

地形影响下泥石流灾害链过程模拟及级联效应分析

张浩¹, 许斌¹, 年廷凯¹, 秦胜伍², 包晓峰³

(1. 大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026;
3. 青海省交通工程咨询有限公司, 青海 西宁 810016)

摘要: 为了探究地形因素对泥石流运动的影响,厘清复杂地形下泥石流灾害链形成过程和级联效应,采用光滑粒子流体动力学与有限元耦合方法(SPH-FEM),模拟平地、凸地形、凹地形及阶梯地形条件下泥石流运动过程,揭示4类地形条件对泥石流运动速度的影响;进一步考虑拦挡坝的溃决过程,探讨泥石流触发坝体失稳后的泥石流运动过程及其级联放大效应;最后结合深水沟槽实际工程案例,对灾害链过程中泥石流流速与构筑物所受冲击力进行评估,进一步揭示真实地形对灾害链形成过程和级联效应的关键控制作用。结果表明:地形条件显著影响泥石流动力学行为,相较于平地,凸地形加剧泥石流流速,凹地形则导致泥石流快速启动,阶梯地形则通过多次俯冲-缓冲过程促进能量耗散,延缓了峰值速度;真实地形条件下,深水槽泥石流拦挡坝溃决触发泥石流灾害链,导致泥石流流速提升40%,并产生坝体碎石二次冲击,其冲击力可达浆体的3.7倍,相较于无拦挡坝工况,溃坝工况的冲击力降低了18%,完整拦挡坝可降低流速30%、冲击力20%。研究结果不仅深化了对泥石流动力学参数与地形效应的认识,也为精准预测泥石流灾害影响范围及构建多层次防治工程体系提供参考。

关键词: 泥石流;灾害链;SPH-FEM耦合方法;地形效应;拦挡坝

中图分类号: P642.33

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)01-0212-11

Disaster Chain Simulation and Cascading Effect Analysis of Debris-flow under Complex Terrain

ZHANG Hao¹, XU Bin¹, NIAN Tingkai¹, QIN Shengwu², BAO Xiaofeng³

(1. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China;

3. Qinghai Traffic Engineering Consulting Co., Ltd., Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: To investigate the influence of terrain factors on debris flow movement and to elucidate the formation process and cascade effects of disaster chains in complex terrain, this work employed a coupled Smooth Particle Hydrodynamics and Finite Element Method (SPH-FEM). Simulations were conducted for debris flow movement under four terrain conditions: flat ground, convex terrain, concave terrain, and stepped terrain. The results reveal the impact of these four terrain types on debris flow velocity. Furthermore, by considering the breaching process of barriers, the post-failure debris flow dynamics and cascading amplification effects are investigated. Finally, combining the actual engineering case of Shenshui Gully, the flow velocity and impact force on structures during the disaster chain are evaluated, further highlighting the key controlling role of real terrain on disaster chain formation and cascading effects. The results indicate that topographic conditions significantly affect the dynamic behavior of debris flows. Compared with flat terrain, convex topography increases flow velocity, concave topography accelerates debris flow initiation, and stepped terrain promotes energy dissipation through repeated plunging-buffering processes, delaying peak velocity. Under real topo-

收稿日期:2025-09-25

修稿日期:2025-11-01

基金项目:国家自然科学基金(U2443227,42377185)

作者简介:张浩(1998—),男,博士研究生,研究方向为岩土灾害数值模拟。E-mail:haoz@mail.dlut.edu.cn

通讯作者:年廷凯(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事岩土工程、地质灾害及生态护坡等领域研究工作。

E-mail:tknian@dlut.edu.cn

graphic conditions, the breaching of a barrier in the Shenshui Gully case triggered a debris flow disaster chain, resulting in a 40% increase in flow velocity and generating secondary impacts from barrier fragments, with impact forces up to 3.7 times that of the slurry. Compared with the no-barrier scenario, the impact force in the dam-breach case was reduced by 18%, while an intact barrier could reduce flow velocity by 30% and impact force by 20%. These findings not only deepen the understanding of debris flow dynamics and topographic effects, but also provide a theoretical reference for accurately predicting the influence range of debris flow disasters and constructing a multi-level prevention engineering system.

Keywords: debris flow; disaster chain; SPH-FEM coupling method; topographic effect; debris flow barrier

泥石流作为山区常见的地质灾害,地形对其形成、运动与堆积全过程产生极其重要的影响,特别是其冲击易引发拦挡坝破坏,从而触发“冲击-溃坝-再冲击”的多级灾害链,并产生“影响范围扩大、破坏程度加剧”的级联响应。泥石流是一种含有大量泥沙、碎屑和大块石的特殊洪流,具有暴发突然、破坏力强、预警难度大和防治困难等特点^[1-3],如 2024 年 8 月 3 日,四川省康定市日地沟突发大规模泥石流,该泥石流由短时强降雨触发,沿沟道裹挟数十万立方米泥石并携带最大直径达 6 m 的大块孤石冲击下游。灾害导致道路与桥梁被冲毁,多处民房被毁坏,造成 27 人伤亡与失踪,交通、电力、通信设施中断,需紧急转移安置近千人^[4]。泥石流的发育与地形地貌条件存在密切的关系,地形地貌为泥石流提供了物质运动和能量转化的空间载体,还通过特定的形态特征控制着泥石流的形成、运动与堆积全过程^[5-8]。此外,由于人类工程干预(如拦挡坝等)可能触发一系列复杂的级联效应形成灾害链,泥石流自身的动力作用以及工程结构对其的响应相互交织,扩大灾害影响范围、加剧破坏程度^[9-12]。因此,开展地形影响下泥石流运动过程模拟和灾害链分析,不仅能够深入揭示泥石流动力学参数与地形的相互作用规律,也为精准预测泥石流灾害的影响边界、构建多层次防治工程体系提供关键理论支撑。

泥石流组成成分复杂且具有多相性,这显著影响着其运动与冲击致灾过程。为此,许多学者针对其运动规律开展了研究。Takahashi 等^[13]基于扩散应力理论和水槽模型试验研究,建立了泥石流动力学的理论框架,推导出考虑颗粒碰撞效应的泥石流运动控制方程。Zheng 等^[14]建立了基于 CFD-DEM 耦合框架的泥石流侵蚀动力学数值模型,实现了流体-颗粒两相耦合作用下泥石流运动及侵蚀过程。成永刚^[15]基于工程地质调查构建了泥石流物质来源、启动、加速、流通和堆积的完整空间格局,为泥石

流运动模拟提供了基础参数与分区依据。李百隆^[16]发展了 SPH-DEM 耦合数值方法,考虑侵蚀作用诱发的三相耦合运动过程,实现了泥石流运动侵蚀过程模拟。张学军^[17]以四川省阿坝藏族羌族自治州泥石流为对象,基于二维圣维南方程组描述泥石流运动,评估了频率 5%、2% 和 1% 的降雨重现期下的泥石流的运动特征。巴刚等^[18]采用 SPH 方法模拟了极端降雨触发滑坡-泥石流过程,分析了小流域坡体尺度内聚力、内摩擦角等岩土参数对泥石流运动距离的影响。

在泥石流致灾危害方面,其快速运动造成的冲击作用对结构物的破坏最为严重。泥石流成分复杂且暴发突然,直接测量其冲击力极具挑战性,而经验公式又因地域和类型差异适用性有限。因此,许多学者采用数值模拟与物理模型试验来评估其冲击作用。Bugnion 等^[19]通过物理模型试验方法,系统研究了泥石流对防护结构的动力作用机制,基于监测结果,定量表述了冲击力与流速关系为二次幂函数。韩俊辉^[20]建立了基于 SPH-FEM 耦合框架的泥石流-桥墩相互作用三维数值分析体系,系统揭示了不同截面形状对泥石流冲击荷载分布特征的影响规律。Dai 等^[21]基于光滑粒子流体动力学(SPH)方法,构建了泥石流-拦挡坝流固耦合模型,揭示了泥石流运动及冲击过程的时空演化特征。廖鑫昌^[22]考虑大块石对泥石流的灾害放大效应,评估了含大块石泥石流对桥梁基础冲击作用,探究了泥石流浆体、大块石和桥梁结构间的相互作用。赵雷等^[23]构建了 ALE-FEM 耦合计算模型,研究了泥石流冲击作用下被动柔性防护网力学响应特征,以泥石流流速和冲击能量作为变量,探究被动柔性防护网的极限防护能力。

然而,当前泥石流运动及致灾过程的数值模拟研究存在两个不足:其一,现有模型多局限于仅考察浆体的冲击作用,而复杂地形因素对泥石流运动路径及能量演化的控制作用未充分考虑;其二,现有研

究普遍忽略了泥石流的灾害链效应,导致灾害系统演化的链式响应机制缺乏深入认知。

基于此,本文采用 SPH-FEM 流固耦合方法,考虑地形效应及泥石流-结构物的相互作用,开展地形影响下泥石流运动与灾害链效应的流固耦合模拟,以揭示复杂地形下泥石流的运动规律,分析拦挡坝溃坝后的级联效应,并围绕深水沟槽泥石流实际灾害开展案例应用和危害评估,再现泥石流灾害过程地形的影响和灾害链特征。

1 考虑地形条件的泥石流流固耦合计算模型

1.1 基于 SPH-FEM 流固耦合数值方法

在工程与科学计算中,复杂多物理场问题(如爆炸冲击、流体-结构相互作用)常涉及大变形与结构响应的耦合。传统有限元法(FEM)在处理结构变形时精度高,但对极端变形(如碎裂、流动)易出现网格畸变;光滑粒子流体动力学(SPH)作为无网格方法,擅长模拟大变形流体,但边界条件与计算成本限制了其单独应用。因此,SPH-FEM 耦合方法应运而生,通过结合两者优势,实现跨尺度、跨介质的协同仿真。

对于 SPH 模拟的流体部分,通过计算域内携带物理性质 $f(x)$ 的粒子表达,其运动受基本控制方程约束,其属性通过支持域内核函数的加权求和得到,控制方程由核近似表达式控制:

$$\langle f(x_i) \rangle = \int_{\Omega} f(x_j) \delta(x_i - x_j) dx_j \quad (1)$$

式中: i 和 j 为表示计算域中的粒子(i 和 j); $\delta(x_i - x_j)$ 为狄拉克函数,符合紧致性条件,加和为1,用光滑核函数 $W(x_i - x_j, h)$ 代替,其光滑半径为 h 。

$$\langle f(x_i) \rangle = \int_{\Omega} f(x_j) W(x_i - x_j, h) dx_j \quad (2)$$

同理,其他函数相对应的导函数为:

$$\langle \nabla \cdot f(x_i) \rangle = - \int_{\Omega} f(x_j) \nabla W(x_i - x_j, h) dx_j \quad (3)$$

这一转换过程如图 1 所示。基于等体积法替代用 V_j 替代了计算域粒子 j 处的体积单元 dx_j ,则粒子数为 N 、光滑核函数为 W_{ij} 的核近似公式(2)变为:

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W_{ij} \quad (4)$$

式中: m_j 为粒子体积; ρ_j 为粒子密度。

同理,公式(3)可表示为:

$$\langle \nabla f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (5)$$

式中: $\nabla_i W_{ij}$ 为光滑函数 W_{ij} 在粒子 i 处的导数。

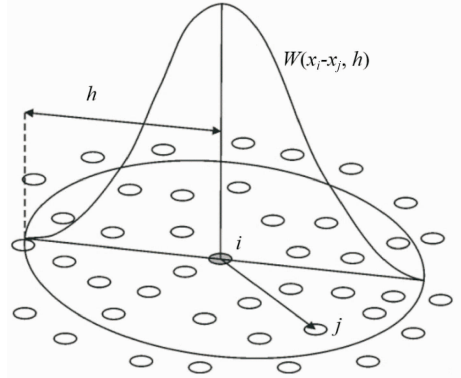


图 1 粒子近似示意^[24]

对 FEM 描述的固体结构物模拟时,求解其运动与变形,在此过程中仍然遵循经典的、基于连续介质力学的控制方程:

$$\rho = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma + f^b \quad (6)$$

式中: ρ 是固体的密度; u 是位移矢量; t 是时间; σ 是应力张量; f^b 是固体所受的体积力。

针对泥石流、固体块石与结构物的相互作用问题,本研究采用分区耦合策略,将计算域划分为处理结构的有限元(FEM)区域与模拟流体的光滑粒子流体动力学(SPH)区域,两者通过交界面进行物理量传递。在交界面处,SPH与FEM的相互作用借助罚函数接触算法实现。具体而言,当SPH粒子发生穿透时,程序会依据穿透深度与接触刚度计算出相应的接触力。随后,SPH粒子受到FEM单元施加的反作用力并据此更新运动状态,同时FEM节点也会受到SPH粒子的作用力,进而求解结构变形^[25]。此方法有效结合了SPH在大变形流体模拟与FEM在结构力学分析中的各自优势。为实现上述计算过程,基于LS-DYNA软件进行数值求解,以模拟泥石流的远程运动并揭示其冲击致灾机理。

1.2 模型设置及地形条件

本文构建了一个典型泥石流灾害链效应的分析模型,如图 2 所示,由斜坡地表、泥石流浆体、大块石、拦挡坝和桥梁组成。斜坡地形长度 100 m,宽度为 9 m,在斜坡上设置一处重力式拦挡坝,斜坡顶与拦挡坝体水平距离为 75 m。斜坡末端为水平地面。重力坝底部厚度为 2.5 m,宽度为 9 m,坝顶厚度为 1.5 m。泥石流浆体沿河道中线建立,长 10 m,宽 6 m,高 4 m。斜坡末端地面设置简支梁桥,拦挡坝与桥梁之间水平距离为 40 m。桥梁由桥墩与钢箱梁

组成,桥墩高 6 m,顶部设置橡胶支座与钢箱梁连接,跨径 8 m,主梁顶宽 4.5 m,底宽 4 m,高度 1.5 m。

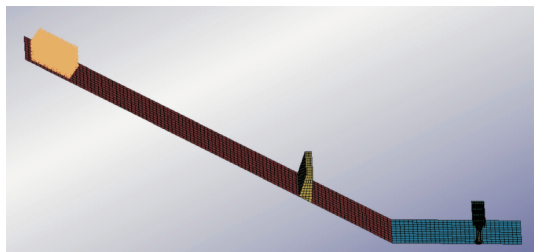


图 2 泥石流冲击效应的流固耦合数值模型

泥石流易发区普遍具有地形破碎、沟谷结构复杂等特征,完全复现真实地形不仅会导致计算量呈几何级数增长,更会模糊控制性参数的敏感度识别。因此,采用科学的地形概化方法提取关键地貌参数,已成为平衡模拟精度与计算效率的必要技术途径^[26]。为研究地形影响下对自身运动过程及结构物动力响应的影响,按表 1 设置工况进行计算分析。

表 1 地形条件影响的工况设置

工况编号	地形坡度/(°)	斜坡形态	摩擦系数
1	30	平地	0.12
2	—	凸地形	0.12
3	—	凹地形	0.12
4	—	阶梯地形 1	0.12
5	—	阶梯地形 2	0.12

将泥石流易发斜坡划分为凸地形、凹地形、阶梯形和平地四类基本坡形,调整平面形斜坡模型的斜坡坡形,如图 3 所示,其中凹凸地形斜坡沿平面形斜坡对称,曲率一致。阶梯形根据第一个台阶的长度(两倍初始泥石流长度与三倍初始泥石流长度)设置了两种工况。研究斜坡坡形对泥石流运动流固耦合的影响。

针对地层基岩,采用刚性材料模型模拟其不可变形特性,在保证计算效率与数值稳定性的同时准确反映其高刚度特征。材料参数参考典型花岗岩设定:密度 3 000 kg/m³,弹性模量 30 GPa,泊松比 0.25。拦挡坝与桥墩作为关键承灾结构,选用 C40 混凝土材料,并采用连续盖帽混凝土本构模型(CSCM)模拟其在冲击荷载下的动态力学行为,参数取值见表 2。

泥石流浆体采用不可压缩粘性流体材料模型,结合 Murnaghan 状态方程,通过 SPH 方法实现流固耦合模拟,能够同时捕捉冲击瞬态响应与长程流动

过程。基于实地调查,将泥石流判定为稀性类型,密度取 1 600 kg/m³,粘度设为 0.05 Pa·s。模型设定中,地形采用全约束,泥石流与大块石为自由运动;坝肩与地基固结约束,并设置 SPH 粒子失活机制以提升计算效率。泥石流与河道、坝体摩擦系数取 0.12,大块石与各界面摩擦系数设为 0.4。

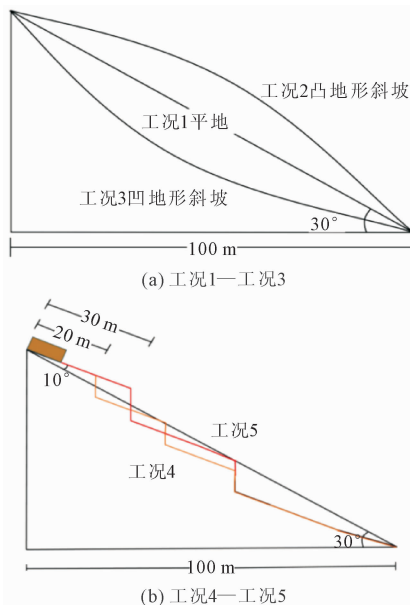


图 3 斜坡形态纵断面图

表 2 混凝土材料参数

密度 ρ /(kg·m ⁻³)	控制参数	预损伤	侵蚀系数
2320	0	0	1.1
恢复系数	盖帽选项	抗压强度/MPa	骨料粒径/mm
10	0	40	0.05

1.3 方法准确性检验

基于构建的 SPH-FEM 流固耦合数值模型,对 Wang 等^[27]水槽试验进行了模拟复现,再现水槽模型试验的全过程,通过数值结果与水槽模型试验进行对比,验证了 SPH-FEM 耦合数值分析方法的准确性。

水槽模型试验如图 4 所示,主要由储料罐、水槽和测量模块三部分组成。储料罐容积为 0.15 m³,水槽由上倾斜槽与下水平槽组成,上倾斜槽倾斜角度 30°,长 4 m、宽 0.3 m、高 0.4 m,引导泥石流向下流动,下水平槽长 2 m、宽 0.3 m、高 0.4 m,数值模型严格遵循实验装置的几何尺寸。

储料箱与水槽采用壳单元刚体模型,材料属性设置为钢材,桥墩同样采用实体弹性单元模拟钢材力学特性,重点捕捉其在冲击载荷下的整体位移响应。泥石流浆体通过光滑粒子流体动力学(SPH)方

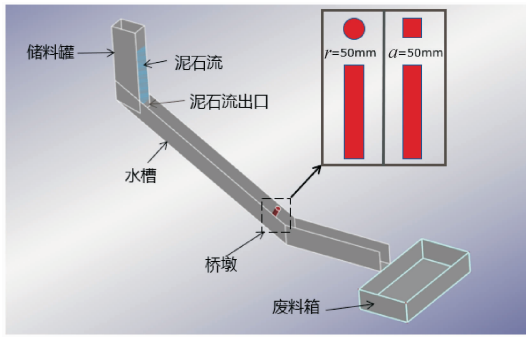


图 4 数值计算模型

表 3 材料参数

名称	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比	粘度 /($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
水槽	7850	210	0.3	—
桥墩	7850	210	0.3	—
稀性泥石流	1600	—	—	0.05
粘性泥石流	2100	—	—	1.50

法建模,选用不可压缩流体模型,粒子初始间距设置为 15 mm,颗粒间压力演化采用自动点面接触方程

描述,以准确表征泥石流的压缩特性与能量耗散机制,模拟相关的材料参数见表 3。

不同桥墩形状和泥石流工况下数值模拟结果如图 5 所示,对比分析发现,稀性泥石流工况,圆形桥墩实测最大冲击力为 80.5 N,数值模拟值为 82.1 N,相对偏差为 1.98%;而方形桥墩工况的实测值与模拟值分别为 161.6 N 和 167.8 N,偏差幅度为 3.83%。在粘性泥石流作用下,圆形桥墩的实测与模拟最大冲击力分别为 78.1 N 和 81 N(偏差 3.71%),方形桥墩则分别为 125.8 N 和 130.2 N(偏差 3.50%)。两类方法获得的冲击力时程曲线具有显著一致性,基于此检验流固耦合方法有效性。

2 泥石流运动过程的地形效应分析

泥石流的运动演变与冲击结构物是一个复杂的多因素耦合作用过程,地形地貌不仅为泥石流提供了物质运动和能量转化的空间载体,还通过特定的形态特征控制着泥石流的形成、运动与堆积全过程,因此,泥石流运动过程与地形条件的耦合关系决定了数值模拟必须建立在地貌特征准确表达的基础之上。

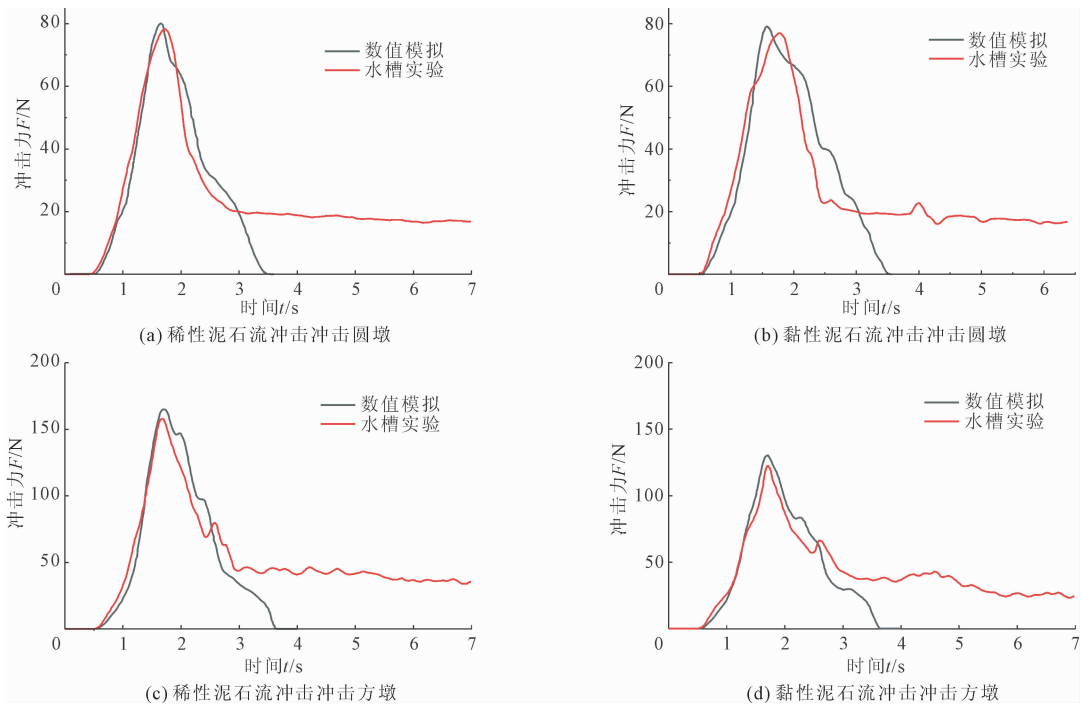


图 5 冲击力时程曲线

2.1 凸地形效应

泥石流在运动过程中形成的“龙头”现象是其最具破坏性的特征之一。龙头是泥石流运动的前锋部分,长度可达数米至数十米,类似“波峰”,如图 6 所示,常伴随泥浆飞溅和剧烈震动。而后续的“龙

身”则以细颗粒泥沙为主,形成明显的分选结构。

图 7 为平面形、凸地形与凹地形的浆体龙头处的速度时程曲线。对于凸地形条件下泥石流浆体的运动速度在第 6.3 s 达到了峰值 16.1 m/s,显著高于水平地面(约 15.0 m/s)与凹地形(约 13.2

m/s),体现出更强的加速能力。

此外,泥石流运动过程可以分为两个显著加速阶段,第一阶段为 0~4.2 s,流体平均加速度为 2.3 m/s^2 ,泥石流处于启动与初始流动阶段,加速度逐渐增大,坡度较缓,泥石流速度增长较慢,此时流体内部颗粒间碰撞频繁,形成密集的力链网络,大量动能通过颗粒摩擦与碰撞耗散。底部摩擦阻力占主导地位,限制了加速度的提升。同时,浆体尚未完全流体化,粗颗粒与基床的直接接触进一步增大了运动阻力。第二阶段为 4.2~6.3 s,加速度突增至 3.8 m/s^2 ,为前一阶段的 1.65 倍。此时重力分量增加,而底部摩擦应力因颗粒间碰撞频率降低反而减小。这种驱动力增强与阻力减弱的协同效应,导致速度在转折点后实现二次加速,最终形成 16.1 m/s 的峰值速度。当泥石流前锋运动至凸地形斜坡中点后,坡度逐渐增大,重力驱动力倍增,使重力沿斜坡方向的分量显著提升,这也为流体提供更强的加速动力。而随着流速加快,浆体内部发生剪切稀化,颗粒间碰撞频率降低。粗颗粒逐渐被流体包裹,形成表层高速剪切层,底部摩擦系数降低。这种“润滑效应”使能量损耗减少,更多动能用于速度提升。且由于惯性累积效应,前期积累的动量在陡坡段得到释放,流体惯性进一步放大加速效果。

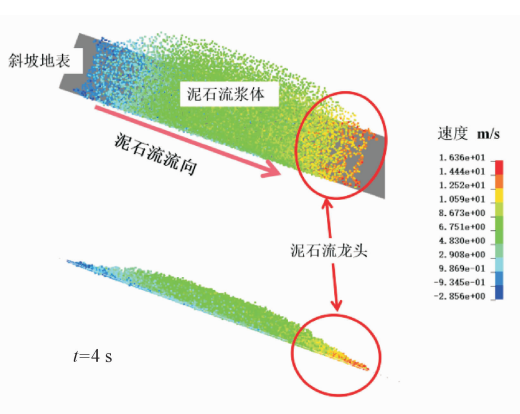


图 6 泥石流龙头位置(工况 1)

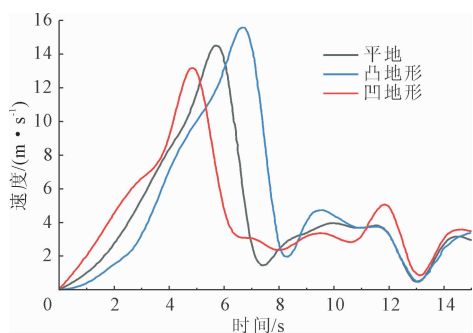


图 7 不同斜坡形态下泥石流浆体速度时程曲线

2.2 凹地形效应

凹地形泥石流呈现明显的“快速启动-快速衰减”特征。如图 7 显示,凹地形在初始阶段具有最强的启动能力,其前 3.4 s 的平均加速度达到 4.5 m/s^2 ,明显高于平面形(约 3.1 m/s^2)与凸地形(约 2.3 m/s^2)。因此,龙头速度在初期迅速升高,最早到达 12 m/s 以上的高流速区。然而,当泥石流进入下游缓坡段后,速度迅速衰减,其主峰由 12.1 m/s 降至约 6.8 m/s ,衰减幅度达 43.8%,高于凸地形与平面形。这是由于凹地形前段坡度较陡,泥石流获得的动量较大,但在进入缓坡段时动能迅速耗散,浆体剪切速率降低,触变性恢复、黏度升高,使流动阻力迅速增大。

主要原因是凹地形坡度呈递减趋势,使得重力沿坡方向分量逐渐减小,加速作用减弱;在坡度突变区域,浆体在高速冲击下短暂发生剪切软化,但该状态仅持续约 1~2 s,随后黏度恢复,使速度增长受抑,进一步加剧了速度衰减过程。由于前期的运动速度大,泥石流最先冲击到拦挡坝。凹地形斜坡的坡度沿流程逐渐增大,形成递进式重力强化的动力学环境。泥石流在运动过程中,重力沿斜坡方向的分量随坡度增加而逐渐减少。在坡度突增区域,浆体因剧烈剪切暂时失去触变性(静置后恢复黏度的能力),导致阻力进一步降低。仅维持短暂时间,随后黏度恢复抑制速度持续增长。

2.3 阶梯地形效应

图 8 揭示了阶梯地形梯度对泥石流的速度时程曲线,由图 8 可知,泥石流在阶梯形 2 斜坡上 7.8 s 时其流体运动速率达 13.6 m/s 的瞬态极值,较阶梯形 1(7.9 s 峰值 12.9 m/s)表现出更优的动量传递效率。基准组平面形斜坡的流变特性相对平稳,5.6 s 时形成 13.9 m/s 的峰值平台。泥石流龙头速度在阶梯形斜坡上也呈现出阶梯形的增长,泥石流流经陡坎时,泥石流向下俯冲形态,流速骤增,待泥石流冲击到缓坡,流速的增长势头减缓,甚至会出现减速。

阶梯形斜坡由交替分布的陡坎与缓坡平台构成,其独特地形导致泥石流运动呈现周期性变化。每个陡坎是天然能量输入点。当泥石流从平台段进入陡坎时,重力势能释放:泥石流从高位突然俯冲,势能向动能高效转化。流动形态压缩,陡坎约束流体形成窄深流道,减少侧向摩擦损耗,动能集中于核心流动区。高速俯冲时粗颗粒悬浮于浆体中,基底接触减少,摩擦系数降低。而在缓坡平台为天然减速带,基底摩擦增强,坡度降低使重力驱动减弱,基

底摩擦力占比升至 50%~65%。流动扩散增阻,流体从陡坎窄道进入平台后横向铺展,接触面积增大 2~3 倍,能量耗散率提升。粗颗粒在平台前端堆积形成天然坝体,后续流体需爬升翻越,额外消耗动能。使泥石流频繁受阻,每级平台会短暂堆积物质,随后再次启动流动。

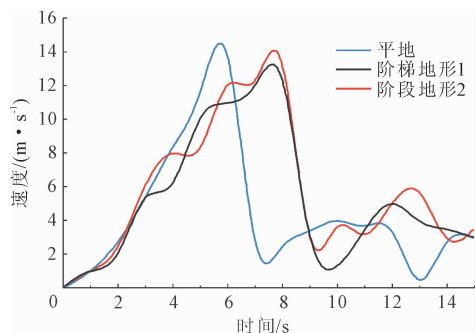


图 8 阶梯形斜坡泥石流浆体速度时程曲线

3 泥石流灾害链过程模拟及级联效应分析

泥石流拦挡坝是防治泥石流灾害的重要工程措施之一,其主要作用是通过物理拦截、能量耗散和地形调整等方式,减轻泥石流对下游区域的破坏。但是不合理的布设位置,结构的老化或者超负荷冲击等因素都有可能导致坝体失稳或完全破坏,基于此,在工况 1 基础上,开展考虑溃坝诱发的泥石流灾害链过程模拟及灾害级联效应分析。

3.1 拦挡坝溃决模式

为了模拟拦挡坝在泥石流浆体冲击下溃坝,对平面形斜坡上的拦挡坝建模进行调整。首先需对拦挡坝主体进行几何离散化处理。预先划分坝体碎石,可直接观察碎石间的分离、碰撞和运动,避免依赖材料失效模型的动态破碎计算以此控制计算规模,碎石数量和尺寸可人为控制,避免动态破碎生成海量单元导致计算崩溃。

在模拟过程中,考虑拦挡坝等混凝土防护结构在泥石流冲击作用下的破裂特征及产生的碎石尺寸^[28],在模拟过程中设置拦挡坝破坏后碎裂体为长宽高为 1 m 的规则碎石单元(图 9)。针对离散后的碎石单元,采用网格进行划分,便于后续接触对定义和动态分离分析,确保相邻碎石网格在初始状态下无穿透。碎石间接触使用自动面面接触。碎石物理学参数设置与拦挡坝相同,设置其密度 2 320 kg/m³,抗压强度 40 MPa,接触设置为自动面面接触模型。

碎石间通过 TIEBREAK 模型定义初始粘结力,在泥石流冲击条件下诱发断裂。设置剪切失效应力阈值,当接触面上的分力超过设定的阈值时,粘结失效,接触面断开,接触断开后,坝体碎石间通过摩擦接触继续相互作用,选用静态摩擦系数 0.4,动态摩擦系数 0.3,模拟块石间滑动与咬合效应。

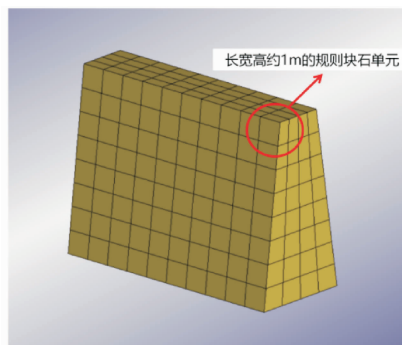


图 9 拦挡坝设置图

3.2 拦挡坝溃决过程模拟

将上述拦挡坝设置到第 2 节的平面形斜坡研究拦挡坝溃决过程及机制,可观察到在泥石流冲击作用下拦挡坝溃坝过程,如图 10 所示。

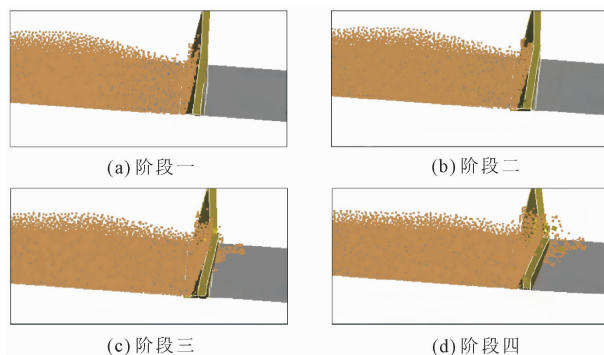


图 10 拦挡坝溃坝图

分析可知,溃坝原因为拦挡坝超载:泥石流流量或冲击力超过坝体设计阈值,导致结构破坏初始溃口特征,拦挡坝的破坏运动过程可分为以下四个阶段进行模拟分析:①初始冲击与接触失效阶段:泥石流浆体以高流速冲击坝体时,前端碎石首先承受动水压力与冲击载荷。当接触面上的分力超过设定的阈值时,接触失效触发,碎石间自动面面接触的摩擦系数(0.4~0.6)不足以抵抗冲击剪切力,导致接触节点分离,如图 10(a)渐进破坏与块石滑动阶段,相邻碎石间隙迅速扩大。初始裂缝形成坝顶中部因泥石流冲击形成初始裂缝,裂缝宽度随冲击时间呈指数增长;②渐进破坏与块石滑动阶段:随着泥石流持续冲击,坝体破坏呈现分层渐进特征,底部块石与侧

面被完全约束,顶部出现溃口如图 10(b)向两侧扩展,形成梯形溃口形态;③溃口贯通与能量释放阶段:如图 10(c)当溃口持续增大,坝体进入失稳临界状态,流体压力导致溃口两侧坝体块石被卷吸至下游,形成“喇叭口”状破坏形态;④块体运动与堆积形态阶段:如图 10(d),碎石因坝体结构失稳或流体冲刷作用脱离主体。坝顶的碎石自重作用滑落,因水流冲刷转化为与泥石流混合的坝体碎石,溃决后碎石的运动轨迹受地形与流体作用共同影响,碎石与会坡面或其他碎石碰撞发生碰撞。

3.3 泥石流链式灾害的级联效应模拟分析

图 11 为平面形斜坡与溃坝后的泥石流浆体速度时程曲线。在冲击拦挡坝前两者运动速度在第 5.6 s 几乎完全一致,两者的泥石流浆体的运动速度都在第 5.6 s 达到了峰值,而后泥石流撞击拦挡坝时,使部分动能转化为势能(坝内堆积)。此时泥石流前端速度会显著降低,平面形斜坡的拦挡坝坝体通过阻挡和储存泥石流,大幅降低泥石流速度,并且在拦挡坝前端发生形成壅塞堆积。

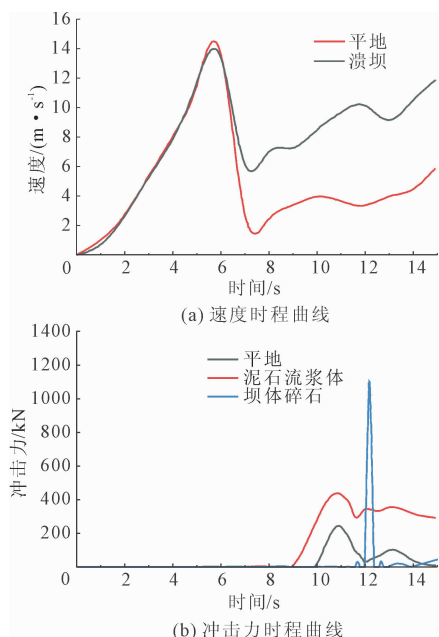


图 11 溃坝工况下速度与冲击力时程曲线图

而溃坝后拦挡坝坝体结构失效,出现局部溃口,坝内蓄积的泥石流发生渐进式溃决。此时势能迅速转化为动能,导致溃口附近泥石流速度持续增加,在此条件下,泥石流浆体平均流速由溃前 3.2 m/s 骤增至 8.2 m/s。当坝体块体被卷入泥石流时,泥石流需要克服块体的惯性(质量大、静止状态)并将其加速,这一过程会消耗泥石流的部分动能,导致局部速度短暂下降。块体逐渐释放,泥石流有更多时间

调整流动状态,速度变化较平缓。

平面形斜坡的泥石流浆体对桥墩(见图 4)冲击力在 11.1 s 达到峰值 245.4 kN,而溃坝后泥石流浆体对桥墩冲击力在 11.3 s 达到峰值 445.7 kN。拦挡坝溃坝后,无法阻挡和储存泥石流,更多的泥石流浆体向下游运动,使得泥石流浆体的峰值冲击力大大增加。此外拦挡坝溃决形成的坝体碎石随泥石流浆体一同冲击桥墩,峰值冲击力可达 1 123.5 kN,远超泥石流浆体的冲击力。

4 考虑地形及溃坝级联效应的深水沟槽泥石流案例研究

4.1 案例地形及模型设置

2021 年 7 月 22 日,青海省海北藏族自治州祁连县因突发强降雨引发泥石流灾害,造成人员受困、交通中断及基础设施损毁(图 12)。此次灾害主要集中于祁连县八宝镇牛心山北麓的深水槽沟及冰沟景区周边区域,深水槽沟泥石流冲毁省道 302 线双向桥梁(桩号 k65+037 右线、k65+043 左线),导致峨祁线交通中断;冰沟景区路段发生 400 余米道路掩埋,国道 213 线通行受阻。围绕此工程案例,基于 SPH-FEM 流固耦合方法构建三维多尺度耦合模型,建立复杂地形地貌下泥石流灾害链效应的模拟分析,探究深水槽大桥遭遇泥石流冲击作用下的破坏形式及动力响应。



(a) 深水槽大桥被泥石流冲毁



(b) 应急抢通

图 12 深水槽大桥泥石流灾害

依据调查数据,该区域整体地貌格局呈现典型高山峡谷区,具备完整的泥石流发育地貌单元。物

源区表现为三面环山的围椅状汇水地形,平均坡降 $>25\%$,沟谷溯源侵蚀强烈,构造破碎带内风化壳厚度达 3~5 m,赋存大量花岗岩、砂岩碎屑物质。流通段呈深切 V 型谷地貌,谷宽受控于两侧断层挤压作用收缩至 15~30 m,纵坡降达 $120\% \sim 150\%$ 。堆积区于桥位处形成冲积扇体,地形坡度减缓至 $8^\circ \sim 12^\circ$ 。泥石流流体扩散导致最大块石粒径 >2.5 m,粗颗粒组分占比超过 60%,呈现典型泥石流沉积相特征。

鉴于泥石流物源参数实测数据缺失,在峡谷区段采用理论概化方法构建泥石流初始运动模型,设定初始堆积体几何尺寸为 $40\text{ m} \times 22\text{ m} \times 5\text{ m}$,构建泥石流初始状态的理论概化模型。根据灾后调查的结果^[29],此处堆积物构成主要由碎石、块石、少量卵石构成,砾石、砂质充填,多呈棱角状,母岩成分主要为砂岩、花岗岩,粘性成分较少,爆发泥石流为稀性泥石流的可能性较大,综合考虑取泥石流密度为 $1\ 600\text{ kg/m}^3$,粘度取 $0.05\text{ Pa} \cdot \text{s}$,泥石流的状态方程使用不可压缩流体模型。此外,深水槽大桥上部采用 60 m 跨径简支钢箱梁,主梁顶宽 8.50 m,底宽 6 m,箱梁道路中心线处高度为 3 m;桥墩墩高设置为 30 m,墩顶截面直径 6 m,并在其上部设置顶帽,尺寸为纵向 3.6 m,横向 8.0 m 的圆弧形截面,满足支座布置需求,按原尺寸建立桥梁模型。

拦挡坝选用重力式拦挡坝,重力式拦挡坝是泥石流防治工程中应用最广泛的坝型之一,其依靠自重抵抗泥石流的冲击力和土压力,具有结构稳定、耐久性强等特点^[30]。断面形式通常采用梯形或复式梯形断面,并设置泄水孔以分散水流压力。坝高设置为 15 m,底宽约为坝高的 0.7~1.5 倍(如 15 m 高坝底宽 11.25 m),顶宽 4 m。泄水孔的孔径需大于最大石块粒径的 2~4.5 倍,交错排列以减少淤堵风险。泥石流冲击拦挡坝与深水槽大桥数值模型如图 13 所示。

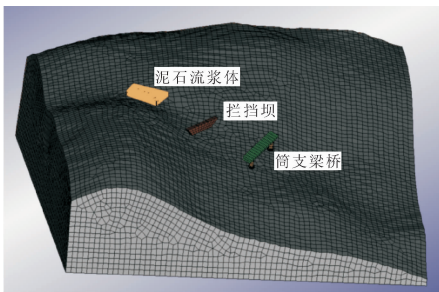


图 13 泥石流冲击拦挡坝与深水槽大桥数值模型

(地形数据来源于地理空间数据云: <https://www.gscloud.cn/>)

为了模拟泥石流运动演变及冲击结构物的灾害链全过程,设置了三种工况进行计算分析,分别是:工况 a(无拦挡结构)不在简支梁桥前设置拦挡坝,让泥石流浆体直接冲击桥梁,工况 b(完整拦挡坝)在简支梁桥前游设置完整拦挡坝,工况 c(溃坝工况)模拟拦挡坝在泥石流冲击下溃决失效,对下游桥梁进行冲击。

4.2 泥石流速度分析

图 14 为三种工况泥石流浆体的速度时间曲线,可见在冲击拦挡坝前浆体运动趋势及大小基本一致,工况 a(无拦挡结构)泥石流浆体沿沟道呈现自由加速运动特征。数值模拟显示,泥石流浆体在初始运动阶段(0~3 s)受重力主导作用,加速度达 2.4 m/s^2 ;至 18 s 时达到峰值流速 11.5 m/s ,此时浆体头部已推进至沟道下游平缓段,而后泥石流浆体速度开始下降。

工况 b(完整拦挡坝)泥石流浆体运动速度呈现三阶段特征。第一阶段泥石流浆体与工况 1 基本一致,泥石流头以 7.6 m/s 速度正面撞击拦挡坝,通过流体内部分子间黏性耗散及坝体弹性形变吸收动能,速度降幅达 28.9%(至 5.4 m/s)。第二阶段泥石流浆体在拦挡坝发生淤积,而后当淤积体达到坝顶高程后,后续泥石流沿坝体溢流,速度回升至 8.3 m/s 。第三阶段泥石流浆体进入下游缓坡平台后撞击下游桥梁墩台,受地表摩擦阻力及流动宽度加大的影响,速度呈衰减趋势,至 35.5 s 时浆体流体运动基本终止。

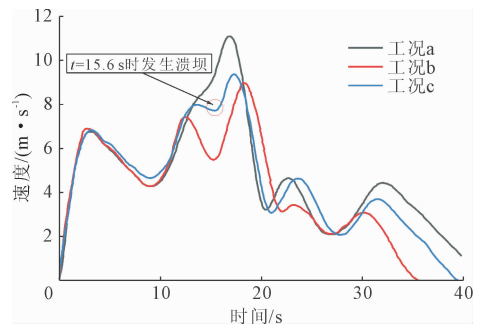


图 14 泥石流浆体速度时程曲线

工况 c(溃坝工况)模拟拦挡坝在 15.6 s 发生局部溃决(溃口宽度 3.2 m,深度 2.1 m)的特殊工况,发现结构失效引发显著的流体运动异变,溃坝前泥石流浆体速度演化规律与工况 2 基本一致,峰值速度 9.2 m/s 出现在 18.4 s,溃坝前泥石流浆体速度由 8.1 m/s 下降至 7.6 m/s ,对比显示,溃坝工况速度较工况 2 增加了 40%,印证了结构完整性对防护

效能的关键作用。溃坝瞬间溃口处淤积的泥石流浆体携溃坝后产生的坝体碎石向下游运动。

4.3 泥石流冲击力评估

图 15 显示了三种工况条件下泥石流浆体及坝体碎石对桥墩结构的冲击力时程曲线。由图 15 可知,工况 a(无拦挡体系)中泥石流浆体对桥墩的峰值冲击力达到 401 kN,而设置拦挡体系的工况 b(完整拦挡)和工况 c(溃坝工况)分别记录到 319.8 kN 和 327.5 kN 的峰值。通过对比可见,拦挡坝对泥石流浆体动能的削减作用显著:当泥石流通过拦挡结构时,其流动路径受阻产生紊流耗散,同时坝体孔隙结构促使粗颗粒物部分沉积,最终导致工况 b、工况 c 的泥石流运动速度分别衰减至初始值的 82% 和 84%,致使浆体峰值冲击力较工况 a 分别下降 20.3% 和 18.3%。

值得注意的是,在工况 c(溃坝工况)中,坝体碎石对桥墩的冲击力达到 1 221.5 kN,其量值为同工况浆体冲击力的 3.73 倍。溃坝过程中释放的坝体碎石在泥石流浆体裹挟作用下,呈现短历时、高能量、强集中的动力学特性,这种冲击模式造成的破坏远超常规泥石流中颗粒均匀分布的冲击效应,这表明了拦挡结构解体后产生的次生灾害链效应显著加剧了结构破坏风险,这对山区桥梁抗灾设计提出了新的技术挑战。

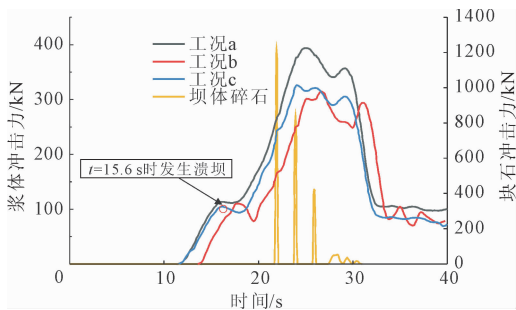


图 15 桥墩受冲击力时程曲线

5 结 论

本文基于 SPH-FEM 耦合方法开展了复杂地形下泥石流运动及冲击效应建模,以揭示地形对泥石流速度的影响,特别是探究了地形影响下泥石流灾害的级联效应,进一步围绕深水槽大桥泥石流开展了真实地形的案例分析。具体结论如下:

(1) 地形对泥石流动力学过程具有显著影响。凸地形促使泥石流持续加速并形成较大的峰值速度;凹地形的启动更迅速;阶梯地形则因多次“俯冲

-缓冲”过程增强能量耗散,使峰值速度与冲击力均显著降低,阶梯数量越多,耗能越强。

(2) 拦挡坝溃决会强化泥石流冲击作用。溃坝后泥石流流速由 3.2 m/s 急增至 8.2 m/s,大量浆体下泄并迅速汇集,使峰值冲击力显著放大;同时,坝体碎石随流下移产生二次冲击,其峰值冲击力远大于泥石流浆体本身。

(3) 基于泥石流冲毁深水槽大桥案例分析了真实地形下泥石流的运动速度及冲击力,地形与溃坝共同诱发典型灾害链级联效应。自由运动泥石流在 18 s 达到 11.9 m/s 的峰值流速;完整拦挡坝可将峰值速度降至 8.3 m/s,而溃坝工况较完整拦挡坝提高约 40%。相应地,浆体冲击力由无拦挡的 401 kN 降至完整拦挡下的 319.8 kN(降低 20.3%),溃坝工况为 327.5 kN(较无拦挡下降 18.3%);坝体碎石峰值冲击力达 1 221.5 kN,约为浆体的 3.7 倍。

参考文献:

- [1] 赵 健. 我国泥石流防治措施研究[J]. 中国水利, 2007(14):50-52.
- [2] 姚昌荣,王友彪,李亚东,等. 泥石流冲击桥梁 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020,42(5):28-36.
- [3] 赵晨澄,李秀珍,龚俊豪,等. 基于确定性耦合物理模型的滑坡-泥石流链式灾害危险性评价——以青海省贵德县二连沟小流域为例[J]. 山地学报, 2025, 43(3):408-422.
- [4] Cheng Qiang, Liu Tianxiang, Lei Hang, et al. Investigation of a shallow high-locality landslide-induced debris flow in an alpine valley: A case study of the Ridi debris flow, Kangding, Sichuan Province, China (August 3, 2024) [J]. Landslides, 2025,22:3065-3079.
- [5] 冯自立,崔 鹏,何思明. 滑坡转化为泥石流机理研究综述[J]. 自然灾害学报,2005(3):8-14.
- [6] 吴 刚,廖志为,高 点. 张肃公路(梨园口-康乐镇)沿线地质灾害发育特征及致灾因子分析[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(4):199-204.
- [7] 郭 剑. 滑坡-泥石流灾害链形成及转化机制研究[D]. 西安:长安大学,2022.
- [8] 朱 贺,张永双,任三绍,等. 拒马河上游极端降雨引发的地质灾害特征与链生演化过程[J]. 水文地质工程地质,2025,52(3):186-196.
- [9] 游 勇,陈兴长,柳金峰. 四川绵竹清平乡文家沟“8·13”特大泥石流灾害[J]. 灾害学,2011,26(4):68-72.
- [10] 勾婷颖. 泥石流冲击连续刚构桥的动力响应分析[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [11] 孙杲辰,陈 涛,代建波,等. 12·18 甘肃积石山地震

- 诱发泥石流地质灾害成因及建筑物破坏特征分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(4): 134-139.
- [12] 夏湘朕, 胡桂胜. 强震区滑坡-泥石流灾害链成灾特征、机制与演化过程[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(3): 243-253.
- [13] Takahashi T, Nakagawa H. Prediction of debris flow deposition area by a numerical simulation model[J]. International Journal of Sediment Research, 1994, 9(1): 1-13.
- [14] Zheng Hongchao, Shi Zhengming, Peng Ming, et al. Coupled CFD-DEM model for the direct numerical simulation of sediment bed erosion by viscous shear flow[J]. Engineering Geology, 2018, 245: 309-321.
- [15] 成永刚, 王 军. 川藏高速公路喇叭嘴泥石流、滑坡、崩塌、弃渣、高填综合处治[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(1): 199-204.
- [16] 李百隆. 基于 SPH-DEM-FEM 耦合的泥石流冲击力与拦挡结构的动力响应研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [17] 张学军. 基于 FLO-2D 的大姑鲁沟泥石流运动特征模拟分析及危险性评价[J]. 甘肃水利水电技术, 2025, 61(6): 31-35.
- [18] 巴 刚, 孙兴伟, 傅宇晨, 等. 基于 Massflow 的江西省鹭鸶坳沟泥石流运动特征模拟分析[J]. 水利水电快报, 2025, 46(8): 73-78.
- [19] Bugnion L, Mcardell BW, Bartelt P, et al. Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles[J]. Landslides, 2012, 9(2): 179-187.
- [20] 韩俊辉. 含大块石泥石流冲击桥墩的动力响应分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [21] Dai Zili, Huang Yu, Cheng Hualin, et al. SPH model for fluid-structure interaction and its application to debris flow impact estimation[J]. Landslides, 2017, 14: 917-928.
- [22] 廖鑫昌. 基于 SPH-FEM 耦合方法的含大块石泥石流运动冲击效应研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
- [23] 赵 雷, 邹定富, 张丽君, 等. 坡面泥石流冲击下被动柔性防护网的动力响应[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(2): 118-125.
- [24] 韩俊辉, 姚昌荣, 余劲松, 等. 基于 SPH-FEM 耦合方法的泥石流冲击柱形结构物动力响应分析[J]. 四川建筑, 2020, 40(6): 146-149, 152.
- [25] 叶 斌, 黄 雨, 叶为民, 等. 利用 SPH 方法计算泥石流对建(构)筑物的冲击力[J]. 灾害学, 2010, 25(S1): 380-380.
- [26] 许 斌. 地形影响下泥石流运动与灾害链效应的流固耦合模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2025.
- [27] Wang Youbiao, Liu Xiaofeng, Yao Changrong, et al. Debris-flow impact on piers with different cross-sectional shapes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(1): 04019045.
- [28] 吴建利, 胡卸文, 梅雪峰, 等. 落石冲击混凝土板与缓冲层组合结构的动力响应[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 78-87.
- [29] 廖鑫昌, 年廷凯, 张 浩, 等. 含大块石泥石流的运动冲击作用机制及过程模拟[J]. 工程地质学报, 2025, 33(5): 2040-2050.
- [30] 朱彦鹏, 严 伟. 泥石流拦挡坝的加高加固方案及对比研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(2): 258-263.

(上接第 211 页)

- [8] 朱牧原, 魏力峰, 方 勇, 等. 超大直径盾构隧道下穿黄河大堤沉降分析与控制研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 211-219.
- [9] Zhao Qingxiong, Cao Ping, Liu Jinshuo, et al. Spatio-temporal response characteristics of flood embankment deformation during shield tunnel excavation[J]. Earth Science Informatics, 2025, 18(2): 383-383.
- [10] 李 海, 陶 津, 陈时光, 等. 盾构隧道穿越松散填土江堤的沉降放大效应及加固效果研究[J]. 甘肃科学学报, 2023, 35(6): 77-84.
- [11] 曹 磊, 易 宸, 刘 娟, 等. 水位骤降对下伏隧道堤防安全影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(2): 142-146.
- [12] 闫邵航, 王剑宏, 杜昌言, 等. 超大直径盾构隧道穿越地上水库堤坝沉降变形试验研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(S2): 73-79.
- [13] 徐 浩, 廖铭新, 卞士海, 等. 基于机器学习的顶管施工江堤变形预测研究[J]. 岩土工程技术, 2025, 39(5): 639-647.
- [14] 蒋 源, 王海林, 陈 兆, 等. 大直径越江盾构隧道穿堤施工变形影响分析研究[J]. 湖南交通科技, 2022, 48(4): 138-142.
- [15] 肖志宏, 刘思博, 易 宸, 等. 穿江地铁隧道施工对堤防及隧道结构稳定性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(5): 41-47, 70.
- [16] 杜昌言. 穿越黄河的超大直径盾构隧道——济南市济泺路穿黄隧道[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(7): 1244-1251.