| \leq 1 \\ 0.75(2-l) & 1 < |l| \leq 2 \\ 0 & |l| > 2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: d ——空间维数;

C ——归一化因子;

l ——粒子 x 和 x' 之间的归一化距离。

粒子近似(图 1)通过将流体积分域离散为若干质点^[25], 计算域内有限数量的粒子以逼近场变量, 即将核函数近似表达式离散化, 成为对应积分域中粒子求和形式的过程^[26-27], 因此式(2)可近似为式(5):

$$f(x) = \sum_{j=1}^N V_j f(x_j) W(x-x_j, h) \quad (5)$$

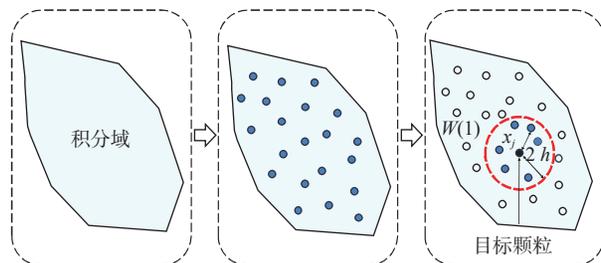


图 1 光滑粒子流粒子近似原理

Fig. 1 Approximation principle of SPH

1.2 离散单元法

碎屑流中松散基底物质和物源颗粒采用离散单元法(discrete element method, DEM)进行建模, 通过将其视为体积和质量不同的弹性球体, 基于显式算法, 更新单元运动和状态变化信息, 对每个时间步内所有离散单元物理学参数进行迭代计算^[28-29], 描述碎屑流系统的分布和演化。离散单元法求解核心为牛顿第二定律和欧拉方程, 对于单元 i , 其平动和转动方程表示为^[30]:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{k=1}^N f_{ki}^c + f_i \quad (6)$$

$$I_i \frac{dw_i}{dt} = \sum_{k=1}^N r_i \times f_{ki}^c + M_i \quad (7)$$

式中: m_i ——DEM 单元的质量;

I_i ——DEM 单元的转动惯量;

v_i ——DEM 单元速度和角速度;

w_i ——DEM 单元速度和角速度;

f_i ——外部作用于单元的力;

M_i ——外部作用于单元的力矩;

f_{ki}^c ——第 k 个 DEM 单元对第 i 个 DEM 单元接触力;

r_i ——第 i 个 DEM 单元中心到接触点向量。

离散单元法本构采取弹簧-阻尼器接触模型(图 2)^[31], 通过单元之间假性重叠提供罚函数接触力, 将其分解为法向力和切向力, 并基于离散单元相对位移对接触力进行计算^[32]:

$$f_n = -k_n \delta + d_n v_n \quad (8)$$

$$f_t = \min \left(\mu f_n, -\int k_t v_t dt + d_t v_t \right) \quad (9)$$

式中: k_n ——弹簧法向刚度;

k_t ——弹簧切向刚度;

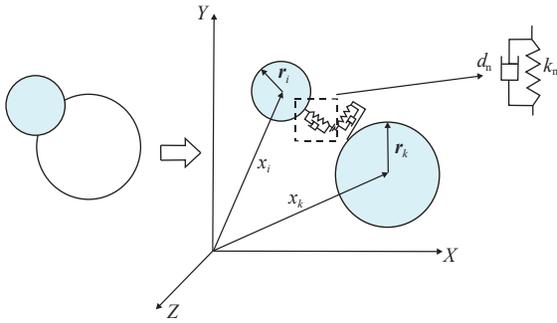


图2 离散单元法接触模型

Fig. 2 Constitutive model of DEM

d_n ——法向阻尼;

d_t ——切向阻尼;

μ ——颗粒摩擦系数;

δ ——接触位移增量。

1.3 光滑粒子流-离散单元-有限元耦合法

光滑粒子和离散单元耦合所围绕的关键问题为粒子间界面接触处理方式,通过罚函数算法对节点单元接触进行求解。SPH-DEM耦合模型如图3所示,SPH粒子基于罚函数算法对穿透深度和接触弹簧刚度比例函数进行预测,并在距离接触面穿透深度内建立物理接触,通过将DEM粒子插值到SPH模型中,满足穿透条件的DEM单元将会于与SPH接触区域产生作用,从而将流体单元对固体颗粒表面产生的力进行积分,得到流体对固体颗粒作用力^[33],通过将固体颗粒DEM粒子纳入相邻流体SPH粒子方程的插值计算中,得到固体颗粒作用于流体的反作用力^[34]。SPH粒子和DEM单元的接触力由式(10)、式(11)求得^[35]:

$$F_{sd} = K_{sd}\delta_{sd} \quad (10)$$

$$K_{sd} = SPFSCL \frac{m}{2\Delta t^2} \quad (11)$$

式中: δ_{sd} ——SPH粒子和DEM单元重叠部分;

K_{sd} ——线性弹簧刚度;

SPFSCL——软约束罚函数比例因子;

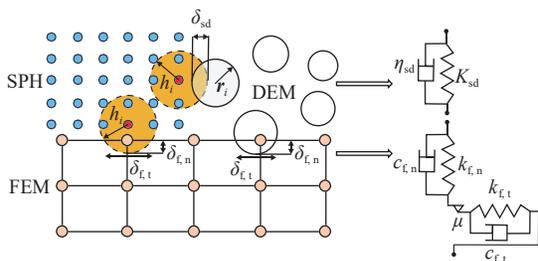


图3 SPH-DEM-FEM耦合接触模型

Fig. 3 Coupled model of SPH-DEM-FEM

m ——节点质量;

Δt ——时间步长。

此外,在粒子接触碰撞过程中,存在塑性变形能量耗散。因此,在接触模型中,以基于阻尼器模型的接触阻尼力表达此能量损失:

$$F_{\eta} = DFACT\eta_{sd}mv_{sd} \quad (12)$$

式中: η_{sd} ——阻尼常数;

v_{sd} ——SPH粒子和DEM单元相对速度;

DFACT——阻尼常数比例因子。

SPH-FEM和DEM-FEM耦合作用核心为粒子和有限元之间界面接触的处理,本质是基于罚函数算法的节点-面相互作用。在耦合过程中,通过罚函数算法检测SPH或DEM颗粒与有限元表面的穿透,在接触厚度基础上建立物理接触面(图3)。有限元与DEM单元、满足侵蚀条件的SPH粒子之间产生接触力时,通过摩擦定律和罚函数接触算法确定法向和切向冲击力见式(13)、式(14)。

$$F_{f,n} = (k_{f,n}\delta_{f,n} + c_{f,n}\dot{\delta}_{f,n})\eta \quad (13)$$

$$F_{f,t} = \begin{cases} (k_{f,t}\delta_{f,t} + c_{f,t}\dot{\delta}_{f,t}) & |F_{f,n}| \mu > |k_{f,t}\delta_{f,t} + c_{f,t}\dot{\delta}_{f,t}| \\ (k_{f,t}\delta_{f,t} + c_{f,t}\dot{\delta}_{f,t}) & |F_{f,n}| \mu \leq |k_{f,t}\delta_{f,t} + c_{f,t}\dot{\delta}_{f,t}| \\ |k_{f,t}\delta_{f,t} + c_{f,t}\dot{\delta}_{f,t}| & \end{cases} \quad (14)$$

式中: $k_{f,n}$ ——法向弹簧刚度;

$k_{f,t}$ ——切向弹簧刚度;

$\delta_{f,n}$ ——增量法向;

$\delta_{f,t}$ ——切向位移;

$\dot{\delta}_{f,n}$ ——相对法向;

$\dot{\delta}_{f,t}$ ——切向速度;

$c_{f,n}$ ——法向;

$c_{f,t}$ ——切向阻尼系数;

η ——单位法向位移矢量;

μ ——摩擦系数。

2 基于大型物理模型试验的数值模拟研究

2.1 模型建立

数值模型的建立与Zhang等^[36]大型物理模型试验相同(图4),源区料斗位于斜槽顶端,最大容积为5 m³,并由挡板控制碎屑流的激发条件,堆积平台长度为12 m,两节斜槽长度均为11 m,第一、二节倾斜角度分别为30°和50°,侵蚀区位于第一节斜槽内,长度为8 m,厚0.1 m,并将监测点设置于侵蚀区基底物质和斜槽接触面不同位置处,以研究碎屑流侵蚀过程中,基底应

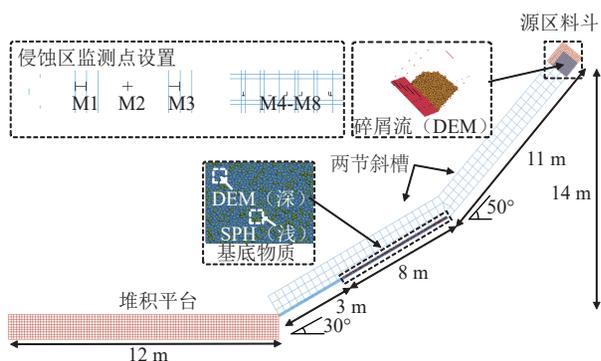


图 4 大型物理试验数值模型

Fig. 4 Numerical model of large-scale physical experiment

力的动态变化。

在碎屑流运动冲击过程中,滑槽与堆积平台变形基本可以忽略,因此将滑槽和堆积平台简化为刚性体,使用有限元法进行建模^[15]。碎屑流滑体和侵蚀区基底物质的固体颗粒均由 DEM 粒子建模,本构模型选择弹塑性材料,以此表征离散颗粒接触作用,粒径范围分别为 16~32 mm、8~16 mm。侵蚀区基底物质的液相为一种非牛顿流体,本构模型采用弹塑性流体动力材料和状态方程,通过 SPH 粒子对液相建模^[22]。通过随机数列将 DEM 粒子在 SPH 模型中进行插值,对侵蚀区固液两相均匀混合状态进行表示,固体和流体间相互作用由 SPH-DEM 耦合计算^[37]。

数值模拟过程中,首先使碎屑流滑体和基底物质在重力作用下进行沉积,消除内部作用力,达到自然堆积状态;其次,移除挡板闸门,模拟碎屑流激发条件,使碎屑流在斜槽中加速运动,侵蚀并裹挟基底物质;最后,碎屑流和基底物质相互混合,减速并停止运动,堆积于平台之上。

碎屑流滑体重度为 $1.7 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$,斜槽基底物质固体颗粒重度为 $1.35 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ 。在数值模型物理表征参数确定过程中,基于体积模型试验,使 DEM 粒子在容器内沉积,以容器内元素总质量与容器体积比值对体积密度计算^[15],将计算体积密度和实际颗粒材料的给定密度之比作为比例系数,对模型初始颗粒密度进行缩放。此时数值模型中碎屑流滑体重度为 $2.5 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$,斜槽基底物质固体颗粒重度为 $2.3 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ 。颗粒之间的等效摩擦系数则通过休止角数值模拟来确定,当休止角为 53° 时,斜槽基底物质固体颗粒等效滑动摩擦系数为 1.4,滚动摩擦系数为 0.25,碎屑流滑体等效滑动摩擦系数为 1.0,滚动摩擦系数为 0.2^[22]。数值模型中材料参数见表 1,接触参数见表 2、表 3。

从基底物质含水率角度出发,使用数值模拟的手

表 1 耦合模型材料参数设置

Table 1 Material parameter setting of model

	重度/($10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	杨氏模量/Pa
碎屑流	2.5	0.25	3.0×10^8
基底物质固相	2.3	0.25	5.0×10^6
基底物质液相	1.0		
滑槽与堆积平台	7.0	0.3	3.0×10^{11}

表 2 颗粒接触参数设置

Table 2 Contact parameter setting between particles in model

	静摩擦系数	动摩擦系数	法向阻尼系数	切向阻尼系数
碎屑流	1.0	0.2	0.4	0.2
基底物质	1.4	0.25	0.7	0.4

表 3 结构接触参数设置

Table 3 Contact parameter setting of structure in model

	静摩擦系数	动摩擦系数	阻尼系数
碎屑流-堆积平台	0.6	0.3	0.6
基底物质-堆积平台	0.6	0.3	0.6
碎屑流-滑槽	0.3	0.1	0.3
基底物质-滑槽	1.0	0.8	0.2

段对碎屑流物理试验进行分析,实现碎屑流由固相到固液两相的相变转换过程,探究碎屑流对含水基底物质的侵蚀夹带作用,对其运动、堆积过程中物理学参数、形态变化和机理进行分析。

耦合模型具体设计方案共 9 组,边界摩擦系数为 0.8,基底物质含水率分别为 0、5%、7.5%、10%、12.5%、15%、17%、20%、22%,并依次编组为 S1—S9。通过改变模型中 SPH 粒子的质量分数,探究基底物质含水率对碎屑流相变转换过程中动力学参数的影响。在含水率工况设计中,液相质量分数控制方法为:通过求解每个粒子体积和密度,对基底物质的质量含水率进行计算,通过不断调整 SPH 粒子和 DEM 粒子的数量百分比,校准模型中基底物质的质量含水率,使其同试验含水率相匹配,最终选取合理的数据进行模拟计算。

2.2 侵蚀过程动力学过程分析

2.2.1 侵蚀过程动力学特征

为了描述碎屑流对含水基底物质的动力侵蚀过程,以 S7 为例,从速度、加速度、能量等角度进行了分析,如图 5、图 6 所示。

在模型试验模拟过程中,碎屑流运动可分为 5 个阶段。

阶段 I: 碎屑流和基底物质在重力作用下完成沉积,1 s 时碎屑流被激发,受势能影响,碎屑滑体上缘、前缘开始崩塌滑动^[38],碎屑颗粒之间传递的纵向推力使加速度在极短时间内达到 6.11 m/s^2 ^[39]。随滑体后缘

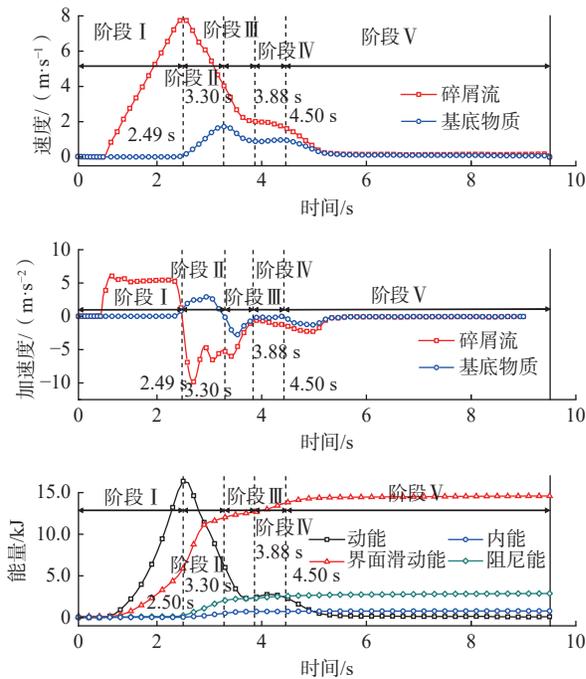


图 5 速度、加速度、能量的时间演化曲线

Fig. 5 Time evolution curves of velocity, acceleration, energy

离开原有位置, 中部逐渐拉伸, 前缘逐渐变薄, 加速度衰减至 5.18 m/s^2 , 此时碎屑流主体滑动至斜槽上, 加速度在接触面摩擦力和重力作用下达到平衡, 速度增加至 7.83 m/s 。

阶段 II: 在 2.40 s 处碎屑流流锋和基底物质发生接触碰撞, 加速度呈现断崖式降低, 2.49 s 后转为负值, 碎屑流进入减速阶段, 此时碎屑流冲击含水基底物质并铲入其中^[40], 上层基底物质发生破坏, 形成类似浪花的运动形态, 碎屑流和基底产生明显动量交换^[41-42], 基底物质速度增加至 1.80 m/s 。

阶段 III: 随着碎屑流运动过程的发展, 运动和冲

击产生的应力在基底中传递, 受碰撞挤压和快速加载的影响, 产生了超孔隙水压力, 在此作用下基底物质发生破坏, 侵蚀厚度不断加深, 并被碎屑流覆盖裹挟, 在 3.30 s 处, 大部分碎屑流和被侵蚀物质平行于基底运动, 侵蚀区物质在自重、碎屑流荷载作用下, 与下层基底颗粒产生咬合和剪切作用^[43], 此时被裹挟物质受下层基底物质摩擦和剪切作用影响, 产生的动能损耗, 超越了因碎屑流速度差产生的拖曳力带来的动能增加, 因此基底物质加速度为负值, 速度呈现降低的趋势。

阶段 IV: 碎屑流裹挟基底物质继续向前运动, 在 3.88 s 处, 被侵蚀的基底物质大部分在碎屑流和底板之间, 因为基底物质于此刻运动速度仍小于碎屑流速度, 因此两者之间可能存在一定差异。作为速度较高的一方, 碎屑流表现为覆盖在上的现象, 两者之间速度的差异, 导致拖曳力依然存在, 在自重、拖曳力和斜槽底板接触面摩擦力作用下, 基底物质受力基本平衡, 甚至呈现幅度较小的加速运动。

阶段 V: 在 4.50 s 处, 碎屑流裹挟基底物质冲击堆积平台, 由于大量动能在冲击碰撞中损耗, 碎屑流和基底物质动量迅速衰减, 5.36 s 后速度变化趋于静止。

碎屑流动力演化中具有明显的动力传递特征, 碎屑流启动后, 系统势能向滑体动能和界面滑动能转化。碎屑流和基底物质接触碰撞时, 大量动能和势能被基底变形和摩擦耗散, 转化为基底物质的阻尼能、内能和滑动界面能, 随后大部分碎屑流和被侵蚀物质平行于基底运动, 能量耗散速率降低, 界面滑动能、内能和阻尼能呈现斜率变缓的趋势。 3.88 s 碎屑流和被侵蚀物质在斜槽上继续运动, 由于摩擦和变形带来的能量损耗降低, 额外的势能向动能转化, 动能表现为

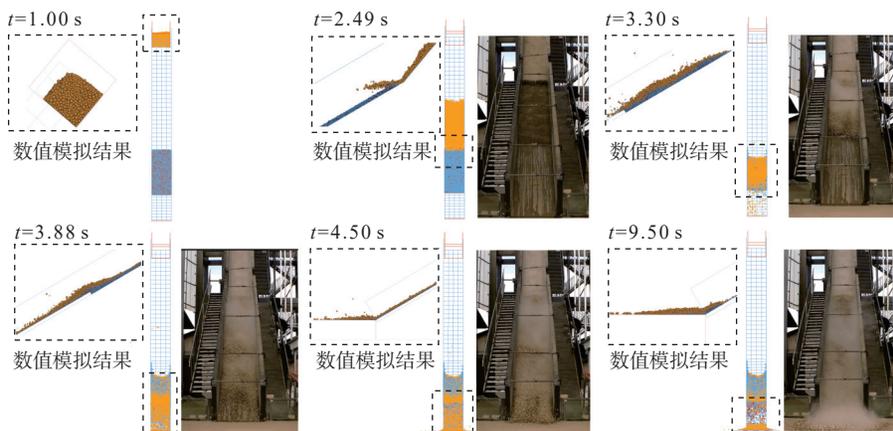


图 6 数值模拟和试验结果对比图

Fig. 6 Comparison of simulated and experimental results

小幅度上升趋势。4.50 s 碎屑流裹挟基底物质冲击堆积平台,大量能量因碰撞损耗,动能迅速降低,后续因堆积平台摩擦和碎屑流变形能量损耗,动能逐渐趋于消失。

2.2.2 侵蚀过程力学行为分析

基于数值模型侧面角度的观察,通过在侵蚀区斜槽表面设置力板传感器,如图 7、图 8 所示,分析碎屑流运动过程中,基底物质位移特征和结构动力响应变化。

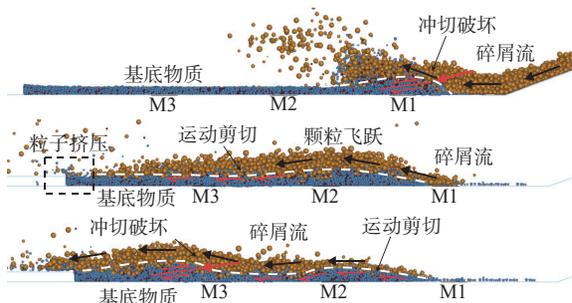


图 7 碎屑流动力侵蚀过程
Fig. 7 Dynamic erosion process of debris flow

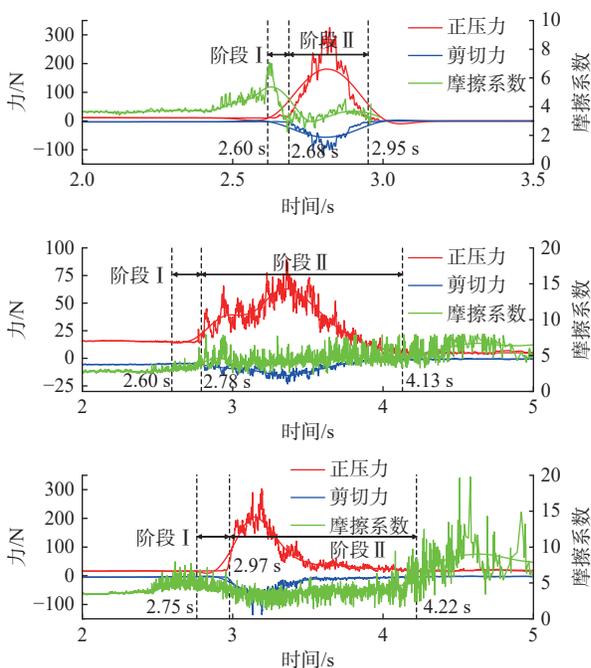


图 8 监测点受力时间演化曲线
Fig. 8 Evolution curves of force on monitoring point

碎屑流经过斜槽陡坡的加速阶段,以高速冲击侵蚀区前端并将其侵蚀。如图 8 阶段 I 所示,在碎屑流流锋到达侵蚀区前端即 M1 监测点之前,正应力、剪应力均表现为轻微震荡的趋势,因为含水基底物质在冲击加载条件下产生变形和挤压,力板处单位面积堆

积物颗粒变得更加密实,导致斜槽接触面所受压力和剪力产生变化。随着侵蚀过程的进行,碎屑流流锋和侵蚀区颗粒发生碰撞和摩擦,基底接触面正应力和剪应力急剧升高,侵蚀区物质结构在碎屑流流锋冲击下遭受破坏,形成颗粒高速飞溅的现象,此过程持续约 0.3 s,侵蚀速度极快,前端处松散堆积物被碎屑流完全夹带而走,基底应力趋近于 0。

因为碎屑流在侵蚀区前端的剧烈碰撞,动量方向发生改变,导致在侵蚀区中部附近,碎屑流颗粒运动表现为沿堆积物接触面的斜抛运动,含水基底物质受冲切作用导致的动力侵蚀效应减弱。因此, M2 监测点应力曲线表现为峰值较小的抛物线趋势,中部堆积区侵蚀量减小。随着碎屑流动力侵蚀过程进一步发展,基底表层产生剪切破坏,被碎屑流裹挟夹带共同参与运动,下部含水基底物质在快速冲击加载下,内部颗粒相互碰撞挤压,受应力传递影响,侵蚀区堆积物发生塑性流动,后端颗粒被挤压剪切而出。

碎屑流经过斜抛运动后在重力荷载和摩擦效应下动量被消耗,以一定速度铲入侵蚀区中后部,和含水基底物质产生剧烈碰撞和摩擦,在冲击部位表现为对堆积物的冲切作用。M3 监测点处应力呈陡崖式增加,而因为碎屑流在前端碰撞侵蚀过程导致大量能量被损耗。因此, M3 监测点处接触面正应力和剪应力相较侵蚀区前端均有所降低,侵蚀效应有所减弱,夹带厚度降低。碎屑流在侵蚀区中部表现为对基底表层物质的运动剪切,刮蚀并裹挟堆积物颗粒共同运动,在侵蚀区中部形成凹陷, M2、M3 监测点应力表现为震荡幅度越来越小的趋势。

3 讨论

3.1 动力侵蚀机理探讨

在碎屑流运动过程中,动力侵蚀效应对基底破坏、冲击加载等过程具有明显的影响。基于数值模拟,联系颗粒流变学行为,对碎屑流动力侵蚀作用机理进行探讨。

图 9 对碎屑流运动过程中,动力侵蚀效应作用机制进行了描述。碎屑流流锋与侵蚀区前缘因高速碰撞产生了巨大冲击力,表现为冲切破坏,伴随动量的传递和重新分配,基底表层物质解体破碎,碎屑和基底颗粒呈现向上飞溅的现象,在冲击力分量作用下,碎屑物质铲入基底表层并以推土作用对堆积物进行挤压,随之流锋前方基底物质孔隙流体压力产生部分增量。

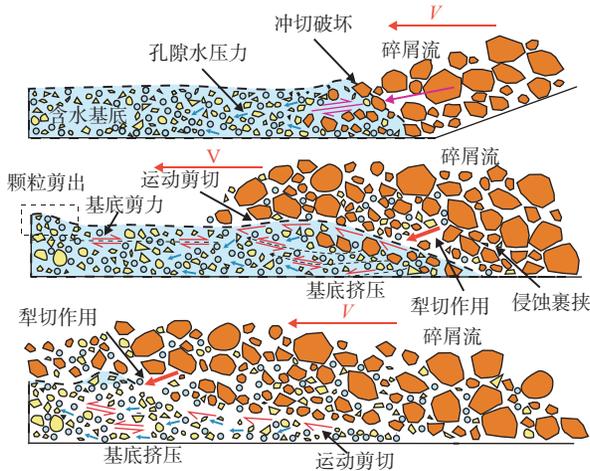


图9 碎屑流动力侵蚀效应宏观作用机制

Fig. 9 Macroscopic mechanism of dynamic erosion effect

随着碎屑流运动进程的发展, 基底堆积物在碎屑颗粒挤压下以犁切形式被侵蚀, 且伴有剪切磨蚀, 因冲击而破碎的基底物质在碎屑流裹挟下参与运动, 粗颗粒逐渐向表层偏析并输送至流锋, 细颗粒和液相通过碎屑颗粒管道运动且发生堆砌黏聚。此过程中动量不断交换, 两者碰撞混合并逐渐达到相同速度共同运动, 在持续侵蚀的动态破碎过程中, 碎屑流流量逐渐增加, 并且随着基底液相流体混合参与运动。碎屑流在物理性质上, 发生由纯固相到固液两相的转变, 在接触刮蚀范围内呈现流态化特征。受碎屑流快速冲击加载效应影响, 堆积物产生明显压缩变形和塑性流动, 但随着碎屑颗粒对下方基底物质剪切作用和对前方堆积颗粒推动挤压在基底内传递, 侵蚀区物质所受压力和剪力在空间分布上表现出差异性。力差导致基底颗粒产生相对运动的趋势, 在基底表层下方一定范围内形成差动剪切侵蚀层^[44], 后缘部分基底物质在此效应下被剪切而出, 此时因剪应力传递快于碎屑流流锋的运动, 基底接触面剪应力相对正应力表现出波峰超前的现象。

随着基底压力逐渐消散, 持续转变为侵蚀区颗粒间碰撞力和基底孔隙水压力, 基底物质表现出浆体的液化效果, 边界摩擦阻力降低, 中后缘堆积体破碎程度愈加剧烈, 在碎屑流犁切作用下, 大部分基底物质被侵蚀。

3.2 动力侵蚀过程含水率效应

图10为碎屑流侵蚀含水基底物质过程中含水率和侵蚀率、重心位置的相关关系。侵蚀率以平均侵蚀深度和原始堆积厚度比值来衡量, 在碎屑流和基底固相物质质量、边界条件一定的条件下, 侵蚀率和含水

率呈抛物线状关系^[45], 接近干燥或饱和工况中, 侵蚀率较高^[46-47]。基底物质不含水条件中, 其抗剪强度完全由固体颗粒内部摩擦咬合提供, 在碰撞应力作用下, 土体发生破坏, 基底产生侵蚀。随含水率从零逐渐增加, 土体抗剪强度在一定范围内表现出升高趋势, 这是因为间隙流体渗入土层, 基底物质从干燥转变为非饱和状态, 流体在固体颗粒之间产生负的孔隙水压力, 表现为对基质的吸力, 导致基底物质黏性增强, 影响了土层抗剪强度, 基底侵蚀厚度随之下降, 侵蚀率和含水率关系表现为负相关。含水率低于7.5%时, 碎屑流对基底的侵蚀以碰撞和冲切作用为主, 而随含水率增加、黏性阻力增强, 固体颗粒之间碰撞应力传递减弱, 黏性剪切应力增强, 基底侵蚀主导机制逐渐转变为剪切为主, 侵蚀率表现为斜率逐渐变缓的趋势。

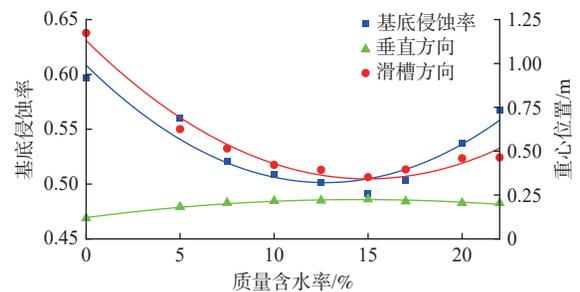


图10 侵蚀、堆积与含水率关系曲线

Fig. 10 Relationship between erosion, accumulation, and water content

含水率高于15%时, 随基底液相含量进一步增加, 侵蚀率呈现正相关关系。这是因为在碎屑流冲击加载作用下, 基底土体发生剪切收缩, 处于完全不排水或不完全排水状态, 流体孔隙水压力受到抑制并转变为正值, 固体颗粒之间有效应力降低, 土体抗剪强度减小, 基底变形和破坏加剧。并且基底物质与斜槽接触面间剪应力随含水率增加而逐渐升高^[46], 更多土体被夹带, 因此侵蚀率随含水率表现为斜率变陡的递增趋势。

碎屑流和被侵蚀物质堆积重心在滑槽方向、堆积垂直方向分别表现为开口向上、开口向下的抛物线状关系。在干燥工况下, 碎屑流动能主要消耗在接触碰撞过程中, 对基底物质的侵蚀规模大, 因此冲积距离远, 裹挟运动后混合体固体颗粒之间黏度弱, 堆积形态较为离散。随基底物质含水率逐渐上升, 土体强度提高, 接触碰撞和剪切基底耗散了大量动能, 侵蚀率和夹带规模降低, 导致冲击距离减小。此外, 碎屑流

裹挟含水基底物质后,混合体颗粒间黏性增强,且增大了与斜槽间摩擦系数,在后续斜槽表面运动过程中,内部能量进一步被消耗,导致最终堆积距离降低,堆积厚度增大。基底土体含水率高于 15% 后,由于孔隙水压力的存在,固体颗粒有效应力减小,土体强度削弱,碎屑流于剪切基底过程中,动能耗散降低,冲击距离变大,基底侵蚀率随含水率上升而逐渐增大,更大规模的含水土体被碎屑流裹挟夹带,但混合体仍处于非饱和状态,内部黏度未产生显著变化,导致最终堆积厚度呈现轻微增大的趋势。

3.3 动力侵蚀过程激振力分析

图 11 为碎屑流将含水基底物质铲出后,冲出段底板压力监测点时间激振现象, M4、M5 监测点信号时间持续时间长,表示此处碎屑流流动规模大,且峰值幅度大,即颗粒碰撞引起的激振严重,随后碎屑流颗粒动量不断消散,碰撞引起的激振逐渐减弱,基于此解释了 M7 监测点信号离散,时间持续短的现象。

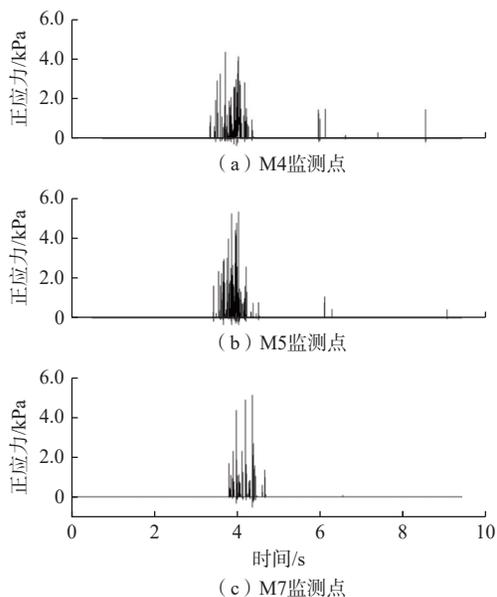


图 11 监测点应力时间激振曲线

Fig. 11 Stress excitation curve of monitoring point

图 12 描述了含水率和相对应力偏差的关系,通过计算监测点基础应力的平均值 \bar{P} ,通过式(15)、式(16)得到计算平均应力偏差(∇P)和相对应力偏差(D)^[48]。

$$\nabla P = \frac{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{P}|)}{N} \quad (15)$$

$$D = \frac{\nabla P}{\bar{P}} \quad (16)$$

图 12 通过对不同监测点相对应力偏差进行多项式拟合, M4、M5、M7 相对应力偏差表现为开口向下的抛物曲线,即随基底物质含水率增加,应力激振表现为轻微增强,而后逐渐降低的趋势。表明随基底含水率的增加,碎屑流侵蚀含水物质冲出后,动量消散加剧,固体颗粒碰撞基底产生的应力激振逐渐降低,碎屑流流态化特征也愈加明显。

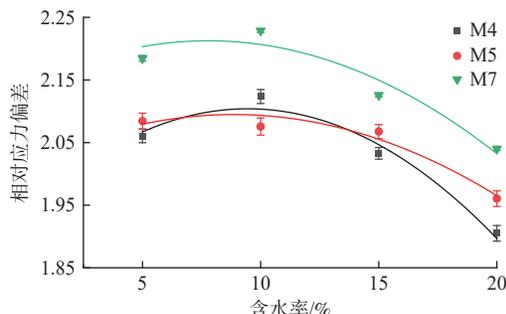


图 12 相对应力偏差与含水率关系曲线

Fig. 12 Relationship between D and water content

4 结论

(1) 基于光滑粒子流-离散单元-有限元耦合理论,构建数值模型,对碎屑流动力侵蚀过程进行对比分析。其运动过程主要包括加速、碰撞、侵蚀、裹挟和堆积阶段。整个过程中碎屑流和基底物质速度随时间呈现出先增加,后降低的趋势,且随斜率变化表现为双峰抛物曲线。能量传递特征主要表现为动能向界面滑动能、内能和阻尼能的转化。

(2) 碎屑流侵蚀过程动力传递特征中,基底应力响应具有明显的变化规律。在碎屑流挤压推动作用下,侵蚀区基底物质产生压缩变形,监测点应力表现为激振超前的现象,前缘应力因碎屑流冲切作用表现为急剧升高的趋势,而侵蚀区中部基底应力因颗粒的飞跃,呈现幅度小、持续久的抛物曲线,后缘因碎屑流大量动能被侵蚀消耗,基底应力表现为峰值较前缘降低的曲线。

(3) 通过对动力侵蚀作用机理的探讨,碎屑流流锋与基底接触作用主要表现为冲切破坏和犁切作用,接触面以剪切磨蚀为主。碎屑流冲击过程中,基底应力和孔隙水压力逐渐增加,堆积体破碎程度愈加剧烈,在犁切作用下进一步侵蚀,并被裹挟混合一同参与运动,导致碎屑流规模不断增加,且逐渐表现出流态化特征。

(4) 含水率对碎屑流侵蚀堆积过程具有重要影响,

当基底物质由干燥工况逐渐向非饱和状态转变过程中,基底和斜槽接触面剪应力和含水率呈正相关趋势,基底侵蚀率和碎屑流冲击距离随含水率呈现开口向上的抛物线状相关关系,最终堆积厚度随含水率呈现开口向下的抛物线状相关关系,和颗粒间孔隙水压力变化有关。基底流体含量增加过程中,孔隙水压力由负值逐渐向正值转变,对固体颗粒作用力体现为由吸力到压力的变化。

(5)通过碎屑流动力侵蚀过程底板监测点应力时间曲线,结合相对应力偏差和含水率关系,对冲出段应力激振现象进行了分析。结果表明,随基底含水率增加,碎屑流侵蚀含水物质冲出后,固体颗粒碰撞基底产生应力激振逐渐降低,碎屑流流态化特征愈加明显。

参考文献 (References) :

- [1] FROUDE M J, PETLEY D N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(8): 2161 – 2181.
- [2] 龙艳梅,宋章,王玉峰,等.基于物理模型试验的碎屑流流态化运动特征分析[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 126 – 136. [LONG Yanmei, SONG Zhang, WANG Yufeng, et al. An analysis of flow-like motion of avalanches based on physical modeling experiments[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 126 – 136. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 殷跃平,李滨,张田田,等.印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(3): 1 – 8. [YIN Yueping, LI Bin, ZHANG Tiantian, et al. The February 7 of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli, India[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 高浩源,高杨,殷跃平,等.青藏高原高位远程滑坡动力学研究的新问题[J]. *地质力学学报*, 2022, 28(6): 1090 – 1103. [GAO Haoyuan, GAO Yang, YIN Yueping, et al. New scientific issues in the study of high-elevation and long-runout landslide dynamics in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(6): 1090 – 1103. (in Chinese with English abstract)]
- [5] HU Wei, ZHENG Yangshuai, MCSAVENY M, et al. Fluidization of bed material caused by shear thinning during rock avalanche entrainment: Insights from flume tests and rheological experiments[J]. *Engineering Geology*, 2023, 325: 107276.
- [6] SONG Dongri, CHEN Xiaoqing, ZHOU G G D, et al. Impact dynamics of debris flow against rigid obstacle in laboratory experiments[J]. *Engineering Geology*, 2021, 291: 106211.
- [7] 殷跃平,高少华.高位远程地质灾害研究:回顾与展望[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(1): 1 – 18. [YIN Yueping, GAO Shaohua. Research on high-altitude and long-runout rockslides: Review and prospects[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(1): 1 – 18. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张议芳,刘阳,苏鹏程,等.西藏地区冰崩灾害研究进展[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(2): 132 – 145. [ZHANG Yifang, LIU Yang, SU Pengcheng, et al. Advances in the study of glacier avalanches in Tibet[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(2): 132 – 145. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 高少华,殷跃平,李滨,等.雅鲁藏布江大峡谷则隆弄高位冰岩崩灾害链动力学特征[J]. *工程地质学报*, 2024, 32(3): 996 – 1009. [GAO Shaohua, YIN Yueping, LI Bin, et al. Dynamic characteristics of the rock-ice avalanche disaster chain in the Zelongnong basin, Yarlung Zangbo river canyon region[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(3): 996 – 1009. (in Chinese with English abstract)]
- [10] CROSTA G B, CHEN H, LEE C F. Replay of the 1987 Val Pola Landslide, Italian alps[J]. *Geomorphology*, 2004, 60(1/2): 127 – 146.
- [11] OLDRICH H, EVANS S G, BOVIS M J, et al. A review of the classification of landslides of the flow type[J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2001, 7(3): 221 – 238.
- [12] 杨龙伟.高位滑坡远程动力成灾机理及减灾措施研究[D].西安:长安大学,2021. [YANG Longwei. Research on dynamic disaster mechanism and mitigation measures of the high-locality and long-runout landslide[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [13] KWANS J S E, SZE H H Y, LAM C. Finite element analysis for rockfall and debris flow mitigation works[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 56(9): 1225 – 1250.
- [14] LUO Gang, ZHAO Yongjie. Dynamics of bouldery debris

- flow impacting onto rigid barrier by a coupled SPH-DEM-FEM method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 150: 104936.
- [15] LIU Chun, LIANG Linong. A coupled SPH-DEM-FEM approach for modeling of debris flow impacts on flexible barriers[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(5): 420.
- [16] MAO Wuwei, WANG Yuhan, YANG Ping, et al. Dynamics of granular debris flows against slit dams based on the CFD-DEM method: effect of grain size distribution and ambient environments[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(11): 5811 – 5838.
- [17] ZENG Qingyuan, ZHENG Mingxin, HUANG Dan. Numerical simulation of impact and entrainment behaviors of debris flow by using SPH-DEM-FEM coupling method[J]. *Open Geosciences*, 2022, 14(1): 1020 – 1047.
- [18] GAO Yang, YIN Yueping, LI Bin, et al. The role of fluid drag force in the dynamic process of two-phase flow-like landslides[J]. *Landslides*, 2022, 19(7): 1791 – 1805.
- [19] BAO Yiding, ZHANG Yansong, CHEN Jianping, et al. Numerical investigation of river blocking process of Gangda paleolandslide at the upstream reaches of the Jinsha River, Tibetan Plateau[J]. *Landslides*, 2023, 20(9): 1865 – 1882.
- [20] 涂正楠, 冯君, 邓应进, 等. 四川甘洛县比依市村滑坡运动特征分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(1): 92 – 99. [TU Zhengnan, FENG Jun, DENG Yingjin, et al. Analysis of the landslide movement characteristics in Biyi Village, Ganluo County, Sichuan Province, through SPH numerical simulation[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(1): 92 – 99. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 于虹, 李昊, 许标, 等. 基于 SPH-FEM 耦合方法的泥石流冲击输电塔基础的动力分析 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(1): 68 – 78. [YU Hong, LI Hao, XU Biao, et al. Dynamic response of transmission tower foundation impacted by debris flow using coupled SPH-FEM method[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(1): 68 – 78. (in Chinese with English abstract)]
- [22] LIU Chun, YU Zhixiang, ZHAO Shichun. A coupled SPH-DEM-FEM model for fluid-particle-structure interaction and a case study of Wenjia gully debris flow impact estimation[J]. *Landslides*, 2021, 18(7): 2403 – 2425.
- [23] SHA Shiyin, DYSON A P, KEFAYATI G, et al. Simulation of debris flow-barrier interaction using the smoothed particle hydrodynamics and coupled Eulerian Lagrangian methods[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2023, 214: 103864.
- [24] 张卫杰, 张炜, 陈宇, 等. 黏聚力随机场波动范围的各向异性对流态性滑坡滑动距离的影响 [J]. *岩土力学*, 2024, 45(4): 1039 – 1050. [ZHANG Weijie, ZHANG Wei, CHEN Yu, et al. Influence of anisotropy of fluctuation scale of cohesion random field on the run-out distance of flow-like landslides[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(4): 1039 – 1050. (in Chinese with English abstract)]
- [25] ZOU Li, SUN Jiazhao, SUN Zhe, et al. Study of two free-falling spheres interaction by coupled SPH-DEM method[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2022, 92: 49 – 64.
- [26] EL SHAMY U, SIZKOW S F. Coupled smoothed particle hydrodynamics-discrete element method simulations of soil liquefaction and its mitigation using gravel drains[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 140: 106460.
- [27] ZENG Qingyun, PAN Jianping, SUN Hanzheng. SPH simulation of structures impacted by tailing debris flow and its application to the buffering effect analysis of debris checking Dams[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 9304921.
- [28] REN Yuhao, CAI Fei, YANG Qingqing, et al. Importance of liquid bridge forces in dynamics of rock-ice avalanches: insights from discrete element simulations[J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 165: 105904.
- [29] 徐文杰. 滑坡涌浪流-固耦合分析方法与应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(7): 1420 – 1433. [XU Wenjie. Fluid-solid coupling method of landslide tsunamis and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(7): 1420 – 1433. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 蔡国庆, 刁显锋, 杨芮, 等. 基于 CFD-DEM 的流-固耦合数值建模方法研究进展 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(1): 17 – 32. [CAI Guoqing, DIAO Xianfeng, YANG Rui, et al. Research progress of fluid-solid coupling model based on CFD-DEM coupling[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(1): 17 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [31] IWAMOTO T, NAKASE H, NISHIURA D, et al. Application of SPH-DEM coupled method to failure

- simulation of a caisson type composite breakwater during a tsunami[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 127: 105806.
- [32] JO Y B, PARK S H, YOO H S, et al. GPU-based SPH-DEM Method to Examine the three-phase hydrodynamic interactions between multiphase flow and solid particles[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2022, 153: 104125.
- [33] 赵德博, 郝梦洁, 熊昊. 基于 SPH-DEM 的泥石流冲击刚性防护结构的动力过程研究 [J]. *自然灾害学报*, 2023, 32(6): 47 - 57. [ZHAO Debo, HAO Mengjie, XIONG Hao. Research on the dynamic process of debris flow impacting rigid barrier based on SPH-DEM[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2023, 32(6): 47 - 57. (in Chinese with English abstract)]
- [34] XU Wenjie, YAO Zhenguo, LUO Yanting, et al. Study on landslide-induced wave disasters using a 3D coupled SPH-DEM method[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(1): 467 - 483.
- [35] SIZKOW S F, EL SHAMY U. SPH-DEM simulations of saturated granular soils liquefaction incorporating particles of irregular shape[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 134: 104060.
- [36] ZHANG Shilin, YIN Yueping, HU Xiewen, et al. Block-grain phase transition in rock avalanches: insights from large-scale experiments[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 128(11): e2023JF007204.
- [37] GAO Yang, LI Bin, ZHANG Han, et al. Numerical modeling of mixed two-phase in long runout flow-like landslide using LPF3D[J]. *Landslides*, 2024, 21: 641 - 660.
- [38] SHEN Weigang, ZHAO Tao, ZHAO Jidong, et al. Quantifying the impact of dry debris flow against a rigid barrier by DEM analyses[J]. *Engineering Geology*, 2018, 241: 86 - 96.
- [39] IVERSON R M, REID M E, LOGAN M, et al. Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(2): 116 - 121.
- [40] 陆鹏源, 侯天兴, 杨兴国, 等. 滑坡冲击铲刮效应物理模型试验及机制探讨 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(6): 1225 - 1232. [LU Pengyuan, HOU Tianxing, YANG Xingguo, et al. Physical modeling test for entrainment effect of landslides and the related mechanism discussion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(6): 1225 - 1232. (in Chinese with English abstract)]
- [41] MANGENEY A, ROCHE O, HUNGR O, et al. Erosion and mobility in granular collapse over sloping beds[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, 115: F03040.
- [42] CHOI C E, SONG Pengjia. New unsaturated erosion model for landslide: effects of flow particle size and debunking the importance of frictional stress[J]. *Engineering Geology*, 2023, 315: 107024.
- [43] DE HAAS T, MCARDELL B W, NIJLAND W, et al. Flow and bed conditions jointly control debris-flow erosion and bulking[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(10): e2021GL097611.
- [44] YIN Yueping, LI Bin, GAO Yang, et al. Geotechnical structures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 15(1): 66 - 101.
- [45] SONG Pengjia, CHOI C E. Revealing the importance of capillary and collisional stresses on soil bed erosion induced by debris flows[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2021, 126(5): e2020JF005930.
- [46] ROELOFS L, NOTA E W, FLIPSEN T C W, et al. How bed composition affects erosion by debris flows-an experimental assessment[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(14): e2023GL103294.
- [47] ZHENG Hongchao, SHI Zhenming, YU Songbo, et al. Erosion mechanisms of debris flow on the sediment bed[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(12): e2021WR030707.
- [48] CAGNOLI B, ROMANO G P. Granular pressure at the base of dry flows of angular rock fragments as a function of grain size and flow volume: A relationship from laboratory experiments[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B10): B10202.

编辑: 王支农