

三维土石混合体冲击刚性结构动力过程 SPH-DEM 耦合模拟

王顺^{1,2}, 游铭^{1,2}, 苏正洋^{1,2*}, 郭哲恒^{1,2}

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水工程风险与防灾研究所, 武汉 430072

摘要: 土石混合体由细粒土体与形态和尺度高度离散的块石共同组成, 是一种典型的强非均质地地质介质, 自然界中大多数边坡均以土石混合体为主。然而, 现有边坡大变形分析通常将土石混合体等效为连续介质或理想化块石体系, 忽略了真实块石几何形态及其空间分布特征, 导致计算土石混合体边坡-结构相互作用时存在明显偏差。本研究结合三维激光扫描与随机投放算法, 构建了一种能够表征块石真实形态、尺寸分布及空间结构特征的土石混合体三维建模方法。基于光滑粒子流体动力学与离散元法 (SPH-DEM) 耦合数值方法, 研究了土石混合体边坡大变形过程及其对刚性结构的冲击动力响应特征。通过开展不含块石的砂土边坡大变形滑槽模型试验, 验证了数值模型的准确性与可靠性。在此基础上, 分析了块石含量、块石形状、边坡坡角以及刚性结构空间位置等因素对土石混合体-结构相互作用行为的影响。结果表明, 不规则块石几何形态显著增强了冲击力的波动性及峰值幅度, 其影响程度明显高于理想球形块石; 随着坡体块石含量和坡角的增加, 结构所受冲击力呈显著增大趋势; 随着刚性结构与滑槽末端距离的增大, 土石混合体冲击力表现出先快速增大后逐渐衰减的非线性变化特征。研究成果从细观结构尺度揭示了块石几何特征对冲击效应的放大机理, 为土石混合体边坡防护结构的合理设计提供了理论依据。

关键词: 土石混合体; 边坡; SPH-DEM 耦合; 大变形破坏; 滑槽试验

中图分类号: P642.22

收稿日期: 2026-1-22

Three-dimensional SPH-DEM Modelling of Dynamic Impact Interaction between Soil-Rock Mixtures and Rigid Structures

Shun Wang^{1,2}, Ming You^{1,2}, Zhengyang Su^{1,2*}, Zheheng Guo^{1,2}

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

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

Abstract: Soil-rock mixtures (SRMs), composed of a fine-grained soil matrix and rock blocks with highly dispersed shapes and sizes, are typical strongly heterogeneous geomaterials, and most natural slopes are predominantly composed of SRMs. However, existing analyses of large slope deformation commonly idealize SRMs as equivalent continua or assemblies of simplified blocks, neglecting the actual geometries and spatial distributions of rock blocks, which leads to significant deviations in predicting slope-structure interactions in SRM slopes. In this study, a three-dimensional modeling method for SRMs was developed by integrating three-dimensional laser scanning with a random placement algorithm, enabling realistic representation of rock-block morphology, size distribution, and spatial structural characteristics. Based on a coupled smoothed particle hydrodynamics-discrete element method (SPH-DEM), the large-deformation behavior of SRM slopes and their dynamic impact effects on

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

作者简介: 王顺(1986-), 男, 教授, 博士, 主要从事地质灾害链与水电工程安全研究。ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8349-6563>, E-mail: shun.wang@whu.edu.cn

通讯作者: 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>

rigid structures were investigated. The accuracy and reliability of the numerical model were validated through large-deformation chute model tests on sandy slopes without rock blocks. On this basis, the influences of rock-block content, rock-block shape, slope angle, and the spatial position of rigid structures on SRM-structure interaction were analyzed. The results show that irregular rock-block geometries markedly amplify both the fluctuation and peak magnitude of impact forces, and their effect is significantly greater than that of idealized spherical blocks. As the rock-block content and slope angle increase, the impact force acting on the structure increases significantly. As the distance between the rigid structure and the end of the chute increases, the impact force exhibits a nonlinear trend, first increasing rapidly and then gradually attenuating. These findings reveal, from a mesostructural perspective, the amplification mechanism by which rock-block geometric characteristics intensify impact effects, and provide a theoretical basis for the rational design of protective structures for SRM slopes.

Key words: Soil-rock mixture; slope; SPH-DEM coupling; large deformation failure; model experiment

0 引言

土石混合体是一类广泛分布于自然界地质体的非均质地质材料，主要由细粒土体基质与尺度、形态高度离散的块石共同组成(Wang et al., 2022)。由于其内部结构具有显著的随机性、离散性与力学非连续特征，土石混合体的动力响应行为明显区别于均质土体或单一颗粒介质(杜修力等, 2017)。在自然界中，大量滑坡与堆积层边坡均由土石混合体构成。当其发生整体失稳并演化为滑坡灾害时，块石的滚动、跳跃与碰撞往往主导滑体的破坏模式和能量耗散(Zhao et al., 2022)，是造成下游防护结构破坏与灾害范围放大的关键因素(He et al., 2021)。因此，深入研究土石混合体边坡的动力演化过程及其与刚性结构的相互作用机制(曾韬睿等, 2023)，对于地质灾害防控具有重要的理论意义与工程价值。

数值模拟已成为研究土石混合体的力学特性及灾变过程的重要手段。传统的有限元法(FEM)和离散元法(DEM)在这一领域已有广泛应用。然而，FEM在处理大变形、网格畸变及非连续介质分离方面存在一定局限(郭友军等, 2025)，且既有研究多聚焦于静力或准静力条件下的宏观力学特性(Kang et al., 2025, Yuan et al., 2023)。DEM方法虽然能较好地处理离散颗粒的大位移问题，但在模拟细粒土体的大变形特性时，面临计算效率低与参数标定困难等问题(Li et al., 2024, Kim et al., 2025)。

近年来，光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)方法作为一种拉格朗日无网格法，凭借其在处理大变形、自由液面追踪及强非线性问题上的独特优势，逐渐被应用于边坡大变形与泥石流等数值模拟中(Cui et al., 2022, Wang et al., 2024,

Fang et al., 2025, Su et al., 2024)。SPH方法通过一系列携带物理信息的粒子描述介质运动，兼顾了计算精度与效率。然而，单一SPH框架难以处理刚性块石之间的接触、碰撞及大角度旋转等离散行为。为此，SPH-DEM耦合方法被提出，该方法利用SPH描述土体基质的连续流变行为，利用DEM刻画块石的离散动力特征，有效地解决了多相介质耦合模拟的难题，在泥石流及土石混合体动力学研究中得到了一定应用(Su et al., 2026, 刘建康等, 2025)。

尽管SPH-DEM耦合方法在模拟土石混合体边坡破坏方面具有较大潜力，但现有研究多采用球形颗粒或简单组合形状表征块石(Liu et al., 2022)。然而，均质与非均质滑体在冲击力响应及运动扩展范围上存在显著差异，忽略该差异将低估冲击力峰值及其动力响应，并引起滑体运动范围预测偏差，从而降低对大变形过程的预测精度。此外，传统球形等效模型由于易发生滚动并造成能量耗散，且接触机制过于理想化，可能会低估真实块石条件下的动力损伤效应(Shen et al., 2019)。因此，在动力冲击问题中克服理想化假设，引入真实块石的几何特征，对评估土石混合体边坡灾变特征至关重要。此外，现有文献多停留在定性讨论层面，缺乏对球形等效简化模型所引起冲击动力学误差的定量评估。该类模型难以反映冲击力的高频波动特征，其对峰值冲击力大小的预测往往被低估。现有研究尝试将不规则块石纳入土石混合体数值模型，能够更真实再现边坡破坏过程，使数值模拟结果更加可靠。然而，现有方法在实际应用中仍面临一些技术瓶颈：例如，部分研究局限于二维平面重构(边宏光等, 2024)，难以体现三维空间中块石真实的运动特性；而现有的三维不规则块石建模(苏正洋等, 2025)，其模型生成过程依赖人工交互干预，难以满足大尺度灾变

模拟对块石数量的需求。总之，目前缺乏一种兼顾高保真度与高效率、且可广泛应用的三维建模方案。

基于此，本研究建立了一种自动化三维土石混合体建模方法，以构建包含真实块石几何特征的高保真三维土石混合体实体模型。基于该方法提出了土石混合体-刚性结构耦合的 SPH-DEM 数值模型，采用 SPH 方法模拟细粒土体的大变形运动特性，采用 DEM 方法计算真实块石在滑坡演化过程中的滚动、跳跃及碰撞等离散动力学特征。通过开展室内物理模型试验，验证数值模拟方法的准确性，进而分析了土石混合体块石形状、块石含量、边坡坡角及刚性结构空间位置对冲击响应特征的影响规律。

1 基本理论

1.1 SPH 基本理论

光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法是一种典型的无网格粒子类数值模拟方法。将土体离散为携带质量、速度及能量等物理信息的粒子集合，其质量和动量守恒方程主要用于描述土体的大变形行为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{g} + \mathbf{f} \quad (2)$$

其中， ρ 为密度， $\mathbf{v}$ 为速度， $\boldsymbol{\sigma}$ 为柯西 (Cauchy) 应力张量， $\mathbf{g}$ 为重力加速度， $\mathbf{f}$ 是由体力引起的加速度。

SPH 方法中对物理量的求解依赖于核函数近似与粒子近似两个核心过程的结合来完成插值计算。利用光滑核函数 $W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h)$ 对变量进行计算，可将场函数 $f(\mathbf{x})$ 及其导数 $\nabla \cdot f(\mathbf{x})$ 近似表示为：

$$\langle f(\mathbf{x}) \rangle = \int_{\Omega} f(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (3)$$

$$\langle \nabla \cdot f(\mathbf{x}) \rangle = - \int_{\Omega} f(\mathbf{x}') \cdot \nabla W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (4)$$

其中， Ω 为积分域， $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{x}'$ 分别表示任意三维坐标矢量和给定位置的三维坐标矢量， h 为光滑长度。通过核函数近似将场变量离散化：

$$\langle f(\mathbf{x}) \rangle = \sum_j f(\mathbf{x}_j) W_{ij} \frac{m_j}{\rho_j} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \langle \nabla \cdot f(\mathbf{x}_i) \rangle &= - \sum_j f(\mathbf{x}_j) \nabla_j W_{ij} \frac{m_j}{\rho_j} \\ &= \sum_j f(\mathbf{x}_j) \nabla_i W_{ij} \frac{m_j}{\rho_j} \end{aligned} \quad (6)$$

其中， i 与 j 分别代表积点粒子及其支持域内的邻近粒子，核函数记为 W ，其中 m 与 ρ 分别表示粒子 V_R 的质量和密度。控制方程可离散为：

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \sum_j m_j (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \cdot \nabla_i W_{ij} = \sum_j m_j v_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} = \sum_j m_j \left(\frac{\boldsymbol{\sigma}_i}{\rho_i^2} + \frac{\boldsymbol{\sigma}_j}{\rho_j^2} \right) \cdot \nabla_i W_{ij} + \mathbf{g}_i \quad (8)$$

1.2 SPH-DEM 耦合理论

边坡破坏及加速滑移阶段，细粒土体发生显著剪切破坏并呈现大变形流动，块石在随滑体整体运动的过程中伴随翻滚、跳跃及相互碰撞等复杂离散行为。在冲击刚性结构阶段，块石之间的局部接触进一步引发应力集中及冲击力的高频波动。针对上述复杂动力过程，本研究利用 SPH 方法刻画土体的大变形运动过程，采用 DEM 方法模拟块石的离散运动及碰撞过程。当土体中的 SPH 粒子 i 与 DEM 粒子 j 发生接触时，会产生相互作用力 $\mathbf{F}$ 。该力可以分解为法向分力 $\mathbf{F}_{n,ij}$ 和切向分力 $\mathbf{F}_{t,ij}$ ，这两种力又分别包括由材料变形产生的排斥力 F^r 和由能量耗散引起的阻尼力 $\mathbf{F}^d$ ：

$$\mathbf{F}_{n,ij} = \mathbf{F}_{n,ij}^r + \mathbf{F}_{n,ij}^d \quad (9)$$

数值模拟中土体采用 SPH 粒子离散，块石通过构建 DEM 粒子簇来表征。计算过程中，土体动力响应与刚体间接触分别由 SPH 控制方程及 DEM 接触算法求解，刚体运动严格遵循牛顿刚体动力学方程：

$$M_R \frac{\partial \mathbf{V}_R}{\partial t} = \sum_{k \in R} m_k \frac{\partial \mathbf{v}_k}{\partial t} \quad (10)$$

$$\mathbf{I}_R \frac{\partial \boldsymbol{\omega}_R}{\partial t} = \sum_{k \in R} m_k (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_R) \times \frac{\partial \mathbf{v}_k}{\partial t} \quad (11)$$

其中， R 表示由多个颗粒构成的刚体， M_R ， $\mathbf{V}_R$ ， $\mathbf{I}_R$ ， $\mathbf{r}_R$ 和 $\boldsymbol{\omega}_R$ 分别表示该刚体的质量、平动速度、转动惯量、角速度和质心矢径； m_k ， $\mathbf{v}_k$ 和 $\mathbf{r}_k$ 。分别表示构成该刚体的第 k 个局部颗粒的质量、运动速度和矢径。

1.3 冲击力计算理论

刚性结构被离散为多个粒子，每个粒子所受土石

混合体的冲击力通过计算其加速度与质量的乘积获得，整个刚性结构所承受的冲击力 F 为：

$$\mathbf{F} = \sum_k m_k \frac{\partial \mathbf{v}_k}{\partial t} \quad (12)$$

1.4 土体本构模型

为反映土体在冲击荷载下的强度衰减特性，采用考虑应变软化的 Drucker-Prager 弹塑性本构模型。通过定义屈服函数与塑性势函数，描述土体颗粒在撞击过程中的不可恢复变形：

$$f = \alpha_\phi I_1 + \sqrt{J_2} - k_c = 0 \quad (13)$$

$$g = \alpha_\psi I_1 + \sqrt{J_2} + \text{const} \quad (14)$$

其中， J_2 和 I_1 分别为偏应力张量的第二不变量和应力张量的第一不变量， α_ϕ 、 α_ψ 和 k_c 为本构模型参数， const 为常数。土体的非线性软化过程定义为：

$$c = c_r + (c_p - c_r)e^{-\eta_c \kappa} \quad (15)$$

$$\phi = \phi_r + (\phi_p - \phi_r)e^{-\eta_\phi \kappa} \quad (16)$$

其中， c_p 和 c_r 分别为峰值黏聚力和残余黏聚力， ϕ_p 和 ϕ_r 分别为峰值摩擦角和残余摩擦角， η_c 和 η_ϕ 分别为黏聚力软化系数和摩擦角软化系数， κ 为控制软化行为的状态变量。

应力-应变关系通过弹塑性本构模型建立：

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}^{\text{ep}} : d\boldsymbol{\varepsilon} \quad (17)$$

其中， $\mathbf{D}^{\text{ep}}$ 为弹塑性刚度矩阵。

本研究中，大变形指土体失稳后的非线性运动过程，而非传统有限应变范围（约 5%~10%）。采用 Jaumann 应力率，土体的应力率张量可表示为：

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \dot{\boldsymbol{\sigma}} + \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}} - \dot{\boldsymbol{\omega}} \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (18)$$

其中， $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$ 和 $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ 分别为柯西应力率张量和旋转率张量， G 和 K 分别为剪切模量和弹性模量， $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 为偏应变率张量， $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 为体应变率， $\boldsymbol{\delta}$ 为单位张量， $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$ 为塑性乘子， ψ 为剪胀角， J_2 为第二偏应力不变量， $\boldsymbol{\sigma}^*$ 为偏应力张量。

2 数值模型与参数

2.1 三维土石混合体边坡建模

土石混合体属于间断级配岩土材料，采用粒径小

于 2 mm 的标准砂与粒径为 30~50 mm 的棱角状或次棱角状灰岩碎石混合组成土石混合体。如图 1 所示，为真实反映块石的不规则几何形态，利用三维激光扫描仪获取真实块石表面的点云数据并生成 STL 文件。该方法能够有效保留块石表面的棱角特征，更准确地表征颗粒间的咬合、嵌挤及旋转受限效应，提高数值模拟中颗粒接触行为与能量耗散机制的真实性。



图 1 三维激光扫描仪扫描真实块石
Fig.1 3D laser scanning of rock block

在此基础上，构建尺寸为 0.7 m×0.35 m×0.15 m 的立方体模型，通过块石随机投放方法，生成满足预设级配和体积分数的块石模型。首先，利用最小包围盒确定模型的空间范围，模型体积 V_{total} 通过对其网格进行积分计算得到。

$$V_{\text{total}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{N_t} v_2^i \cdot (v_0^i \times v_1^i) \quad (19)$$

其中， v_0^i, v_1^i, v_2^i 为第 i 个三角面单元的三个顶点坐标， N_t 为三角面单元总数。块石直径可分为若干粒径区间：

$$(d_{\min}^k, d_{\max}^k), k=1, 2, \dots, n \quad (20)$$

其中， $d_{\min}, d_{\max}$ 为块石直径的最小值和最大值。

初始阶段设定固定的随机数种子以确保几何模型生成的可重复性。随后，利用均匀分布函数在模型包围盒空间内随机生成球心候选点位置，并判断球心是否在模型内部有效区域内。仅当球体整体位于模型范围内时保留，若球体与区域边界或已有球体发生重叠，则判定为无效并重新生成：

$$\| \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j \| \geq r_i + r_j + \delta \quad (21)$$

其中， c_i, c_k 为第 i, j 个球体的球心坐标； r_i, r_j 为第 i, j 个球体的半径； δ 为安全间距。迭代生成不重叠球体，直到累计体积满足粒径区间目标体积 V_k 。

生成球体后，利用真实块石 STL 模型替代球体模

型,通过块石外接最大尺寸 L_r 与球体直径 D_s , 计算缩放因子:

$$s = \frac{D_s}{L_r} \quad (22)$$

块石按缩放因子缩放至与球体大小一致, 对块石进行随机旋转:

$$R = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma) \quad (23)$$

其中, α, β, γ 为采用均匀分布随机生成的 $[0, 2\pi]$ 内任意欧拉角。

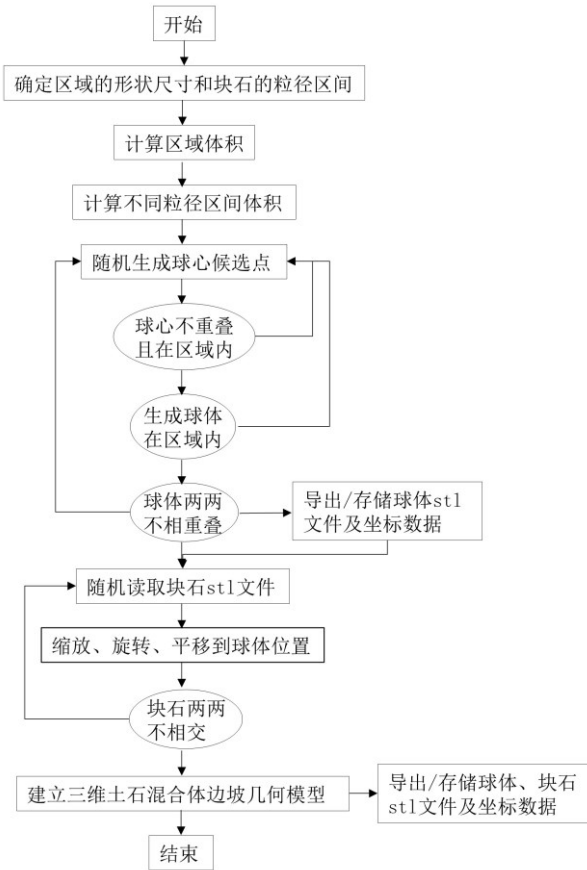


图2 三维土石混合体几何模型生成流程图

Fig.2 Flowchart for generating the 3D model of the soil-rock mixture

为避免块石重叠, 用包围盒判断块石是否可能相交, 若包围盒重叠, 进行布尔运算, 相交体积大于零则判定为相交。第 i 块石和第 j 块石的包围盒分别为:

$$B_i = [\min_i, \max_i], B_j = [\min_j, \max_j] \quad (24)$$

其中, B_i, B_j 为第 i 和 j 个块石的三维包围盒。若三维坐标方向上均满足:

$$x_i^{\max} \geq x_j^{\min}, y_i^{\max} \geq y_j^{\min}, z_i^{\max} \geq z_j^{\min}, \quad (25)$$

且两块石相交体积满足:

$$V(M_i \cap M_j) > 0, \quad (26)$$

则判断块石 i 与 j 存在相交关系。其中 $x_i^{\min}, x_i^{\max}, y_i^{\min}, y_i^{\max}, z_i^{\min}, z_i^{\max}$ 分别为块石 i 在 x, y, z 方向上的最小和最大坐标; M_i 和 M_j 分别为第 i, j 块石的三维几何实体; $V(M_i \cap M_j)$ 为块石相交部分的体积。若块石相交, 则删除体积较小的块石, 并在临近位置生成相同体积的块石。土石混合体边坡几何模型建模流程如图2所示。

本方法融合了几何概率建模和高效的三维布尔运算, 计算效率高, 可在短时间内快速生成数百块符合粒径分布的块石实体。算法为后续的数值计算提供了几何拓扑严密且力学状态稳定的初始条件。

2.2 滑槽模型与材料参数

基于土石混合体三维实体模型, 开展了多工况下的边坡数值模拟。如图3所示, 实验方案采用控制变量法, 共生成了6组数值试样。第一组变量为含石量, 设定了5%、10%、15%及30%的真实块石模型, 旨在揭示含石量对边坡稳定性的影响。第二组变量为块石形状, 固定含石量为10%, 对比了真实块石、人工块石及球形块石的差异。其中, 人工块石通过算法生成, 是由8到15条棱边组成的随机多面体, 以模拟碎石的随机棱角特征。为消除随机投放过程中的级配偏差, 如图4所示, 模型中块石的粒径生成均经过严格的筛选与校验, 使其符合目标土石混合体级配曲线。

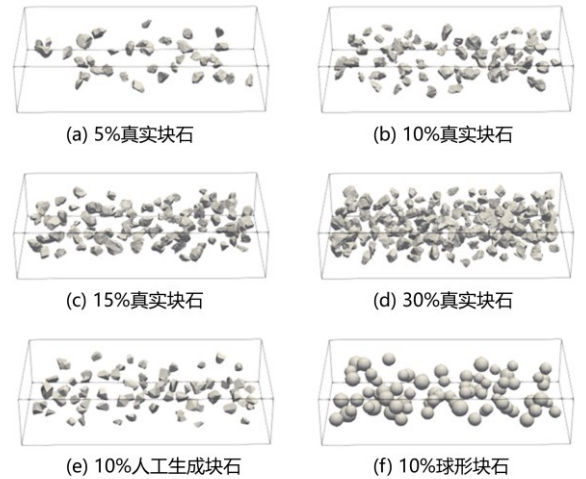


图3 三维空间不同块石含量及形状分布图

Fig.3 3D spatial distribution of rock blocks with varying contents and shapes

数值模拟采用的滑槽几何模型如图5所示, 坡度覆盖 25° 至 45° 。可通过调整刚性挡板距离 (0-2 m), 模拟不同滑距下的冲击行为。采用粒子刚性壁面边界条件: 模型底部及两侧侧壁被离散为固定不动的边界粒子, 速度与位移为0。当 SPH 土体粒子进入边界粒子的影响域时, 边界粒子会施加非线性的法向排斥力

以防止流体穿透。计算域内土体与边界分别离散为 14,300 个和 1,965,756 个粒子。首先施加重力载荷，土体被挡板约束，待系统达到静力平衡后，瞬时移除挡板触发滑坡运动。

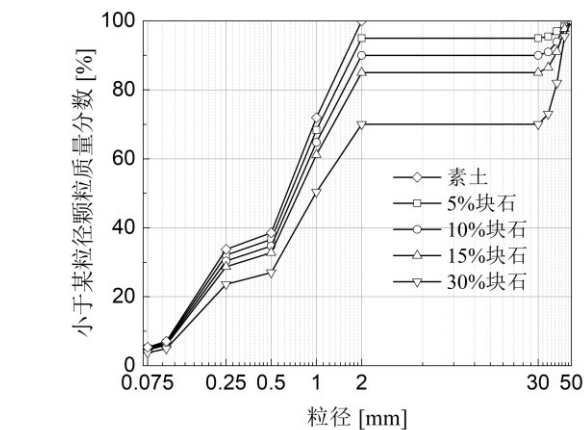


图 4 土石混合体级配曲线图
Fig.4 Particle size distribution of rock-soil mixture

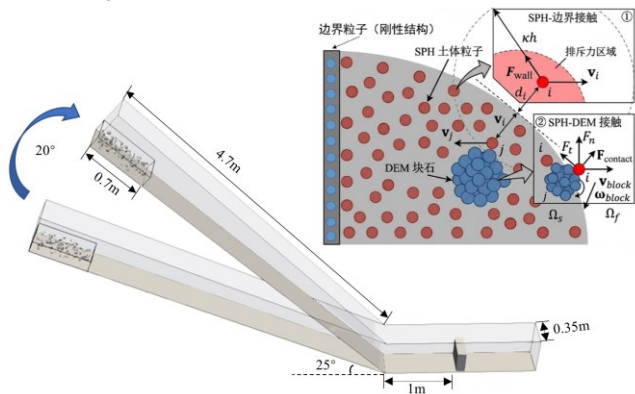


图 5 土石混合体边坡模型及边界条件
Fig.5 Physical model of the soil-rock mixture slope and boundary condition

公式 (15) 和 (16) 中引入的应变软化模型，采用指数函数形式描述土体强度的衰减过程。相较于传统线性软化模型，指数函数能够更平滑、合理地刻画材料内部黏聚力与摩擦角随累积塑性剪切应变增加而逐渐衰减，并最终趋于残余强度的演化过程。模型中的软化系数用于表征强度的衰减速率，取值越大，峰后强度衰减速度越快。

为保证上述软化系数及模型参数的合理性，参考已有经典文献的标定结果(Peng et al., 2022, Peng et al., 2019, Ren et al., 2023)，表 1 给出了数值模拟中土体、块石及刚性结构的材料参数。在 DEM 参数选取方面，Chau 等(2002)基于物理模型试验研究，测得岩石材料的碰撞恢复系数约为 0.487；Canelas 等(2017)指出固结石灰岩和花岗岩的动摩擦系数典型值约为 0.35；许宵等(2023)、苏正洋等(2025)将块石与建筑物之间的碰撞恢复系数取为 0.5。鉴于土石混合体的强非均质性，本研究对每种工况均生成 5 组随机重构样本进行平行

计算并取均值，以消除随机性带来的结果离散误差。

表 1 土体、块石和刚性结构材料参数			
Table 1 Parameters of soil, rock blocks, and rigid structure			
材料	参数	单位	数值
砂土	密度	kg/m ³	1600
	弹性模量	MPa	10
	泊松比	/	0.35
	峰值摩擦角	/°	28
	残余摩擦角	/°	26
	摩擦角软化系数	/	5
	峰值粘聚力	kPa	0.05
	残余粘聚力	kPa	0
	粘聚力软化系数	/	5
块石	密度	kg/m ³	2650
	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
刚性结构	密度	kg/m ³	7850
	弹性模量	GPa	210
	泊松比	/	0.3
	碰撞恢复系数	/	0.5
	动摩擦系数	/	0.35

2.3 数值验证

为验证所建数值模型在模拟土石混合体大变形运动演化及冲击动力响应方面的准确性，选取砂土滑槽模型试验作为基准算例，以排除土石混合体的非均质性对试验结果的干扰。试验中，堆积体初始受挡板约束保持静止，撤去挡板后，砂土失稳下滑并冲击下游 2 m 处的监测断面。试验利用高频数据采集系统与高速摄像机完整记录运动轨迹，并在距滑槽底 3 cm 和 6 cm 处布置冲击力传感器。图 6 展示了砂土边坡运动演化的物理试验与数值模拟对比结果。左侧为高速摄影捕捉的试验现象，右侧为相应的 SPH 模拟结果。

对比可知，数值模拟复现了边坡从失稳启动、加速下滑至堆积静止的全过程动力学特征。在加速阶段 ($t = 1\text{ s}$)，土体在重力驱动下沿滑槽高速俯冲。当 $t = 3\text{ s}$ 时，滑体完全进入堆积区并达到静止平衡模拟得到的堆积体轮廓线与试验结果不仅在几何形态上基本重合，在堆积范围和前缘位置上也表现出极高的一致性，从而为后续开展复杂的土石混合体滑坡模拟奠定了可靠的模型基础。

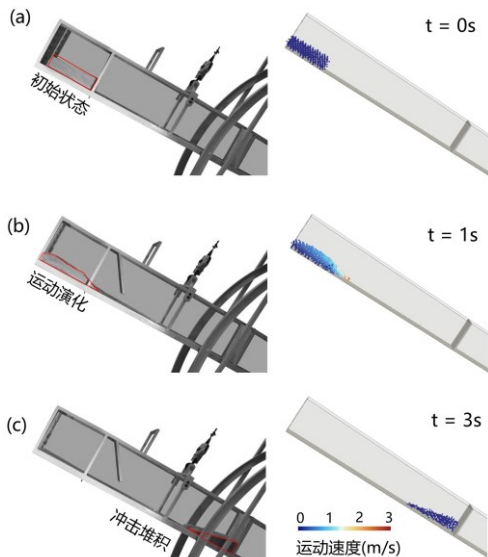


图 6 砂土边坡物理模型实验不同时刻照片及对应模拟结果
Fig. 6 Comparison between experiments and numerical simulation of impact dynamics of sandy soil slope

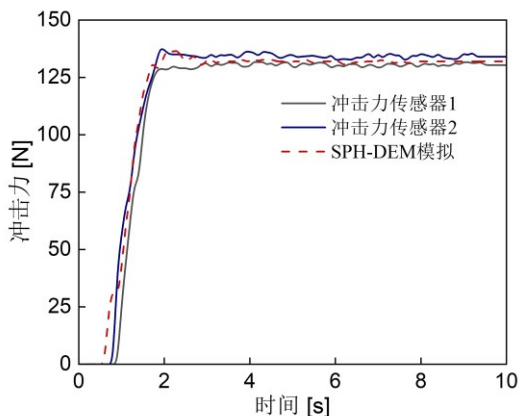


图 7 数值模拟与试验测量冲击力对比
Fig.7 Comparison of results of impact force from numerical simulation and experimental measurement

图 7 给出了数值模拟与物理试验中监测断面冲击力随时间演化的对比结果，可见，数值模拟结果与实测结果的整体变化趋势一致。冲击作用主要发生在 0.5 s 至 2 s 之间，表现为冲击力的迅速攀升。随后，曲线进入相对稳定的波动阶段，峰值维持在 130 N 左右。

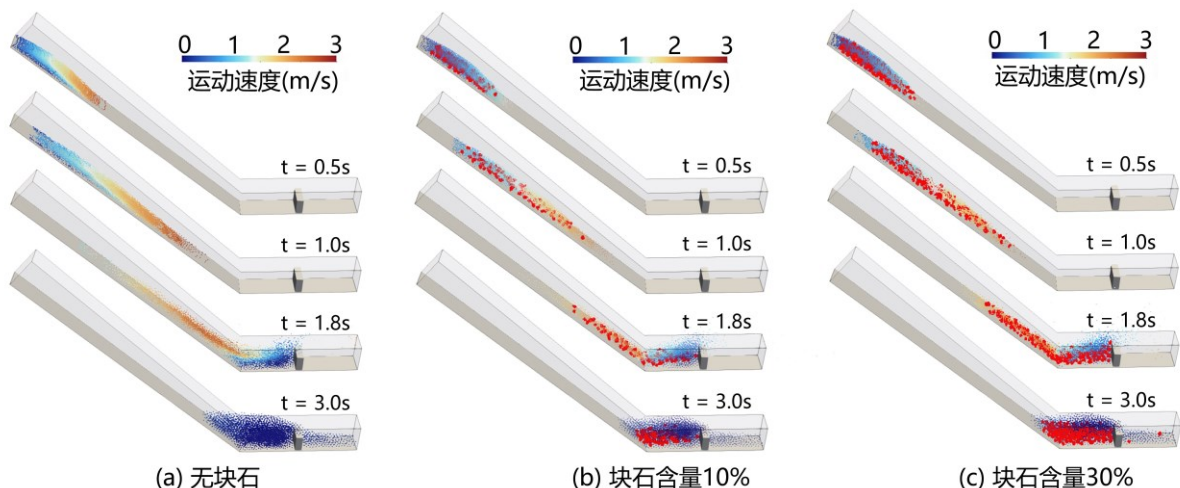


图 8 (a) 砂土、(b) 块石含量 10%和(c) 块石含量 30%的土石混合体边坡运动过程
Fig.8 Flow dynamics of soil-rock mixture slopes: (a) sandy soil, (b) 10% block stone content, and (c) 30% block stone content

数值模拟结果准确复现了冲击力的起动时间与增长速率，表明模型能够较好地反映滑体冲击的动力学过程。

3 土石混合体边坡数值模拟

3.1 块石含量对冲击特性的影响

图 8 对比了纯砂土、10%含石量和 30%含石量边坡在下滑过程中的速度场时空分布。纯砂土边坡表现出平滑连续的速度场特征，边坡前缘下滑速度最快，后缘启动速度最慢且启动较晚。从细观力学角度分析，产生这一现象的原因在于滑体内部接触结构与能量耗散路径的转变。在低含石量条件下，块石孤立分布，系统能量主要通过细粒土体的塑性变形耗散，动能衰减显著；而当含石量增至 30%时，块石间逐渐形成接触力链网络，颗粒配位数增加，能量传递由基质耗散转向力链高效传导。在这种骨架携带作用下，土体基质带来的粘滞阻力耗散效应被极大削弱，导致整体运动速度显著提升，进而使其能够在撞击瞬间释放出更为巨大的峰值冲击力。

图 9 展示了含石量对土石混合体边坡峰值冲击力的影响规律。随含石量的增加，峰值冲击力呈非线性增长趋势，砂土工况最大冲击力约 190 N，而 30%含石量混合体对应的最大值约 240 N。定量计算表明，30%含石量工况下的峰值冲击力较纯砂土工况提升了约 26.3%，显著放大了滑坡体的动能传递效率。尽管峰值冲击力在 10%~15%含石量区间存在细微波动，但并未改变冲击力随含石量增加而显著增强的整体趋势，表明块石的存在提高了边坡的冲击动能。块石比例的增加增强了颗粒间的碰撞频率与能量集中效应，从而强化了动量传递过程。该结果表明，含石量是控制滑坡冲击动力特性的关键因素之一。

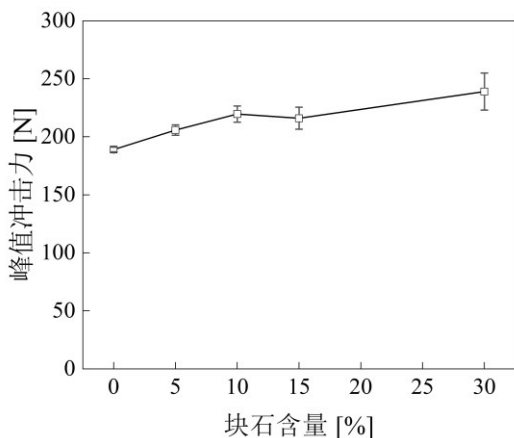


图9 不同块石含量土石混合体边坡峰值冲击力
Fig.9 Peak impact force of soil-rock mixtures with different rock content

此外，图9中的误差棒反映了5次平行计算结果的离散程度。可以看出，冲击力数据的波动范围对含石量高度敏感。在纯砂土（含石量0%）工况下，介质均质性较强，各次计算所得冲击力基本一致。当含石量增至30%时，受块石空间分布及初始姿态差异的影响，颗粒间离散碰撞的随机性显著增强，导致峰值冲击力离散程度明显增大。局部高能碰撞引起的随机波动具有一定普遍性，系统动能越高、碰撞越剧烈，由块石随机排布所引发的数据离散性越强。该机制同样在后文不同坡度（图12）及不同刚性结构距离（图14）工况中得到体现。

3.2 块石形状对冲击特性的影响

图10揭示了块石几何形态对滑坡冲击力时程演化的影响。三种工况总体趋势一致，土石混合体边坡冲击力均在接触刚性结构后（约1.5 s）急剧攀升，随后下降并维持在稳定数值。

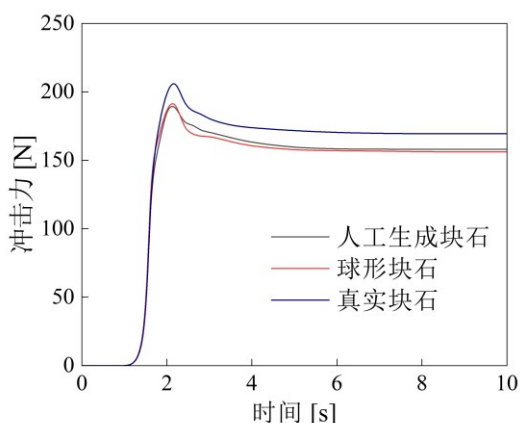


图10 不同块石形状下的冲击力时程曲线
Fig.10 Time-history curves of impact force with different block stone shapes

计算结果表明，真实块石工况下的峰值冲击力约

205 N，明显高于人工生成块石（约190 N）与球形块石（约188 N）。这是由于球形块石以转动耗能为主，而真实块石因表面不规则、相互嵌挤，抑制转动动能，保持较高平动速度，从而增强对结构的冲击作用。进入稳定阶段后，真实块石的冲击力维持在170 N左右，而球形及人工块石回落至约155 N。

几何形态显著改变了冲击荷载的波动频率与幅度。为消除单次模型随机重构带来的偶然性误差并定量评估这一波动特征，提取了5组平行计算的冲击力时程均值数据，对峰后动态堆积阶段（ $t=2.5\text{ s}$ 至 6.0 s 区间）进行了严格的统计分析，结果如表2所示。真实块石工况下的冲击力呈现出高频振荡特征，其局部最大振幅高达25.95 N，标准差达到5.71；相比之下，球形和人工生成块石的冲击力时程演化相对平滑，波动指标均显著低于真实块石。从细观碰撞机制来看，这种剧烈且量化指标极高的波动性，源于真实块石表面不规则棱角的离散碰撞效应：在持续冲击与堆积过程中，真实块石尖锐的棱角频繁与刚性结构发生局部点、面高能碰撞，导致局部接触应力集中。

表2 不同块石形状工况下冲击力波动特征量化指标
Table 2 Quantitative indicators of impact force fluctuation with different rock shapes

块石形状	局部最大振幅/N	冲击力标准差
球形块石	13.21	4.32
人工生成块石	19.58	5.68
真实块石	25.95	5.71

3.3 边坡坡度对流动与冲击特征的影响

图11给出了不同坡度（ 30° 、 35° 、 40° ）条件下土石混合体边坡大变形运动过程。总体而言，坡度对滑坡动力响应具有显著影响。随着坡度增加，滑体沿坡向的重力分量增大，从而加速滑体运动过程。在 40° 工况下，滑坡启动后速度迅速达到峰值，约4.0 s即完成堆积，高速区显著扩大并贯穿滑体中前部，部分土体越过刚性结构；相比之下， 30° 和 35° 缓坡工况下滑体运动相对迟滞，整体流速较低，约6.0 s完成堆积。此外，在 30° 工况下，土石混合体基本被刚性结构完全拦截，而在 35° 工况下已有部分土体越过结构，表明该坡度附近可能存在由局部滞留向整体转移转变的临界状态。此外，在滑道长度保持不变的条件下，坡度的增加会导致滑体初始势能提高，从而对运动速度及冲击响应产生显著影响。

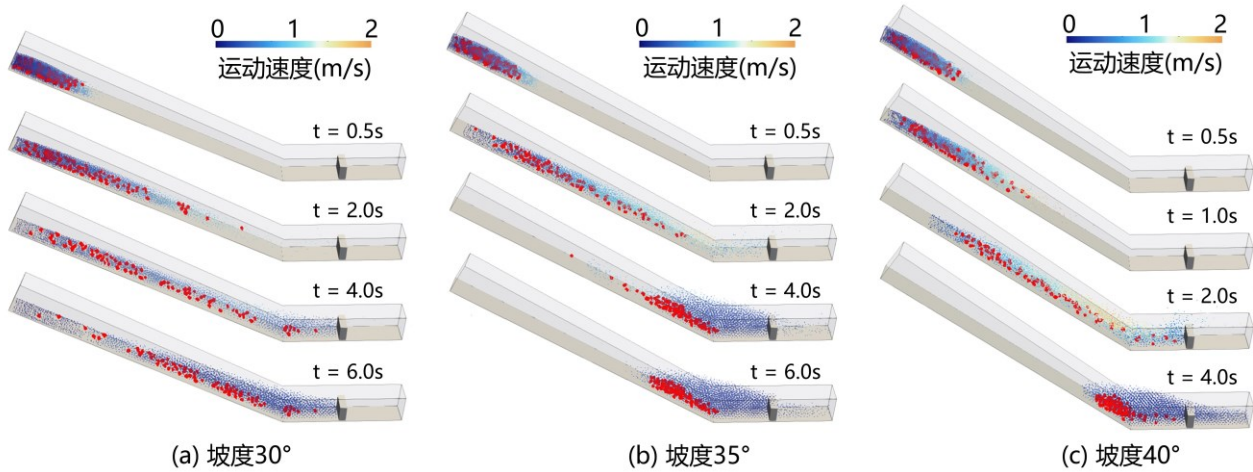


图 11 坡度为(a) 30°、(b) 35° 和(c) 40° 的土石混合体边坡运动过程

Fig.11 Flow dynamics of soil-rock mixture slopes with slope angle of (a) 30°, (b) 35°, and (c) 40°

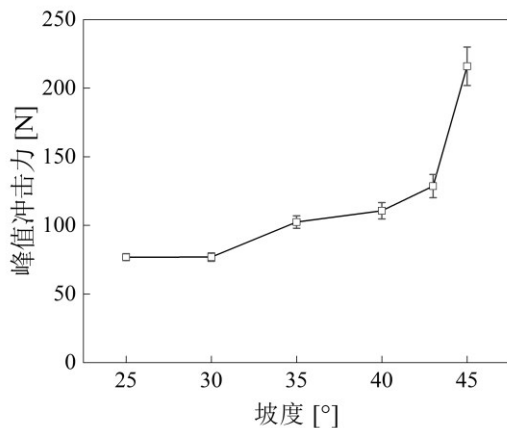


图 12 不同坡度土石混合体边坡峰值冲击力

Fig.12 Peak impact forces of soil-rock mixture slopes with different slope angles

图 12 给出了峰值冲击力随坡度变化的定量关系。结果表明，峰值冲击力随坡度增大呈明显上升趋势。在 25°和 30°缓坡条件下，由于切向分量较小且法向应力较大，基底摩擦作用显著，滑体加速受限，峰值冲击力约为 78 N；当坡度增至 45°时，滑体获得更高运动速度，峰值冲击力增至约 219 N。

3.4 建筑距离与特性对冲击响应的影响

为研究刚性结构位置对边坡冲击响应的影响，选取刚性结构距滑槽末端分别为 0 m、0.5 m、1 m、1.5 m 和 2 m 等六种工况进行对比分析。图 13 展示了不同工况下土石混合体边坡的最终堆积形态。

结果表明，当刚性结构位于滑槽末端（0 m）或距离较近（0.5 m）时，由于滑体仍保留较高的沿坡惯性动能，大量土体以抛射或高速度滑移的形式越过刚性结构，结构的拦截作用相对有限。当刚性结构距离增大至 1 m 和 1.5 m 时，滑体在水平段的摩擦耗散作用增强，整体运动速度明显降低，此时仅有少量上部松散土体越过刚性结构，而块石基本被阻挡。

当距离为 2 m 时，滑体在长距离水平滑移过程中动能进一步衰减，运动形态由惯性主导逐渐转变为摩擦控制，土石混合体已无法越过刚性结构，并在刚性结构前方发生堆积。

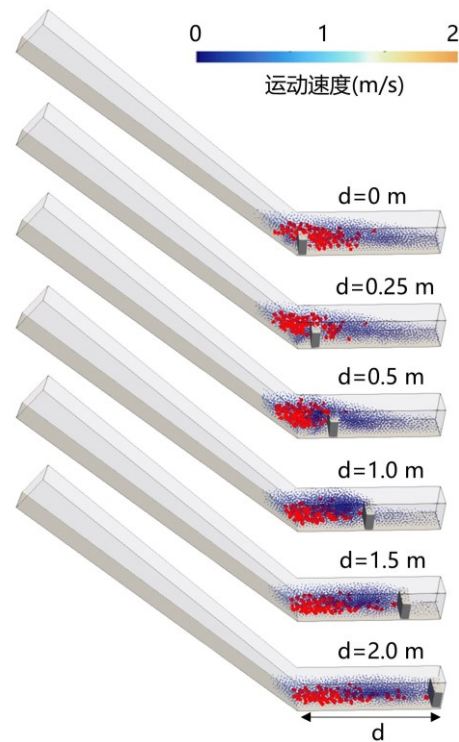


图 13 刚性结构距不同位置的土石混合体边坡最终形态
Fig.13 Final deposition of soil-rock mixture slopes with rigid structures at different locations

图 14 定量展示了刚性结构位置对峰值冲击力的控制作用。结果显示，冲击力随距离变化表现出显著的非单调性，全局峰值冲击力出现在 $d = 0.25$ m 处，而非紧贴滑槽出口的 $d = 0$ m 处。产生这一现象的原因在于滑体运动轨迹与有效冲击质量的变化：当 $d = 0$ m 时，刚性结构位于坡脚交界处，在惯性作用下，大量块石以抛射形式越过结构，峰值冲击力较小。当结构后移至 $d = 0.25$ m 时，块石已在重力作用下落入水平段，

结构可正面拦截大部分块石，产生最大峰值冲击力。此后，随着距离 d 的进一步增加，土石混合体在水平滑槽底部的摩擦耗散作用逐渐占据主导，系统动能显著衰减，峰值冲击力随之呈近似线性递减趋势。

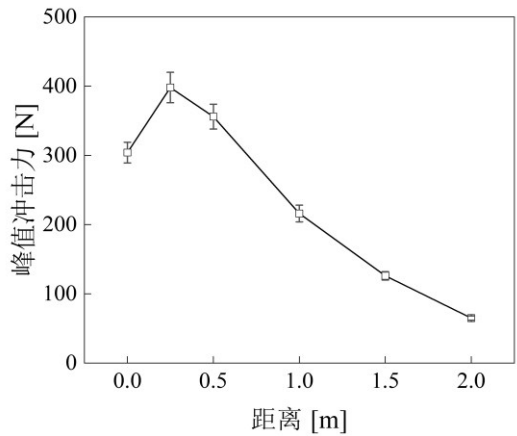


图 14 刚性结构与滑槽末端不同距离的土石混合体边坡峰值冲击力

Fig.14 Peak impact forces of soil-rock mixture slopes with rigid structures at different distances from the flume end

4 结论

本研究提出了土石混合体自动化三维建模方法，基于 SPH-DEM 耦合数值模拟，开展了土石混合体三维边坡大变形特征及其与结构相互作用模拟研究，主要结论如下：

(1) 建立了基于三维激光扫描与随机布置算法的自动化土石混合体建模方法，能真实还原块石的几何特征与空间分布。该方法结合空间筛选与布尔相交检测，实现了块石间无重叠、高保真的几何构型，可为 SPH-DEM 耦合数值模拟提供可靠的初始条件。

(2) 验证了 SPH-DEM 耦合方法的有效性与准确性。通过与室内物理模型试验对比，数值模拟成功重现了滑坡从启动加速到堆积的全过程，二者在运动演化特征与冲击力时程曲线形态上吻合良好，表明该模型能够有效捕捉土石混合体的大变形流滑动力学行为。

(3) 块石含量与形状对边坡冲击特性具有显著影响。随块石含量由 0% 增加至 30%，刚性结构峰值冲击力增幅约 24%。真实块石工况下冲击力最大且波动最显著，人工生成块石和球形块石边坡冲击力显著低于真实块石，表明块石几何不规则性增强了滑体内部碰撞作用及冲击力波动范围。

(4) 坡角与刚性结构位置对边坡动力响应起决定性作用。坡度增大使滑动体动能显著提升，峰值冲击力随之增大，35° 是土石混合体从坡面滞留向全程滑动转变的关键临界角度。刚性结构位置和冲击力响应表

现为先增后减规律，0.5 m 时冲击力最大，为 352 N。当距离大于 1.5 m 时，滑体能量显著衰减，冲击力降至 100 N 以下，说明合理设置刚性结构与边坡的距离可有效降低灾害风险。

References

Wang S, Wu W, Cui D. On mechanical behaviour of elastic soils: numerical simulations and constitutive modelling[J]. Géotechnique, 2022, 72(8): 706-721.

Zhao L, Qiao N, Huang D, et al. Numerical investigation of the failure mechanisms of soil-rock mixture slopes by material point method[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 150: 104898.

He Y, Nie L, Lv Y, et al. The study of rockfall trajectory and kinetic energy distribution based on numerical simulations[J]. Natural Hazards, 2021, 106(1): 213-233.

Kang X, Wang S, Wu W, et al. Mechanical behaviour and shear localisation of gravel soils: experimental study and numerical modelling[J]. Géotechnique, 2025.

Yuan W H, Liu M, Guo N, et al. A temporal stable smoothed particle finite element method for large deformation problems in geomechanics[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 156: 105298.

Li L, Hu C, Yuan Y, et al. Efficient optimization parameter calibration method-based DEM simulation for compacted loess slope under dry-wet cycling[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 17418.

Kim J, Kim H J, Park H J. Comparative analysis of granular material flow: Discrete element method and smoothed particle hydrodynamics approaches[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(5).

Cui B, Zhang L. Application of Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) for the simulation of flow-like landslides on 3D terrains[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2023, 135(1): 357-376.

Wang S, Fang H, Kang X, et al. Simhypo-sand: a simple hypoplastic model for granular materials and SPH implementation[J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(7): 4533-4555.

Fang H, Wang S, Kang X, et al. SPH Implementation of a Dynamic Hypoplastic Model for Seismic Large Deformation Analysis in Slopes[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2025.

Su Z, Wang S, Li D, et al. SPH-DEM modeling overtopping failure of earthfill dams[J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(2): 953-970.

Su Z, Kang X, Ding X, et al. SPH-DEM modeling of rainfall-induced slope failure in partially saturated soil-rock mixture[J]. Computers and Geotechnics, 2026, 189: 107635.

Liu L, Wu J, Ji S. DEM-SPH coupling method for the interaction

- between irregularly shaped granular materials and fluids[J]. Powder Technology, 2022, 400: 117249.
- Shen W, Zhao T, Dai F, et al. DEM analyses of rock block shape effect on the response of rockfall impact against a soil buffering layer[J]. Engineering Geology, 2019, 249: 60-70.
- Peng X, Liu J, Cheng X, et al. Dynamic modelling of soil-rock-mixture slopes using the coupled DDA-SPH method[J]. Engineering Geology, 2022, 307: 106772.
- Peng C, Wu W, Yu H, et al. A SPH approach for large deformation analysis with hypoplastic constitutive model[J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(6): 703-717.
- Ren S, Zhang P, Man T, et al. Numerical assessments of the influences of soil-boulder mixed flow impact on downstream facilities[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 153: 105055.
- Chau K T, Wong R H C, Wu J J. Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(1): 69-77.
- Canelas R B, Domínguez J M, Crespo A J C, et al. Resolved simulation of a granular-fluid flow with a coupled SPH-DCDEM model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(9): 06017012.

中文参考文献

- 杜修力, 张佩, 金浏. 土石混合体宏观力学性能研究的细观等效分析方法[J]. 工程力学, 2017, 34(10): 44-52.
- 曾韬睿, 殷坤龙, 桂蕾, 等. 基于滑坡致灾强度预测的建筑物易损性定量评价[J]. 地球科学, 2023, 48(05): 1807-1824.
- 郭友军, 刘鑫龙, 石振明, 等. 一种模拟节理边坡破坏全程的改进 SPH 方法[J]. 地球科学, 2025, 50(10): 4009-4026.
- 刘建康, 蔡强, 张恒翔, 等. 基于 SPH-DEM-FEM 耦合的泥石流冲击排导槽肋槛的动力响应研究[J/OL]. 工程科学与技术, 2025: 1-13.
- 苏正洋, 李典庆, 王顺, 等. 三维土石混合体边坡大变形 SPH-DEM 模拟[J/OL]. 地球科学, 2025: 1-9.
- 边宏光, 王顺, 马海善, 等. 基于随机场理论的土石混合体边坡稳定性[J]. 地质科技通报, 2024, 43(06): 162-170.
- 许宵, 王顺, 李典庆, 等. 土石混合体边坡的稳定性与大变形破坏分析[J]. 武汉大学学报(工版), 2023, 56(12): 1501-1512.