

三维土石混合体边坡大变形 SPH-DEM 模拟

苏正洋^{1,2}, 李典庆^{1,2}, 王顺^{1,2*}, 盛金保³

1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072

2. 武汉大学水利水电学院工程风险与防灾研究所, 武汉 430072

3. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 南京 210029

摘要: 自然界中的大多数边坡由土体与块石混合构成, 一旦发生大变形破坏, 可能严重威胁周围人民生命安全及基础设施建设运维。针对土石混合体边坡研究中存在的精细化建模及块石与土体耦合计算难题, 本研究建立了一种三维土石混合体边坡高保真建模技术, 并提出了基于 SPH-DEM 耦合的三维土石混合体边坡大变形模拟方法, 进一步分析了块石对边坡大变形冲击过程的影响, 并预测了青海省浪加滑坡体再次滑动后冲击大坝附属建筑物动力过程, 结果表明: 块石含量和位置分布显著影响滑坡冲击过程, 块石含量越高, 冲击力时程曲线的差异性越显著, 若块石与建筑物直接碰撞, 峰值冲击力较不考虑块石时提高约 30%。浪加滑坡再次滑动后前缘最大运动距离达 108m, 启闭房、施工营地所受峰值冲击力分别高达自身重力的 20 倍和 4 倍, 极易被滑坡体冲毁。该研究成果可为土石混合体滑坡的灾害预测和危险性分析提供参考依据。

关键词: 土石混合体边坡; 大变形; 精细化建模; 冲击过程; SPH-DEM 方法

中图分类号: P642.3 **收稿日期:** 2025-08-15

Large deformation analysis of 3D soil-rock mixture slopes using SPH-DEM method

Zhengyang Su^{1,2}, Dianqing Li^{1,2}, Shun Wang^{1,2*}, Jinbao Sheng³

1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan, 430072

2. Institute of Engineering Risk and Disaster Prevention, School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan, 430072

3. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029

Abstract: Most natural slopes are composed of soil-rock mixtures, whose large deformation and failure pose severe threats to human safety and infrastructure. To overcome the challenges in high-fidelity modeling and coupled soil-rock mixture interaction analysis, this study develops a high-fidelity 3D modeling technique for soil-rock mixture slopes and proposes an SPH-DEM coupling method to simulate the large deformations. We further analyze the impact of boulders on the deformation and failure process of the slope and predict the variation of the impact on dam appurtenant structures after the reactivation of the Langjia landslide in Qinghai Province. The results reveal that boulders within the landslide body significantly increasing the landslide velocity, and the content and position of the boulders affect the impact process. Higher boulder content leads to a more pronounced difference in the impact force time-history curve. When boulders collide directly with buildings, the peak impact force increases by about 30% compared to scenarios without boulders. After reactivation, the maximum movement distance of the front edge of the Langjia landslide in Qinghai Province reaches 108 meters, with peak impact forces on the intake and construction camp structures reaching 20 times and 4 times their own weight, respectively, making them highly vulnerable to destruction by the landslide. The findings of this study provide valuable insights for disaster prediction and risk analysis of soil-rock mixture landslides.

Key words: Soil-rock-mixture slope; large deformation; refined modeling; impact process; SPH-DEM method

基金项目: 国家自然科学基金青年学生基础研究项目 (博士研究生) (523B2091), 国家自然科学基金重点项目 (52439007), 国家自然科学基金面上项目 (42472355)

作者简介: 苏正洋(1997-), 男, 博士, 研究方向为水工岩土工程灾害风险分析。E-mail: zhengyangsu@whu.edu.cn, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8207-4334>

通讯作者: 王顺(1986-), 男, 教授, 主要从事地质灾害智能分析研究。E-mail: shun.wang@whu.edu.cn

0 引言

土石混合体边坡作为一种典型的非均质地质体，主要由高强度块石、低强度土体及孔隙构成（Xu et al. 2016; 边宏光等, 2024），其显著的结构特征表现为材料非均质性、块石空间分布随机性、土石界面不连续性以及尺寸效应（孙华飞等, 2014; Wang et al. 2022; Kang et al. 2025）。这种特殊结构特征使得土石混合体边坡在发生大变形时表现出复杂的力学响应，导致其演进范围、冲击特征等与均质边坡有较大差别（Peng et al. 2023; Abioga et al. 2025）。此类边坡一旦发生大变形破坏，其突发性强、破坏范围广、致灾机理复杂的特点，极易引发重大地质灾害，严重威胁周围居民生命财产安全以及工程建设运维。

数值模拟是研究土石混合体边坡失稳及变形破坏过程的重要手段，然而受限于块石-土体非连续特性，当前在实现土石混合体边坡的高保真建模与大变形破坏过程的跨尺度模拟方面仍存在挑战。一方面，土石混合体的非均质性与破坏行为高度依赖于块石的真实几何形态及其在土体基质中的空间分布，然而传统数值建模方法多采用概化模型（如球形、椭球形或规则多面体）模拟块石（张润涵等, 2023），虽简化了计算，却难以精确反映块石棱角效应、咬合作用及不规则形态对土石界面不连续性、应力集中和尺寸效应的真实影响。另一方面，土石混合体边坡从失稳到剧烈运动堆积过程中土体发生大变形，传统基于网格的方法如有限单元法、有限差分法等，其优势主要体现在边坡失稳前的小变形分析阶段（Liu et al., 2020; Zhao et al., 2021），在预测边坡失稳后的大变形破坏过程时，此类方法往往存在网格扭曲、畸变问题，导致计算精度下降甚至计算终止（Zhu et al., 2022）。尽管存在一些改进措施如网格自适应技术和界面追踪算法等，但这些方法实现的复杂性与高昂的计算成本也限制了其在工程尺度应用的可行性。

近年来，无网格方法或基于点的数值模拟方法，如离散单元法（DEM）、非连续变形分析法（DDA）和光滑粒子流体动力学方法（SPH）等，在岩土工程中大变形分析方面受到越来越多关注（Hu et al., 2025; 李爽等, 2025; 彭铭等, 2025）。DEM 方法适用于模拟块石等离散介质的运动与接触，而 SPH 方法作为一种纯拉格朗日、无网格的粒子方法，在处理类流体材料极端大变形、自由表面流动及颗粒破碎方面展现出独特优势（Bui et al., 2011; Fang et al., 2024），且便于嵌入各类先进的本构模型。在连续-离散耦合框架下，采

用结合 DEM 与 SPH 优势的 SPH-DEM 耦合方法，即采用 SPH 方法模拟土体大变形过程，采用 DEM 方法模拟块石的运动和相互碰撞过程，是预测土石混合体边坡大变形过程的有效手段。然而，现有 SPH-DEM 耦合研究侧重于模拟泥石流或类流体滑坡，多采用流体本构或流变模型描述土体行为，但对于大量以剪切破坏为主、土体仍表现出显著固体力学特性的土石混合体边坡，此类流体本构模型难以准确刻画土体在剪切过程中的塑性屈服、应变软化等关键力学行为，且现有研究较少考虑块石真实形态对土石混合体边坡大变形运动机制与冲击特性的影响。

针对土石混合体边坡研究中存在的精细化建模及块石与土体耦合计算难题，本研究建立了一种三维土石混合体边坡高保真建模技术，并提出基于 SPH-DEM 耦合的三维土石混合体边坡大变形模拟方法，分析了块石对边坡大变形冲击过程的影响，并以青海省浪加水库滑坡为例，预测了滑坡体再次滑动后冲击大坝附属建筑物的动力过程，以期为类似工程开展边坡失稳大变形预测及灾害风险防控提供技术支撑。

1 土石混合体精细化建模

几何轮廓是块石的关键特征之一，本研究采用三维手持扫描仪，获取真实块石表面的点云数据，并封装为闭合三维曲面，从而实现块石的高分辨率描述和精细化建模。对粒径在 30mm 至 50mm 范围内的 50 个真实块石进行扫描，图 1 给出了扫描不同块石后得到的几何曲面，最终建立的真实块石数据库包括曲面数据文件、质量信息和体积信息。

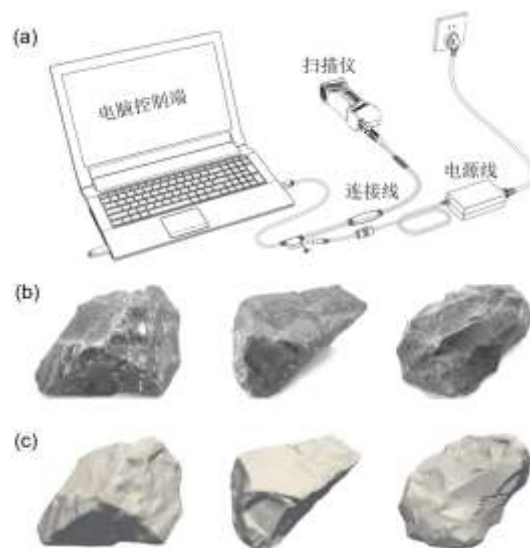


图 1 采用扫描仪建立的块石几何轮廓及实体模型
Fig. 1 Geometric profile and solid model of block stone established using scanner

选取 Yang et al (2022) 采用的三维边坡模型进行建模，如图 2 (a) 所示，距坡脚 4m 处设有一混凝土

房屋建筑物,如图 3(b)所示。土体密度为 2000kg/m^3 ,摩擦角为 21.3° ,粘聚力为 10kPa ,采用毕肖普法求得土体边坡的稳定系数为 1.0,表明边坡处于临界失稳状态,在降雨、地震等因素影响下极易发生滑动,其临界滑移面位置如图 3 所示。

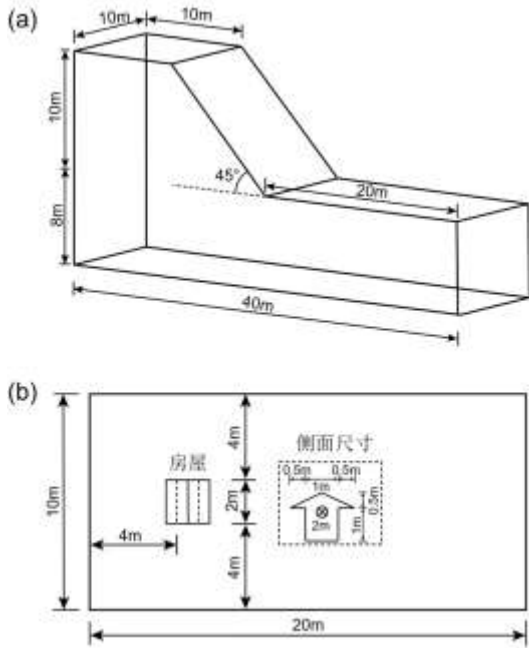


图 2 边坡及房屋建筑物三维几何模型

Fig. 2 3D Geometric model of the slope and building

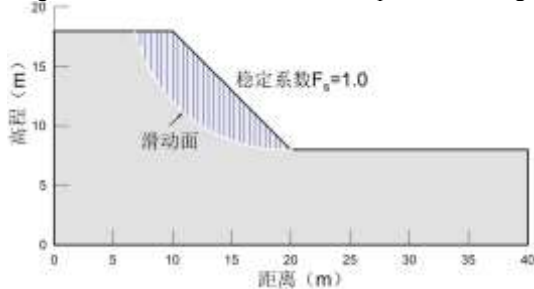


图 3 边坡稳定系数和滑动面位置

Fig.3 Stability factor and failure surface of the slope

由土体边坡临界滑移面位置可确定如图 4 (a) 所示滑坡体,其体积为 334.84m^3 。以在滑坡体内部生成体积含量为 10%的随机块石为例,简要介绍三维土石混合体边坡建模方法。

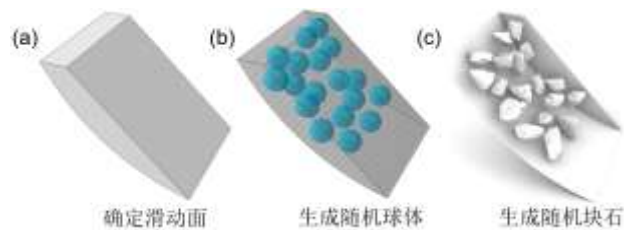


图 4 土石混合体边坡建模过程

Fig. 4 Modeling process of the soil-rock mixture slope

表 1 列出的 18 个块石总体积为 33.48m^3 ,块石粒径区间为 $[1.5\text{m}, 2.5\text{m}]$,填充到滑坡体中满足体积含量为 10%的要求。以块石粒径区间中值 2.0m 为直径,首先在滑坡体内部生成 18 个位置随机的球体,如图 4(b)所示,然后将球体全部替换为表 1 所列的真实块石,

即可得到如图 4 (c) 所示三维土石混合体边坡几何模型。考虑球体位置、块石类型和空间位置变化,可生成多个块石含量为 10%的土石混合体边坡模型开展模拟。

表 1 块石相关参数

序号	块石密度 (kg/m^3)	块石体积 (m^3)
1	2714.27	2.01
2	2768.21	1.79
3	2818.20	1.67
4	2781.98	1.42
5	2725.37	1.96
6	2751.22	2.01
7	2780.48	1.88
8	2809.44	1.98
9	2786.14	2.00
10	2727.79	1.69
11	2702.48	1.60
12	2696.91	1.63
13	2776.73	1.74
14	2704.51	1.80
15	2768.69	1.92
16	2696.17	2.06
17	2742.33	2.31
18	2786.14	2.00

2 数值算法

2.1 土体本构模型

考虑边坡失稳大变形运动过程土体屈服后应变软化效应,本研究采用基于 Drucker-Prager 准则的弹塑性本构模型计算土体应力应变,本构模型的屈服函数 y 和塑性势函数 g 分别如下:

$$y = \alpha_\phi I_1 + \sqrt{J_2} - k_c \quad (1)$$

$$g = \alpha_\psi I_1 + \sqrt{J_2} \quad (2)$$

式中, I_1 为应力张量第一不变量, J_2 为应力张量的第二不变量, k_c 、 α_ϕ 和 α_ψ 与粘聚力、内摩擦角和膨胀角相关,定义如下:

$$\alpha_\phi = \frac{\tan \phi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}} \quad (3)$$

$$k_c = \frac{3c}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}} \quad (4)$$

$$\alpha_\psi = \frac{\tan \psi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \psi}} \quad (5)$$

式中, ϕ 为内摩擦角, c 为粘聚力, ψ 为膨胀角。土体屈服后发生应变软化,采用下式计算土体强度弱化:

$$c(\kappa) = c_r + (c_p - c_r) e^{-\eta_c \kappa} \quad (6)$$

$$\phi(\kappa) = \phi_r + (\phi_p - \phi_r) e^{-\eta_\phi \kappa} \quad (7)$$

式中, c_p 为峰值粘聚力, c_r 为残余粘聚力, ϕ_p 为峰值内摩擦角, ϕ_r 为残余内摩擦角, η_c 和 η_ϕ 为控制土体强度衰减速率的系数, κ 与塑性剪应变张量的增量 $d\epsilon^p$ 有关, $d\kappa = \sqrt{2/3 d\epsilon^p : d\epsilon^p}$ 。该应变软化本构模型参数如峰值强度、残余强度等可通过三轴压缩试验获得。

2.2 SPH 方法基本理论

光滑粒子流体动力学方法（Smoothed particle hydrodynamics, SPH）是一种无网格粒子方法，将计算域划分为多个粒子，粒子控制方程如下：

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (8)$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f} \quad (9)$$

式中， $\mathbf{v}$ 和 ρ 分别代表速度和密度， $\boldsymbol{\sigma}$ 和 $\mathbf{f}$ 分别表示应力张量和体力张量。SPH 算法通过采用权重函数得到离散值 f 来近似函数 $f(x)$ 及其梯度 $\nabla f(x)$ 的值，即：

$$f_i = \sum_{j=1}^n \frac{m_j}{\rho_j} f_j W_{ij} \quad (10)$$

$$\nabla f_i = \sum_{j=1}^n \frac{m_j}{\rho_j} f_j \nabla_i W_{ij} \quad (11)$$

式中， f_i 和 ∇f_i 分别为 x_i 位置处的近似函数和函数梯度值， f_j 、 m_j 和 ρ_j 分别为 x_j 位置处的函数值、质量和密度， W_{ij} 是光滑核函数，本研究采用的核函数为 Wendland 核函数（Wendland, 1995）。SPH 算法主要用于模拟土石混合体滑坡中的土体，控制方程如下：

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (12)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum_j m_j \left(\frac{\sigma_i}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + \mathbf{g}_i + \frac{\mathbf{F}_i^{r \rightarrow s}}{m_i} \quad (13)$$

式中， $\mathbf{g}$ 为重力加速度， Π_{ij} 为确保数值稳定的人工粘性项， $\mathbf{F}_i^{r \rightarrow s}$ 为岩石粒子对土体粒子 i 的作用力，且 $\mathbf{F}_i^{r \rightarrow s} = V_i \sum_j (\sigma_i^r + \sigma_j^s) \nabla_i W_{ij} V_j$ ， V_j 为粒子 j 的体积。

2.3 SPH-DEM 耦合计算理论

在离散单元法框架内，粒子之间通过接触距离传递信息。两个粒子之间的接触力分为法向力和切向力。粒子 i 和 j 之间的法向力 $\mathbf{F}_{n,ij}$ 和切向力 $\mathbf{F}_{t,ij}$ 分别由下式给出（Canelas R B, et al., 2017; Su et al., 2024）：

$$\mathbf{F}_{n,ij} = \mathbf{F}_n^r + \mathbf{F}_n^d = k_{n,ij} \delta_{ij}^{3/2} \mathbf{I}_{ij} - \gamma_{n,ij} \delta_{ij}^{1/2} \xi_{ij} \mathbf{I}_{ij} \quad (14)$$

$$\mathbf{F}_{t,ij} = \min(\mu_{f,ij} \mathbf{F}_{n,ij} \tanh(8\xi_{ij}) \mathbf{I}_{ij}^t, \mathbf{F}_t^r + \mathbf{F}_t^d) \quad (15)$$

式中， $k_{n,ij} = \frac{4}{3} \left((1-\nu_i^2)/E_i + (1-\nu_j^2)/E_j \right)^{-1} \sqrt{(1/r_i + 1/r_j)^{-1}}$ ，

是与弹性模量、泊松比和粒子半径相关的法向刚度系数， $\gamma_{n,ij}$ 是法向阻尼常数， $k_{t,ij}$ 是切向刚度系数， $\gamma_{n,ij}$ 是切向阻尼系数， $\delta_{ij} = \max(0, (d_i + d_j)/2 - |r_{ij}|)$ 是粒子间侵入距离，用于表征粒子间碰撞程度。 $\mathbf{I}_{ij}$ 是单位向量， $\xi_{ij} = \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{I}_{ij}$ 是法向变形率， $\mu_{f,ij}$ 为粒子 i 和粒子 j 之间的内摩擦系数。土石混合体滑坡中块石和沿途房屋建筑物采用 DEM 方法模拟，记块石或沿途建筑物为 A，则其控制方程为：

$$M_A \frac{dV_A}{dt} = \sum_{k \in A} m_k \frac{dV_k}{dt} = \sum_{k \in A} \mathbf{F}_k^{\text{cont}} + \sum_{k \in A} \mathbf{F}_k^{s \rightarrow r} + m_k \mathbf{g} \quad (16)$$

$$I_A \frac{d\Omega_A}{dt} = \sum_{k \in A} m_k (\mathbf{r}_k - \mathbf{R}_A) \times \frac{dV_k}{dt} \quad (17)$$

式中， M_A 是块石或建筑物 A 的质量， V_A 其速度， I_A 为转动惯量， Ω_A 为角速度， $\mathbf{R}_A$ 为重心， $m_k dV_k / dt$ 为作用在粒子 k 的作用力，包括重力、DEM 块石或建筑物碰撞提供的外力 $\mathbf{F}_k^{\text{cont}}$ 以及滑坡土粒子的作用力 $\mathbf{F}_k^{s \rightarrow r}$ 。DEM 表面粒子的应力通过对周围土粒子应力进行插值得到，即 $\mathbf{F}_k^{s \rightarrow r} = V_k \sum_j (\sigma_k^r + \sigma_j^s) \nabla_k W_{kj} V_j$ 。块石或建筑物由 DEM 粒子组成，通过求解动量方程得到每个粒子的加速度，将其乘以粒子质量得到作用在该粒子上的力，进行矢量求和即为作用在房屋上的冲击力：

$$\mathbf{F} = \sum_{k \in A} m_k d\mathbf{v}_k / dt \quad (18)$$

因此，对于三维问题，冲击力大小为 $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$ 。考虑篇幅限制，对于 SPH-DEM 耦合算法可靠性验证，读者可参考 Su et al. (2025)。

3 三维土石混合体边坡大变形分析

3.1 边坡模型与材料参数

为研究块石分布对边坡大变形冲击过程的影响，针对 5%、10% 和 15% 三种块石含量工况，建立土石混合体边坡冲击房屋建筑物数值模型，每种工况随机生成 10 次土石混合体滑坡模型开展模拟，相关参数如表 2 所示，其中块石密度为 2731.7 kg/m³。在 DEM 参数设置方面，参考 Chau et al. (2002) 和 Canelas et al. (2017) 模型试验及数值分析结果，块石与房屋间的碰撞恢复系数设为 0.5，动摩擦系数设为 0.35，DEM 粒子和 SPH 粒子半径均设为 0.15m，模型底部基岩和四周为固壁边界（Su et al., 2025），模拟时长为 10s。

图 5 给出了含有不同块石含量的土石混合体边坡模型，块石实际含量分别为 4.992%、10.000% 和 15.007%，与目标块石含量 5%、10% 和 15% 相比，本研究生成的块石含量误差均低于 1%。

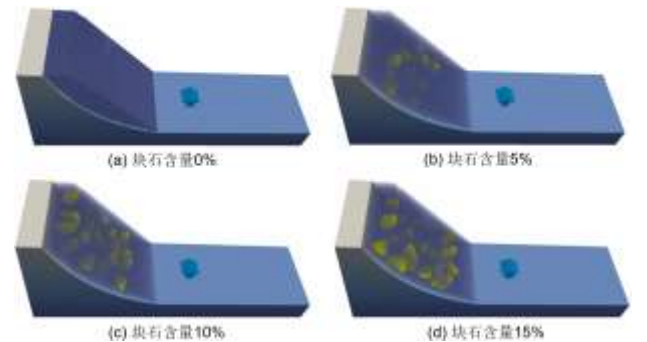


图 5 不同块石含量的土石混合体边坡模型

Fig.5 Soil-rock mixtures slope with different block content

表 2 土体、块石及房屋建筑物材料参数

Table 2 Material parameters for soil, rocks, and building

材料	参数	单位	数值
----	----	----	----

土体	密度	kg/m ³	2000
	弹性模量	MPa	10
	泊松比	/	0.3
	峰值粘聚力	Pa	10000
	残余粘聚力	Pa	0
	粘聚力软化系数	/	5
	峰值摩擦角	°	21.3
	残余摩擦角	°	21.3
	摩擦角软化系数	/	0
块石	密度	kg/m ³	2731.7
	弹性模量	GPa	30
	泊松比	/	0.3
	碰撞恢复系数	/	0.5
	动摩擦系数	/	0.35
建筑物	密度	kg/m ³	2400
	弹性模量	GPa	10
	泊松比	/	0.3
	碰撞恢复系数	/	0.50
	动摩擦系数	/	0.35

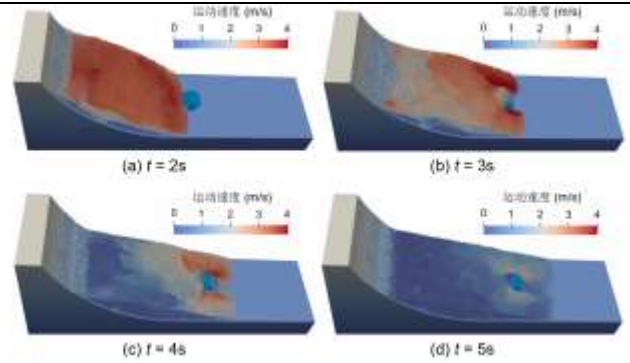


图 7 块石含量为 15% 的土石混合体边坡运动过程

Fig. 7 Motion process of soil-rock mixture slope with 15% block content

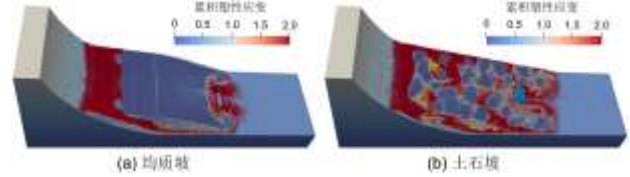


图 8 边坡最终的塑性区对比

Fig. 8 Comparison of the final plastic zones of slopes

3.2 边坡大变形过程模拟

图 6 和图 7 分别展示了块石含量为 0% (均质边坡) 和块石含量为 15% 的土石混合体边坡在发生大变形过程中的速度云图, 整体可知: 在自重作用下, 边坡沿预设滑移面滑动, 短时间内即与房屋发生碰撞。受失稳坡体冲击作用, 房屋发生倾倒并向右侧位移; 随着运动坡体动能逐渐耗散, 房屋最终停止运动。对比图 6 与图 7 可知, 均质边坡发生大变形时速度场呈现高度对称性, 而块石的存在会破坏这种对称性, 且块石含量越高, 坡体大变形运动时速度场不对称性越显著。此外, 相较于均质边坡, 土石混合体边坡大变形运动时的局部运动速度更快, 具体表现为在相同时刻, 土石混合体滑坡速度云图中局部峰值更高。图 8 给出了边坡 $t=10s$ 时累积塑性应变分布情况, 可见, 均质边坡塑性区主要集中在坡体与基岩接触面以及坡体与房屋接触部位, 且剪切带相对较为规则, 而土石混合体边坡运动过程中, 塑性区扩展受块石阻碍作用, 导致剪切带出现绕石和分叉, 最终坡体形成一系列不连续且不规则的剪切带。

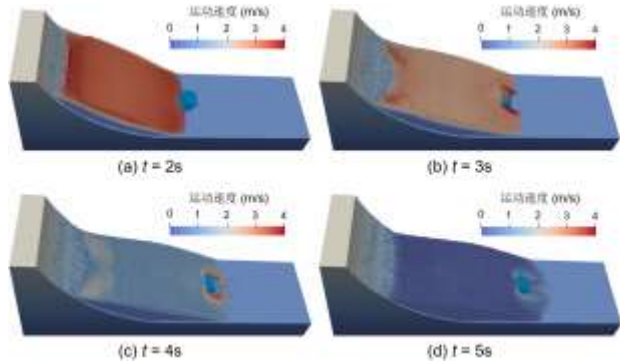


图 6 块石含量为 0% 的土石混合体边坡运动过程

Fig. 6 Motion process of soil-rock mixture slope with 0% block content

进一步分析块石含量和位置分布对边坡大变形冲击建筑物动力过程的影响, 考虑块石位置分布随机性, 对块石含量分别为 5%、10% 和 15% 的土石混合体边坡开展 10 次大变形运动模拟。图 9 给出了土石混合体边坡大变形冲击作用下房屋建筑物所受冲击力时程曲线, 整体可见, 土石混合体边坡大变形运动过程及冲击动力响应受块石含量、位置分布等因素综合影响。由冲击力变化趋势可知, 冲击力从开始增加 ($t=2s$) 到保持稳定状态 ($t=5s$), 历时约为 3s, 表明土石混合体边坡大变形过程发生迅速, 能在短时间内对建筑物造成破坏。当块石含量较低时, 土石混合体边坡大变形冲击作用下房屋建筑物所受冲击力时程曲线差异较小, 如图 9 (a)、(b) 所示。当块石含量较高时, 房屋建筑物所受冲击力时程曲线波动较为显著, 尤其对于房屋建筑物所受峰值冲击力, 如图 9 (c)、(d) 所示, 这说明块石含量越高, 块石位置分布随机性对冲击力时程曲线波动性的影响增大。

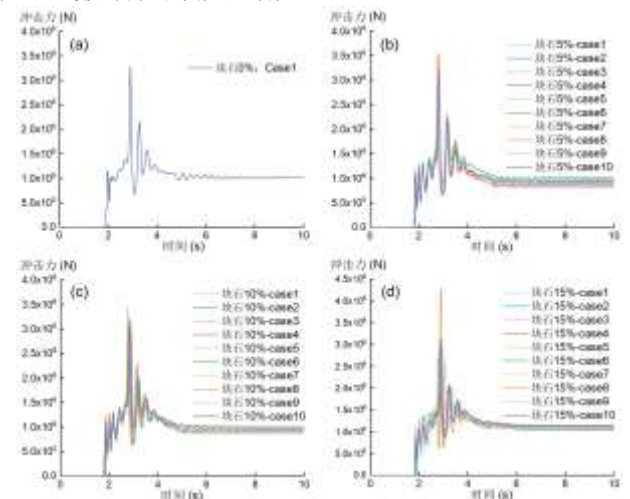


图 9 房屋建筑物所受冲击力变化

Fig. 9 Variation of impact force on buildings

图 10 给出了房屋建筑物所受峰值冲击力的箱型图，图方框表示在不同块石含量条件下房屋建筑物所受峰值冲击力的平均值，箱子长度则反映了数据的波动范围，整体可见，随着块石含量增加，箱子长度呈现出不规则波动变化，这表明峰值冲击力除了受块石含量影响外，还显著受块石空间分布的影响。在相同块石含量条件下，不同块石分布的边坡模型计算的峰值冲击力仍存在较大差异。例如，在块石含量 15%-case8 工况下，峰值冲击力（图 10 突变值）约为 0% 工况的 1.3 倍，约为块石含量 15%-case1 工况的 1.6 倍。图 11 给出了块石含量 15%-case8 工况下三维土石混合体滑坡的运动速度变化，可见块石与房屋发生碰撞（图 11），导致冲击力在 $t=2.5\text{s}$ 到 $t=3.0\text{s}$ 之间迅速增加，峰值冲击力达到 4280kN，比不考虑块石时的峰值冲击力 3290kN 高出约 30%。

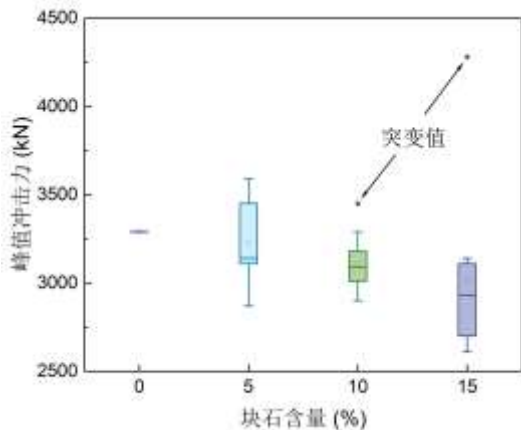


图 10 土石混合体边坡大变形峰值冲击力箱型图

Fig. 10 Box plot of the peak impact force of soil-rock mixture landslide

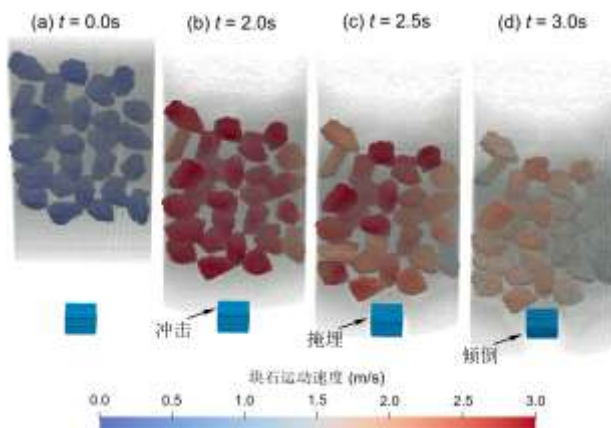


图 11 土石混合体边坡中块石运动过程（俯视图）

Fig. 11 Movement process of the rocks in the soil-rock mixture slope (Top view)

4 土石混合体滑坡冲击过程分析

4.1 滑坡模型与材料参数

本节以青海省浪加水库库区滑坡为例，大坝施工期间，该滑坡体受极端降雨发生滑动，如图 12 所示，滑坡体最大宽度 220m，最小宽度 155m，滑坡体侵占

了大坝部分坝基及坝轴线上游河道，以及原设计导流围堰基坑，严重影响工程建设进度。若遭遇极端暴雨、地震等工况，滑坡可能再次滑动，对沿途的启闭房、施工营地和砼拌合站等大坝附属建筑物造成冲击破坏。为分析浪加滑坡体再次发生大变形的冲击致灾过程，考虑块石含量差异，建立土石混合体滑坡几何模型，如图 13 所示。为提高计算效率，采用 GPU 加速技术，模拟滑坡再次滑动冲击大坝附属建筑物动力过程。模型中块石粒径范围为[15m, 25m]和[30m, 50m]，块石含量误差低于 1%，块石相关数据如表 3 所示。

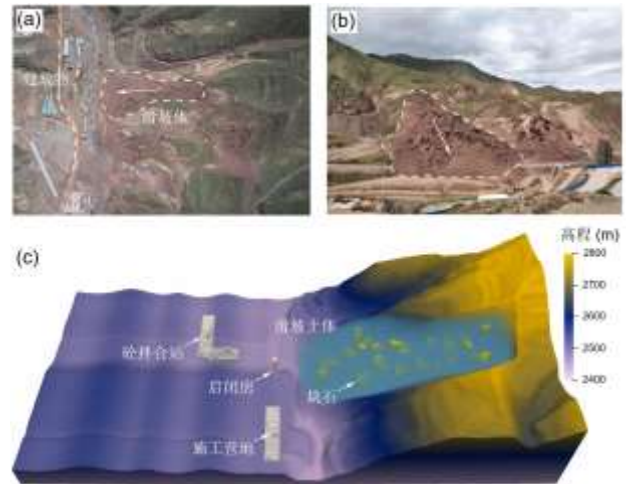


图 12 滑坡体与周围建筑物布置及数值模型

Fig. 12 Layout of the landslide, buildings, and the corresponding numerical model



图 13 土石混合体滑坡几何模型

Fig. 13 Geometric model of the soil-rock mixture landslide

表 3 滑坡体中随机块石数据

Table 3 Data of random block stones in landslides

工况	含量 /%	小粒径块石		大粒径块石		实际含量 /%
		个数	总体积 /m ³	个数	总体积 /m ³	
1	0	0	0	0	0	0
2	5	14	25191.07	8	117684.14	5.010
3	10	18	33483.09	17	251832.58	10.005

根据地质资料，滑坡体在天然状态下的密度为 2100kg/m³，粘聚力为 15kPa，内摩擦角为 29.98°。考虑土体屈服后的应变软化效应，其残余强度参数确定

为：残余粘聚力 7.5kPa，残余内摩擦角 16.09°。滑坡体材料参数取值详见表 4，块石及建筑物（包括启闭房、施工营地和砼拌合站）材料参数见表 2。将滑坡体、地基和建筑物离散为粒子，数值模拟中 DEM 粒子和 SPH 粒子半径均设为 1.75m，滑坡总粒子数，地形边界粒子数为，模拟计算时间为 30s，模型底部基岩为固壁边界。

表 4 数值模拟中滑坡体材料参数

Table 4 Material parameters of the landslide for the numerical simulation

参数	单位	取值
密度	kg/m ³	2100
弹性模量	MPa	50
泊松比	/	0.3
峰值粘聚力	Pa	7500
残余粘聚力	Pa	3750
粘聚力软化系数	/	5
峰值摩擦角	°	16.09
残余摩擦角	°	16.09
摩擦角软化系数	/	0
剪胀角	°	0

4.2 库区土石混合体滑坡模拟

图 14 与图 15 分别展示了块石含量为 0%和 15%时的滑坡运动速度分布。可见， $t=5s$ 时滑坡体已发生显著位移，但受坝址区域平缓地形影响，滑坡体主要沿上下游较为平坦的沟道继续演进。

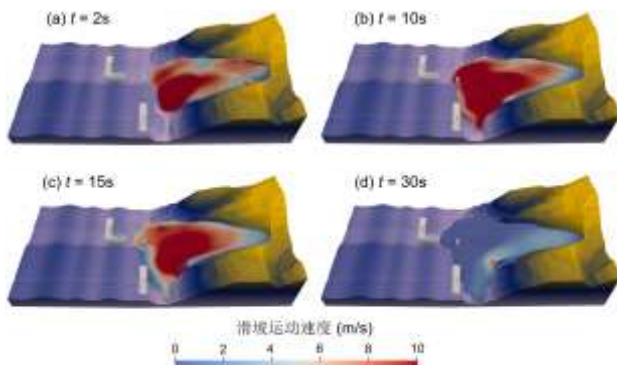


图 14 块石含量为 0%的滑坡运动过程

Fig. 14 Movement process of the landslide with 0% rock content

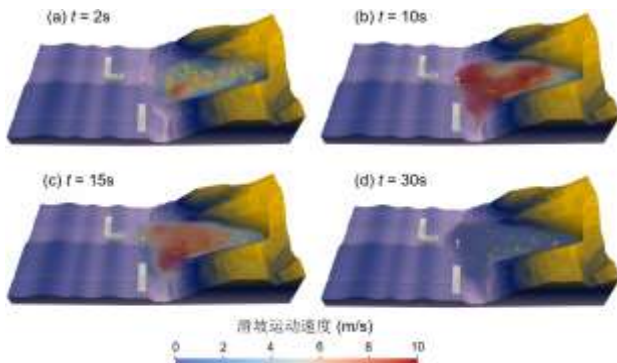


图 15 块石含量为 10%的滑坡运动过程

Fig. 15 Movement process of the landslide with 10% rock content

对于滑坡运动距离，块石含量为 0%、5%、15%时，滑坡体前端最大运动距离分别为 108m、102m、106m。据此判断，滑坡覆盖范围均未波及 117m 外的砼拌合站。对于滑坡运动速度，均质滑坡（块石含量为 0%）

的局部最大速度值为 27m/s，当块石含量增至 5%和 15%时，土石混合体滑坡的局部最大速度值分别达到 38m/s 和 34m/s，相较于均质滑坡体分别提高了约 40%和 26%，说明块石一定程度上促进了滑坡体的运动过程。

图 16 展示了不同块石含量的土石混合体滑坡冲击下，启闭房和施工营地所受冲击力变化过程。 $t=8s$ 时两处建筑物开始承受滑坡冲击荷载，施工营地的冲击力随时间首先呈递增趋势，最终趋于稳定值；而启闭房由于距离滑坡体较近，其冲击力响应表现出明显的非线性特征，在 $t=10s$ 至 $t=20s$ 时段内出现双峰现象。第一个峰值对应于滑坡前缘与建筑物的初始接触碰撞，第二个峰值则源于后续运动土体的持续冲击作用。由模拟结果可知，当块石含量分别为 0%、5%和 15%时，启闭房所受的峰值冲击力依次为 $1.89 \times 10^9 N$ 、 $1.51 \times 10^9 N$ 和 $1.64 \times 10^9 N$ ；施工营地所受的峰值冲击力则分别为 $5.37 \times 10^8 N$ 、 $4.47 \times 10^8 N$ 和 $4.29 \times 10^8 N$ 。通过对比建筑物自重（启闭房 $9.42 \times 10^7 N$ ，施工营地 $1.28 \times 10^8 N$ ）可以发现，启闭房承受的冲击力可达其自重的 16-20 倍，施工营地则为 3~4 倍。在滑坡冲击荷载作用下，两者均有被滑坡体冲毁的风险。

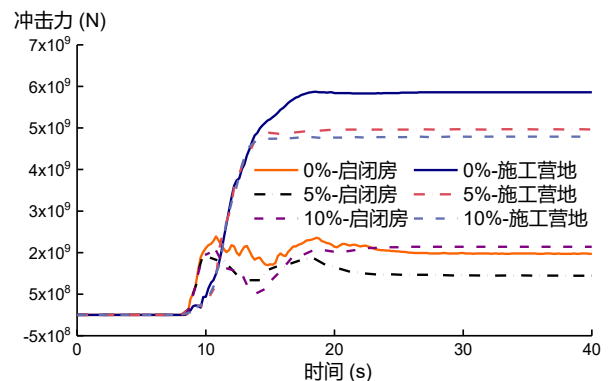


图 16 大坝附属建筑物所受冲击力变化

Fig. 16 Variation of impact force on dam ancillary structures

5 结论

本研究基于连续-离散介质力学框架，采用 SPH-DEM 耦合计算方法，开展了土石混合体边坡大变形模拟分析，主要结论如下：

(1) 基于三维激光扫描技术，开发了三维土石混合体边坡高保真建模技术，采用三维激光扫描设备可构建真实块石数据库，生成指定块石含量的边坡模型，块石含量误差低，实现土石混合体边坡的高保真建模。

(2) 建筑物所受冲击力受块石含量、位置分布等因素综合影响，块石含量越高，其位置分布随机性导致冲击力时程曲线的差异性越显著，若块石与建筑物直接碰撞，峰值冲击力较不考虑块石时提高约 30%。

(3) 青海省浪加水库滑坡大变形计算结果表明，滑坡再次滑动后前缘最大运动距离达 108m，覆盖范围

未波及相距 117m 的砼拌合站。而启闭房、施工营地所受峰值冲击力分别高达自身重力的 20 倍、4 倍, 极易被滑坡冲毁。

(4) 本研究所提方法主要考虑土体与岩石相互作用, 未来可进一步拓展考虑水、土、岩多相及水、热、力、损伤多场耦合, 实现复杂情景下的滑坡灾害精细化模拟预测。

References

- [1] Xu, W. J., Hu, L. M., Gao, W., 2016. Random Generation of the Meso-Structure of a Soil-rock Mixture and its Application in the Study of the Mechanical Behavior in a Landslide Dam. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 86, 166-178. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.04.007>
- [2] Bian, H. G., Wang, S., Ma, H. S., et al. 2024. Stability of Soil-rock Mixture Slopes based on Random Field Theory. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 43 (06): 162-170. (in Chinese with English abstract)
- [3] Sun, H. F., Ju, Y., Wang, X. F., et al. 2014. Review of the study on deformation, failure and the mesomechanisms of rock-soil mixture (RSM). *Scientia Sinica (Technologica)*, 44(2): 172-181. (in Chinese with English abstract)
- [4] Wang, S., Wu, W., Cui, D. S., 2022. On Mechanical Behaviour of Clastic Soils: Numerical Simulations and Constitutive Modelling. *Géotechnique*, 72, 706-721.
- [5] Kang, X., Wang, S., Wu, W., et al., 2025. Mechanical Behaviour and Shear Localisation of Gravel Soils: Experimental Study and Numerical Modelling. *Géotechnique*, 1-22. <https://doi.org/10.1680/jgeot.24.01238>
- [6] Peng, X. Y., Yu, P. C., Zhu, H., et al., 2023. Proposal of a Coupled DDA-SPH Method Incorporating a New Contact Algorithm for Soil-structure Interaction Simulations in Geotechnical Hazards. *Computers and Geotechnics*, 164, 105849. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105849>
- [7] Abioga, A., Rachmansyah, A., Zaika, Y., 2025. Rainfall-induced Slope Stability on Soil-rock Mixture. *Rekayasa Sipil*, 19, 83-96. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2025.019.01.11>
- [8] Zhang, R. H., Zhang, L. K., Cui, X. C. 2023. Triaxial Numerical Simulation and Macro-meso Deformation Analysis of Soil-rock Mixtures. *Water Resources and Power*, 41(7): 171-174+31. (in Chinese with English abstract)
- [9] Liu, S. Q., Wang, H. L., Xu, W. Y., et al., 2020. Numerical Investigation of the Influence of Rock Characteristics on the Soil-rock Mixture (SRM) Slopes Stability. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24, 3247-3256. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0034-1>
- [10] Zhao, L. H., Huang, D. L., Zhang, S. H., et al., 2021. A New Method for Constructing Finite Difference Model of Soil-rock Mixture Slope and its Stability Analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 138, 104605. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104605>
- [11] Zhu, C. W., Peng, C., Wu, W., 2022. Lagrangian Meshfree Particle Method (SPH) Based Simulation for Granular Flow in a Rotating Drum with Regularized $\mu(I)$ Elastoplastic Model. *Powder Technology*, 408, 117699. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117699>
- [12] Hu, Y. Y., Lu, Y., Zheng, Y. W., 2025. Numerical Study on Seepage-induced Instability of Soil-rock Mixture Slopes Using CFD-DEM Coupling Method. *Computers and Geotechnics*, 183, 107206. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107206>
- [13] Li, S., Peng, M., Shi, Z. M., et al. 2025. Simulation and analysis of the cascading hazard based on the fluid-soil coupled SPH method. *Earth Science*, 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [14] Peng, M., Zhao, Q. X., Li, S., et al. 2025. Two-phase SPH Simulation of Granular Landslide-tsunamis Processes Considering Dynamic Seepage. *Earth Science*, 1-13. (in Chinese with English abstract)
- [15] Bui, H. H., Fukagawa, R., Sako, K., Wells, J., 2011. Slope Stability Analysis and Discontinuous Slope Failure Simulation by Elasto-plastic Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). *Géotechnique*, 61, 565-574. <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.046>
- [16] Fang, H. J., Li, D. Q., Wang, S., et al., 2024. Hypoplastic Modeling Post-failure Behavior of Sandy Slope with Porosity Spatial Variability. *Computers and Geotechnics*, 173, 106470. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106470>
- [17] Yang Y, Liu F, Wu W., 2022. Assessing Slope

- Stability with an Improved 3D Numerical Manifold Method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(10): 6409-6423. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02993-7>
- [18] Wendland H., 1995. Piecewise Polynomial, Positive Definite and Compactly Supported Radial Functions of Minimal Degree. *Advances in Computational Mathematics*, 4: 389-396.
<https://doi.org/10.1007/BF02123482>
- [19] Su, Z. Y., Xiang, Y, Li, D. Q., et al., 2024. SPH-DEM Modeling of Cable-controlled ROVs: Underwater Mobility and Path Planning. *Ocean Engineering*, 292: 116623.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116623>
- [20] Su, Z. Y., Kang, X., Ding, X. C., et al. 2025. SPH-DEM Modeling of Rainfall-induced Slope Failure in Partially Saturated Soil-rock mixture. *Computers and Geotechnics*, 189: 107635.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107635>
- [21] Chau K T, Wong R H C, Wu J J.,2002. Coefficient of Restitution and Rotational Motions of Rockfall Impacts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(1): 69-77.
[https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00016-3](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00016-3)
- [22] Canelas R B, Domínguez J M, Crespo A J C, et al., 2017. Resolved Simulation of a Granular-fluid Flow with a Coupled SPH-DCDEM Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9): 06017012.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001331](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001331)

作者贡献

苏正洋: 方法及数值计算, 撰写和修订稿件。

李典庆: 构思、基金支持, 修订稿件。

王顺: 数据处理、基金支持, 修订稿件。

盛金保: 数据处理、修订稿件。

附中文参考文献

- [1] 边宏光,王顺,马海善,等. 2024. 基于随机场理论的土石混合体边坡稳定性. 地质科技通报, 43 (06): 162-170.
- [2] 孙华飞,鞠杨,王晓斐,等. 2014. 土石混合体变形破坏及细观机理研究的进展. 中国科学:技术科学, 44 (02): 172-181.
- [3] 张润涵,张凌凯,崔熙灿. 2023. 土石混合体的三轴数值模拟及宏细观变形分析. 水电能源科学, 41 (07): 171-174+31.
- [4] 李爽,彭铭,石振明,等. 2025. 基于水土耦合 SPH 方法的滑坡-堵江-成坝灾害链全过程动力演化模拟. 地球科学, 1-11.
- [5] 彭铭,赵庆新,李爽,等. 2025. 考虑动态渗流的散粒体滑坡-涌浪过程两相 SPH 模拟. 地球科学, 1-13.