

降雨型滑坡流滑冲击缝隙坝的力学行为及坝体角度优化研究

陈冲冲¹, 周书^{2,*}, 胡洪森¹, 郭桢³, 欧阳朝军²

1. 贵州民族大学建筑工程学院, 贵州贵阳 550025

2. 中国科学院、水利部 成都山地灾害与环境研究所 山地自然灾害与工程安全重点实验室, 成都 610299

3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092

摘要: 沟道地形和缝隙坝构型的组合导致了复杂多变的坝体角度。然而, 目前坝体角度对降雨型滑坡流滑冲击缝隙坝的影响还未得到深入地研究。为此, 本文采用离散元法 (DEM), 分析了不同坝体角度和相对缝隙开口下, 降雨型滑坡流滑冲击缝隙坝的动力过程。研究表明: (1) 随着坝体角度增加, 碎屑颗粒爬升的高度降低, 坝脚“死区”的形成速率加快。(2) 不同相对缝隙开口下, 坝体所受最大法向冲击力随坝体角度增大呈先减小后显著上升趋势, 其中坝体角度由 90°增至 120°时法向冲击力均提升约 10%、动力冲击系数 α 均提高约 20%, 而切向冲击力则随坝体角度增大持续减小。(3) 在同一相对缝隙开口下, 缝隙坝对滑坡碎屑的拦截率和能量耗散效率随坝体角度增大而升高, 质量流量则随之降低。(4) 结合缝隙坝的拦截效率及承灾体受力分析表明, 在不同相对缝隙开口 (s3、s4 和 s5) 条件下, 坝体角度为 60°时, 缝隙坝均能避免库容快速淤满, 同时保障承灾体受力较小, 综合调控能力最优。研究成果可为防灾减灾工程中缝隙坝的优化设计提供理论支撑。

关键词: 降雨型滑坡; 缝隙坝; 坝体角度; 离散元法; 冲击特性

中图分类号:P694

收稿日期:2026-2-4

Study on Mechanical Behavior of Rainfall-triggered Landslides Impacting Slit Dam and Optimization of Dam Angles

CHEN Chong-Chong¹, ZHOU Shu^{2,*}, HU Hong-Sen¹, GUO Zhen³, OUYANG Chao-Jun²

1. School of Civil Engineering and Architecture, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience/Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China

基金项目: 国家重点研发计划 (NO.2024YFC3012601); 国家自然科学基金项目 (Nos. 42507271; Nos.42367023); 四川省科技赋能防灾减灾“揭榜挂帅”项目 (2025YFNH0009)

作者简介: 陈冲冲 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事山地灾害防治研究。E-mail: ccc42452021@163.com. ORCID:0009-0004-3786-5777

通讯作者: 周书 (1994—), 男, 助理研究员, 主要从事滑坡、泥石流等山地灾害致灾机制与数值模拟研究。E-mail: shuzhou@imde.ac.cn;

Tel: (028) 85228816. ORCID:0000-0002-7904-4748

Abstract: The combination of gully terrain and slit dam configuration gives rise to highly variable dam angles. However, the influence of dam angle on the impact of rainfall-triggered landslides on slit dam has not been thoroughly investigated. To address this issue, the discrete element method (DEM) was adopted in this study to analyze the dynamic processes of rainfall-triggered landslides impacting slit dam under different dam angles and relative slit openings. The results show that: (1) As the dam angle increases, the run-up height of debris particles decreases, while the formation rate of the dead zone accelerates. (2) Under different relative slit sizes, the maximum normal impact force on the dam first decreases and then increases significantly with the increase of dam angle. When the dam angle increases from 90° to 120° , the normal impact force increases by approximately 10%, and the dynamic impact coefficient α increases by about 20%, while the tangential impact force decreases continuously with the increase of dam angle. (3) For the same relative slit opening, the grain-trapping efficiency of slit dam for landslide debris and the energy dissipation efficiency increase with the rise of dam angle, whereas the mass flow rate decreases accordingly. (4) A comprehensive analysis of the grain-trapping efficiency of the slit dam and the force on the downstream structure indicates that, under different relative slit sizes (s_3 , s_4 , and s_5), a dam angle of 60° enables the slit dam to avoid rapid siltation of its storage capacity while ensuring a relatively small force on the downstream structure, achieving the optimal comprehensive regulation performance. The research findings can provide theoretical support for the optimal design of slit dams in disaster prevention and mitigation engineering.

Key words: Rainfall-triggered Landslides; Slit dam; Dam angle; Discrete element method; Impact characteristics

1 引言

近年来,在气候变化条件下,极端降雨事件增多,导致降雨型滑坡灾害呈高发态势(李滨等, 2025)。滑坡体在运动过程中极易破碎解体,进而形成具有强流动性和高破坏性的碎屑流,对人们的生命财产安全及经济发展构成严重威胁(贺旭荣等, 2024; 王彬等, 2025)。例如,2019年7月23日,贵州省水城县鸡场镇在短时强降雨下触发高位滑坡并形成碎屑流,摧毁坡脚的居民区,造成43人遇难,9人失踪(郑光等, 2020); 2025年2月8日,四川省筠连县沐爱镇在持续降雨作用下发生大型高位滑坡-碎屑流灾害,造成10人死亡,19人

失踪(张世殊等, 2025)。因此,对降雨型滑坡的运动过程进行研究,厘清其冲击特性,是当前亟需解决的问题,对国家的防灾减灾工作具有重要意义。

缝隙坝作为一类重要防治结构,因其具有“拦粗排细、削峰减能”的特点,在应对降雨型滑坡冲击方面展现出独特优势,因而被广泛使用。目前,国内外学者开展了大量有关缝隙坝的研究工作。Choi等(2016, 2020)结合物理模型试验与理论分析,研究了不同缝隙开口及高度下,碎屑颗粒与缝隙结构之间的相互作用; Hu等(2020)通过水槽实验研究了缝隙尺寸对防护结构冲击荷载的影响,结果表明泥石流龙头对拦砂坝动力冲击荷载主要是由泥石流本身动力学特性决定。然而,传统的物理

模型试验受限于监测技术,在获取碎屑流内部深部位移、动态三维变形及多场信息方面仍存在挑战(方堃等,2024)。因此,越来越多的学者采用数值模拟方法以弥补物理试验的不足。例如,Gong等(2021)考虑颗粒形状,用离散元法模拟碎屑流与缝隙坝的相互作用,发现颗粒动能主要通过颗粒间摩擦与阻尼耗散,缝隙坝拦截效率随相对开口的增大呈指数下降;Huang等(2023)运用离散元法研究干颗粒流与双缝结构的相互作用及坝体的调控功能,发现缝隙尺寸、数量、间距对堆积高度、质量流出率、拦截效率及能量耗散影响显著;Li等(2025)采用离散元法模拟干颗粒流与缝隙坝的相互作用,发现增大缝隙尺寸或减小隔板间距会增大归一化最大冲击力,缝隙尺寸超阈值后,因颗粒爬升高度降低冲击力减弱。

尽管前人通过室内水槽试验和数值模拟从诸多方面研究了碎屑流与缝隙坝的相互作用,并取得了一系列的研究成果。但如图1所示,当前的研究大多数基于垂直坝体进行研究,并没有充分讨论坝体角度对碎屑流冲击缝隙坝的影响。实际上,由于山区起伏的地形会导致缝隙坝在建设时不能完全与地表垂直。此外,在缝隙坝设计时也会将坝体截面设计为梯形或复式梯形,导致坝体迎流面存在一

定的角度。例如《泥石流防治工程设计规范T/CAGHP021-2018》中规定坝体的截面应为梯形或复式梯形,且上游面坡比率为1:0.4~1:0.8。上述复杂沟道地形和坝体构型的组合导致了多变的坝体角度。在非垂直坝体角度的状态下,颗粒与坝体的碰撞角度会发生显著改变,进而影响碎屑流的减速和动量转化(Chu et al., 1995),导致碎屑流的爬高、冲击力等动力学特征出现一定的差异。更为严重的是,目前对于碎屑流冲击力的估算方法大多基于坝体垂直时的工况得出,与真实状态的坝体存在显著的区别,这可能会导致现实中坝体的设计存在一定的安全隐患。因此,亟需开展坝体角度对碎屑流-缝隙坝相互作用影响的研究以厘清不同角度下坝体对于冲击的动力响应。

综上所述,为弥补关于坝体角度对缝隙坝调控作用有何影响的研究空白,本文以降雨型滑坡为研究对象,聚焦于滑坡解体后、以颗粒碰撞与摩擦为主导的运动阶段,采用离散元法开展不同坝体角度及相对缝隙开口条件下碎屑流冲击缝隙坝的数值模拟。本研究致力于明晰坝体角度对碎屑流冲击特性的影响,旨在为防灾减灾工程中缝隙坝的优化设计提供理论支撑。

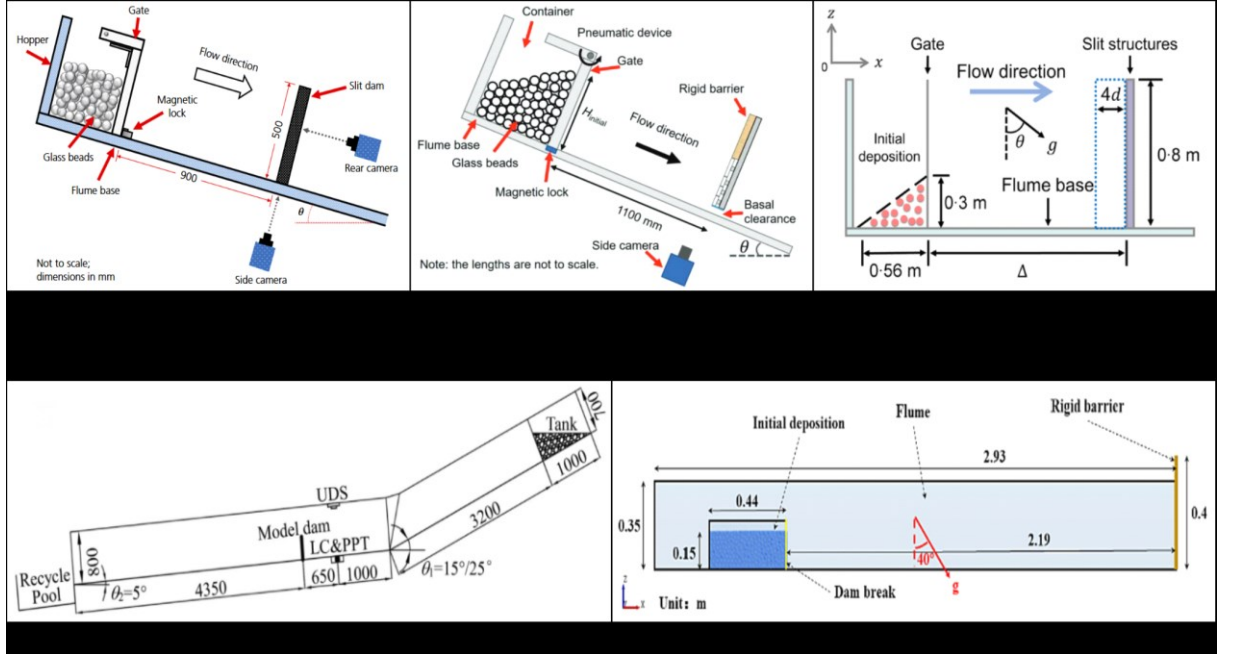


图 1 现有研究典型模型图。a: Choi et al., 2016; b: Choi et al., 2020; c: Li et al., 2025; d: Hu et al., 2020; e: Huang et al., 2023

Fig. 1 Typical model setup of existing researches. a: Choi et al., 2016; b: Choi et al., 2020; c: Li et al., 2025; d: Hu et al., 2020; e: Huang et al., 2023

2 研究方法

2.1 DEM 理论

离散元方法 (DEM) 是一种基于离散介质理论的方法, 其将颗粒流建模为刚性球体的集合, 并采用不发生变形的壁面单元对结构进行建模。粒子 i 的运动由以下方程控制:

$$m_i \left(\frac{d\vec{v}_i}{dt} - \vec{g} \right) = \sum_{j=1}^{n-1} (\vec{F}_{ij}^n + \vec{F}_{ij}^t) \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n-1} \vec{M}_{ij} \quad (2)$$

式中: m_i 为颗粒质量, $\vec{g}$ 为重力加速度; $\vec{v}_i$ 为平动速度, $\vec{\omega}_i$ 为角速度; I_i 为颗粒 i 的转动惯量; $\vec{F}_{ij}^n$ 和 $\vec{F}_{ij}^t$ 分别为颗粒间或颗粒与结构间的法向和切向接触力; $\vec{M}_{ij}$ 为力矩。

本研究中, 颗粒间的法向力 F_n 和切向力 F_t 采用 Hertz-Mindlin 无滑移模型进行计算。该模型能准确

描述颗粒接触的非线性力-位移关系及能量耗散, 同时避免了复杂增量算法, 兼顾了物理准确性与大规模 DEM 模拟的计算效率 (Jiang et al., 2018; Zhang and Huang, 2022)。其中, 法向接触力表示如下:

$$F_n = F_n^c + F_n^d = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} v_n^{rel} \quad (3)$$

切向接触力表示如下:

$$F_t = \min\{\mu_s F_n, F_t^c + F_t^d\} = \min\{\mu_s F_n, -S_t \delta_t - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} v_t^{rel}\} \quad (4)$$

式中: E^* 、 R^* 和 m^* 分别为有效杨氏模量、有效半径和有效质量; δ_n 和 δ_t 分别为法向和切向重叠量; v_n^{rel} 和 v_t^{rel} 是相对速度的对应分量; μ_s 为静摩擦系数; S_n 和 S_t 分别为法向和切向刚度, 并且可由下式计算而得:

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (5)$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (6)$$

式中： G^* 为有效剪切模量。

β 为阻尼系数，由下式给出：

$$\beta = \frac{-\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (7)$$

式中： e 为恢复系数，定义为碰撞后和碰撞前沿接触面法线方向速度分量的比值。

2.2 模拟模型与模拟参数

(1) 模拟模型

本研究的 DEM 模型如图 2 所示，由水槽基底、触发闸门、两个侧壁、缝隙坝和下游承灾体组成，

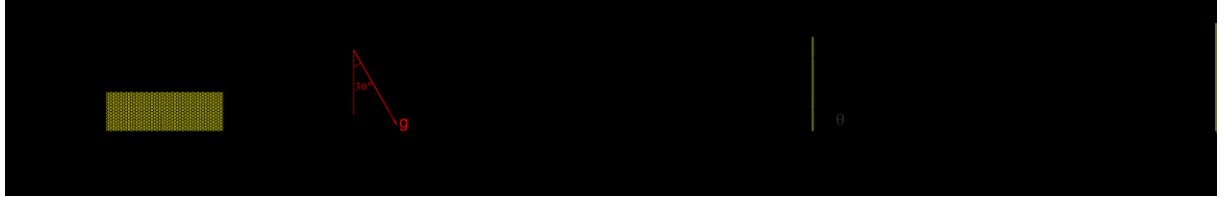


图 2 DEM 模型图

Fig. 2 Model setup of DEM

(2) 模拟参数

为了确保离散元模型能够准确再现降雨型滑坡流滑冲击缝隙坝的动力学过程，对比小尺度水槽试验和数值模拟中冲击力的时程曲线，对本研究中的 DEM 模型进行标定，所采用的试验数据来源于前人所开展的干颗粒流冲击刚性坝试验（Jiang and Towhata, 2013）。在标定中，水槽坡度为 40° ，坝体采用垂直闭口坝，颗粒为直径 0.01m 的单分散球形。标定流程如下：首先，参考已有研究初步选取计算参数（Jiang et al., 2018；Huang et al., 2021）；其次，以法向冲击力时程曲线为目标响应，通过反复试错调整接触参数；最后，将数值模拟结果与试验结果进行对比，通过比较峰值到达时间及峰值数值大小定量评估标定效果。最终的标定结果如图 3

水槽长、宽和高分别为 4.43 米、0.3 米和 0.35 米，可调节角度的缝隙坝设置在 2.93 米处。在模拟中，采用自由堆积方法生成初始颗粒，颗粒直径为 0.01m，颗粒数为 20409，密度 2550kg/m^3 ，总质量约为 27.25kg ，颗粒初始的堆积尺寸为 $0.44\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.15\text{m}$ ，容重为 13.8kN/m^3 。承灾体垂直设置在下游 4.43 米处，其材料属性与缝隙坝保持一致。需要指出的是，本文模型中水槽下游末端为开放边界，承灾体作为独立受力监测单元直接放置于末端。

所示，从图中可以看出，数值数据和试验数据总体上吻合较好，尤其是表现在冲击力的变化趋势及峰值，峰值冲击力到达时刻基本一致，峰值相对误差为 8%。上述结果表明所选用的参数能够合理反映颗粒与结构之间的相互作用。经标定，本研究采用的 DEM 模型的材料属性和接触参数总结于表 1。

表 1 DEM 输入参数

Table 1 DEM Input Parameters			
材料参数	大小	材料参数	大小
颗粒直径 d (mm)	10	恢复系数 e_c	0.6
颗粒密度 ρ_s (kg/m^3)	2550	颗粒摩擦系数 μ_s	1.33
颗粒杨氏模量 E_s (MPa)	100	槽底摩擦系数 μ_{of}	0.466
颗粒泊松比 ν_s	0.25	槽壁摩擦系数 μ_{os}	0.268
坝/水槽密度 ρ_0 (kg/m^3)	7900	坝摩擦系数 μ_{ob}	0.384

坝/水槽杨氏模量 E_0 (GPa)	200	颗粒滚动摩擦系数 μ_{rs}	0.06
坝/水槽泊松比 ν_0	0.3	槽底/坝滚动摩擦系数 μ_{r0}	0.01

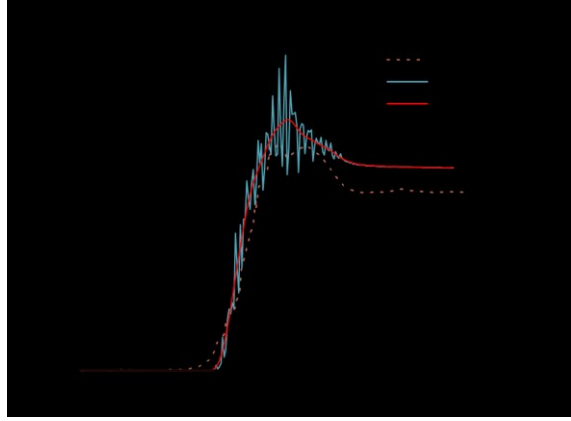


图 3 试验和数值的法向冲击力时程曲线

Fig. 3 Evolution of normal impact force in the experiment and numerical simulation

2.3 试验方案

为了系统地研究坝体角度对降雨型滑坡冲击特性的影响，在保持缝隙坝的厚度、缝隙数量不变的情况下，通过改变坝体角度、相对缝隙开口进行数值试验。其中，坝体角度指缝隙坝与下游水槽基底的夹角，用 θ 表示；相对缝隙开口指缝隙开口宽

度 b 与颗粒直径 d 的比值，用 s 表示，即 $s=b/d$ 。此外，为了获取流动过程中流速、流深等特征，在坝前设置长度为 5 倍颗粒直径的监测区用于计算颗粒的冲击特征（Goodwin, 2019）。坝体角度 θ 、相对缝隙开口 s 和监测区见图 4 所示。本研究中，坝体角度 θ 设置为 0° (180°)、 30° 、 60° 、 75° 、 90° 、 105° 、 120° 和 150° ，其中 0° (180°) 工况为无坝对照组，仅用于归一化基准，不参与缝隙坝对比。本文着重分析 $60^\circ \sim 120^\circ$ 这 5 种在现实中常见的坝体角度， 30° 和 150° 两种角度由于罕见，仅用于缝隙坝拦截率和承灾体受力的平衡关系分析。每种有坝工况设 $s3$ 、 $s4$ 和 $s5$ 三种相对缝隙开口，共 21 组；加 1 组无坝对照，总计 22 组。同时，为考察接触参数对模拟结果的敏感性，本研究在上述 22 组工况之外，选取 $s3$ 缝隙开口，在坝体角度 60° 和 90° 下，分别对颗粒摩擦系数（1.1）、恢复系数（0.5）及滚动摩擦系数（0.07）进行敏感性分析。为尽可能减小模拟中出现的偶然误差，每组工况模拟三次并取平均值。

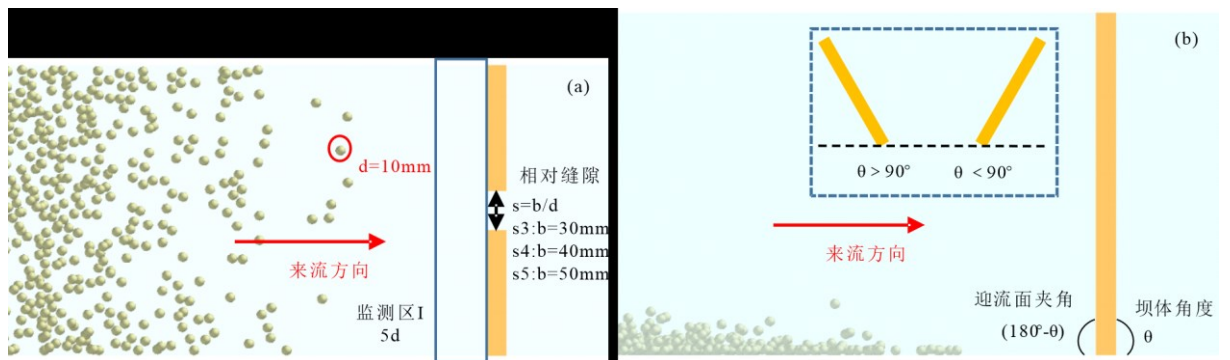


图 4 缝隙坝模型图。a: 俯视图；b: 侧视图

Fig. 4 Model setup of the slit dam. a: Top view; b: Side view

3 数值模拟结果与分析

3.1 降雨型滑坡流滑冲击缝隙坝的过程分析

图 5 展示了不同坝体角度下, 颗粒在 0.93s, 1.25s, 1.75s, 2.25s 和完全静止时的流动 (堆积) 特征。从图中可以看出, $t=0.93\text{s}$ 时, 滑坡碎屑以约为 3.5m/s 的前缘速度到达坝前, 随后开始冲击坝体, 前缘高速碎屑颗粒与坝体撞击并向后方反弹。在后方持续来流作用下, 坝体角度 60° 和 75° 下碎屑颗粒沿坝体斜面发生顺坡爬升。 $t=1.25\text{s}$ 时, 60° 工况下后续来流与坝体碰撞反弹仍较为激烈, 相比之下, 90° 、 105° 和 120° 工况已经开始形成“死区” (图中蓝色颗粒部分, 其中蓝色代表颗粒速度低于 0.12m/s)。通过对比图 5 (a2~e2) 中蓝色颗粒的分布范围与密集程度可见: 随着坝体角度增大, 同一时刻下蓝色颗粒覆盖的区域更大、颜色更密, 表明

“死区”形成的速率随之加快。例如, $t=1.25\text{s}$ 时, 90° 工况下蓝色颗粒仅零星分布于坝脚, 而 120° 工况下已扩至坝前较大范围。这是因为当坝体角度较小时, 碎屑颗粒可以沿着斜面继续爬升, 减小了与后续碎屑颗粒的碰撞摩擦, 从而使动能的损耗较低, 但对于 90° 以上的坝体, 碎屑颗粒与其作用后不再向上爬升, 转而向后或向下运动, 导致碎屑颗粒间、颗粒与坝体间的接触摩擦急剧增加, 动能损耗极为强烈, 加速“死区”的形成。受“死区”的影响, 在 $t=1.75\text{s}$ 和 $t=2.25\text{s}$ 时, 后续的来流的速度逐渐减小, 最终停止运动后堆积在坝前。值得注意的是, 同一时刻下, 图 (a3)~(e3) 和 (a4)~(e4) 中较低坝体角度的碎屑颗粒流量要大于较高坝体角度, 这是因为坝体角度较低时, 碎屑颗粒更容易爬升并通过缝隙坝。

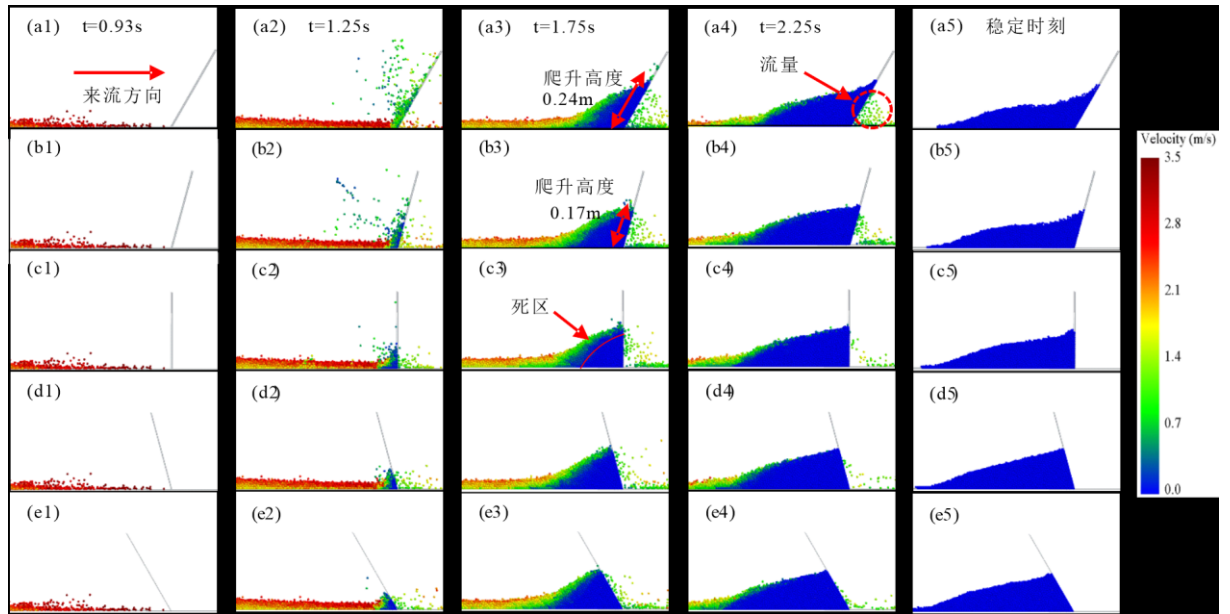


图 5 颗粒冲击缝隙坝的过程。a~e 分别代表坝体角度 60° 、 75° 、 90° 、 105° 和 120° 。

Fig. 5 The impact process of particles on slit dam. a~e represent dam angles of 60° , 75° , 90° , 105° and 120° , respectively.

3.2 坝体角度对降雨型滑坡冲击力的影响

(1) 坝体角度对法向冲击力的影响

滑坡碎屑对坝体结构的法向冲击力是造成结构破坏最主要的因素。本小节以相对缝隙开口 s_3 为

例，对坝体结构进行受力分析，不同相对缝隙开口下作用于坝体结构的法向冲击力的时程曲线见图 6。从图中可以看出，不同坝体角度的工况几乎在同一时刻达到冲击力峰值，随后开始下降。坝体角度 $60^\circ \sim 75^\circ$ 时，坝体所受法向冲击力略微减小，但超过 75° 后，法向冲击力开始呈现明显的上升趋势，尤其是在 120° 情况下，增加最明显，上述结果与前人对碎屑流冲击重力坝的研究中取得的结果一致（Shen et al., 2018; 潘青 等，2020），表明本文模拟结果的准确性。进一步考虑不同相对缝隙开口下，法向冲击力峰值随坝体角度变化（图 7）。从图中可以看出，不同相对缝隙开口坝体所受的最大法向冲击力均呈现先减后增的趋势，并且坝体角度约为 75° 时出现最小值。结合前文中碎屑颗粒流动过程的分析，这一现象可归因于静压力的差异。在图 5（a3-b3）中，碎屑颗粒在坝体角度 60° 时沿坝面的爬升高度为 0.24m ，而在 75° 时的爬升高度为 0.17m ，在此情况下，坝体角度 60° 施加给坝体的静压力更大。在坝体角度 $75^\circ \sim 120^\circ$ ，法向冲击力峰值随坝体角度增大而增长的原因可以从动量法向分量、冲击波强度和离心加速度三个方面来解释，即随着坝体角度增大，碎屑颗粒冲击动量的法向占比越高，瞬时传递的动量越多；冲击产生的压缩冲击波越强，瞬时应力越集中；颗粒转向的曲率半径越小，离心加速度越大，法向应力越大（Chu et al., 1995; Mancarella and Hungr, 2010）。此外，相较于坝体角度 90° 时， 120° 时冲击力显著提高，此时对坝体的破坏性远高于垂直情况，这表明现有实际工程中最大冲击力的计算值偏低（Kwan, 2012），在这种情况下所设计

的坝体偏不安全（详细讨论见 4.2 节）。

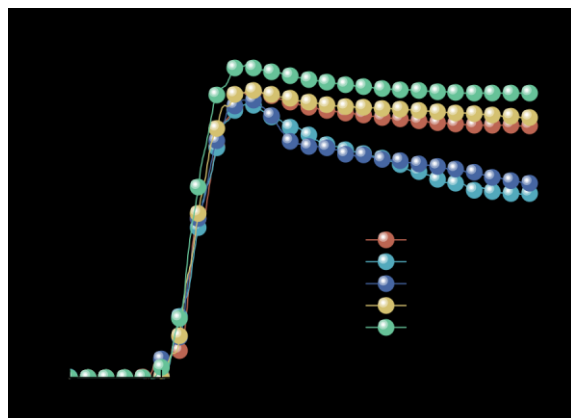


图 6 法向力时程曲线图

Fig. 6 Time series of normal impact force

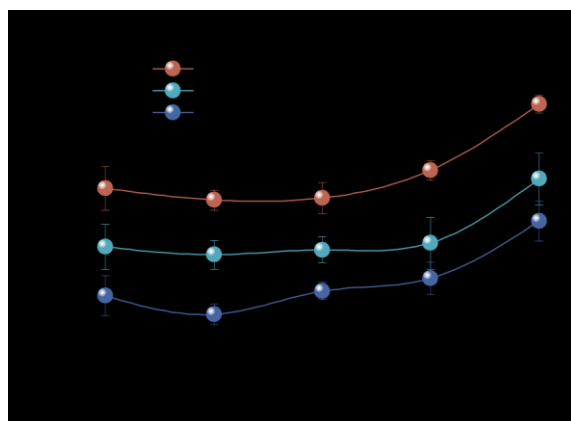


图 7 法向冲击力峰值随坝体角度变化图

Fig. 7 The variation of the peak value of the normal impact force with dam angles

（2）坝体角度对切向冲击力的影响

同样选取 s3 为例对坝体所受切向力进行分析，不同坝体角度下坝体所受切向力随时间的变化如图 8 所示（图中正号代表沿坝体斜面向上）。从图中可以看出，随着坝体角度从 60° 逐渐增加到 120° ，切向力逐渐减小。当坝体角度为 90° 时，切向力短暂上升后迅速下降，保持在 0N 左右；当坝体角度继续增大至 105° 和 120° 时，切向力时程曲线整体转为负值，且绝对值随坝体角度增大而增大，这是由于坝体角度大于 90° 后，碎屑颗粒与坝体作用更

倾向于沿斜面向下运动。进一步分析不同相对缝隙开口下正方向的最大切向力随坝体角度的变化（图 9）。可以看出，最大切向冲击力受坝体角度影响显著，呈现出随坝体角度增大而减小的规律，而受相对缝隙开口的影响较小。值得注意的是：坝体角度 60°~90°时，最大切向冲击力下降显著，表明在此条件下切向冲击力对坝体角度的敏感性强；相反，坝体角度 90°~120°时，最大切向冲击力下降速率明显变缓，并逐渐趋于 0N。这一结果暗示了当坝体角度大于 90°后，碎颗粒撞击坝后，不再继续向上爬升。

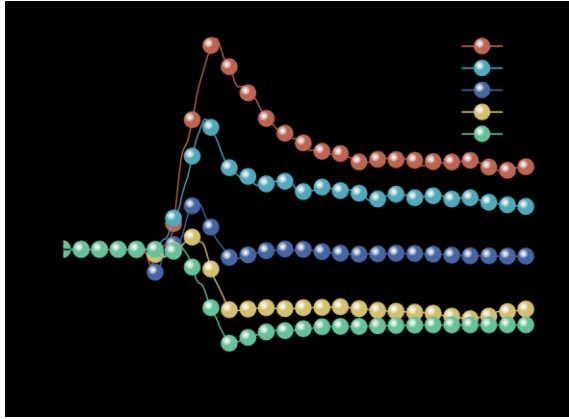


图 8 切向力时程曲线图

Fig. 8 Time series of tangential force

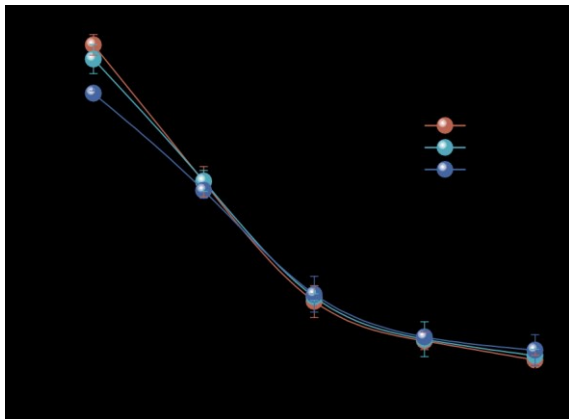


图 9 切向冲击力峰值随坝体角度变化图

Fig. 9 The variation of the peak value of tangential impact force with dam angles

（3）坝体角度对动力冲击系数的影响

为了进一步分析坝体角度对降雨型滑坡的冲击特性的影响，采用坝体所受最大法向冲击力($F_{\max}$)来反算动力冲击系数 α ，具体计算公式为：

$$\alpha = \frac{F_{\max}}{\rho v^2 h w \sin(180^\circ - \theta)} \quad (8)$$

式中： ρ 为流体密度 (kg/m^3)； v 为流速 (m/s)； h 为流动深度 (m)； w 为坝体宽度 (m)， θ 为坝体角度 ($^\circ$)。

不同相对缝隙开口下采用坝体所受最大法向冲击力反算的动力冲击系数 α 与坝体角度的关系如图 10 所示。整体来看，动力冲击系数受坝体角度的影响显著，呈现先减后增的趋势。在坝体角度 60°~90°，不同相对缝隙开口下动力冲击系数逐渐减小，但减小的速率逐渐变缓；在坝体角度 90°~120°，动力冲击系数开始快速增长，且增长的速率逐渐增大。相较于坝体角度 90°而言，120°工况下动力冲击系数均提高了约 20%，这一结果同样暗示了当前坝体的设计偏不安全。进一步分析同一坝体角度下动力冲击系数随相对缝隙开口的变化发现，随着相对缝隙开口增大，动力冲击系数呈现减小的趋势，这一结果与 Hu 等（2020）在研究泥石流对梳子坝的冲击荷载特征中所得的结论一致。此外，从图中还能看出，尽管动力冲击系数随相对缝隙开口的增大而减小，但减小的幅度同样受到坝体角度的影响，具体表现为：坝体角度 60°和 75°时，冲击系数从相对缝隙开口 s3 到 s5 的下降幅度趋于一致；坝体角度 90°~120°时，冲击系数在相对缝隙开口 s5 的下降幅度显著小于 s4。这一结果表明动力冲击系数受坝体角度和相对缝隙开口的耦

合影响。但其耦合影响的机制超出了本文的讨论范围，需要后续进一步研究。

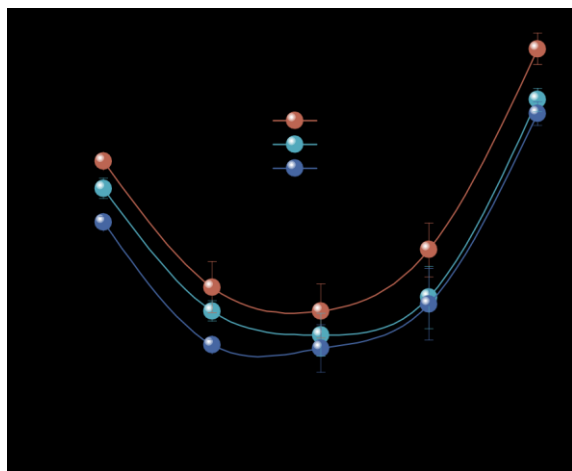


图 10 动力冲击系数 α 与坝体角度的关系

Fig. 10 Relationship between dynamic impact coefficient α and dam angles

3.3 坝体角度对质量流量和拦截率的影响

(1) 坝体角度对质量流量的影响

缝隙坝最重要的功能之一是削弱峰值流量，因此本小节进一步探讨不同相对缝隙开口下坝体角度对降雨型滑坡质量流量的影响。图 11 展示了相对缝隙开口 s_4 时，颗粒透过缝隙坝时质量流量随着时间的变化。从图中能够看出，质量流量达到峰值后均迅速下降，且下降速率差异较小，下降趋势随时间逐渐变缓，直至降为 0。值得注意的是，在同一相对缝隙开口条件下，坝体角度对峰值质量流量的影响极为显著，整体呈现出随坝体角度增大而减小的趋势。例如，坝体角度从 60° 增大至 120° 时，峰值质量流量下降了 50%。

为了进一步分析坝体角度对质量流量的影响，对不同相对缝隙开口下质量流量峰值进行归一化处理（缝隙坝存在时的峰值质量流量与无坝时峰值质量流量的比值）。图 12 展示了不同相对缝隙开

口下的归一化峰值质量流量与坝体角度的关系。图中可以看出归一化质量流量峰值随着坝体角度增大出现明显的减小趋势，对于同一坝体角度，随着缝隙相对开口增大，质量流量峰值呈现增大的趋势。因此，在实际工程坝体设计时，可以综合坝体角度及相对缝隙开口的影响，选择合适的参数，进而控制通过坝体的流量。

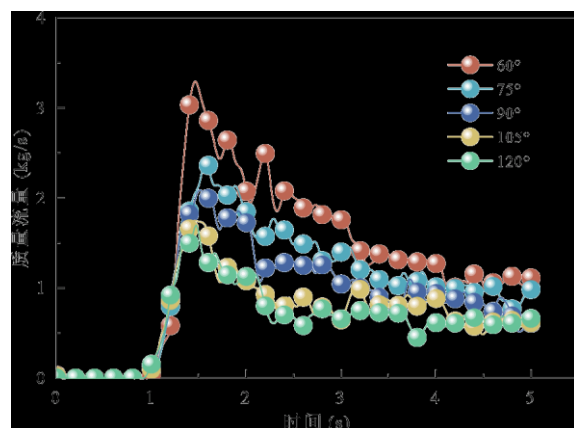


图 11 质量流量时程曲线图

Fig. 11 Time series of mass flow rate

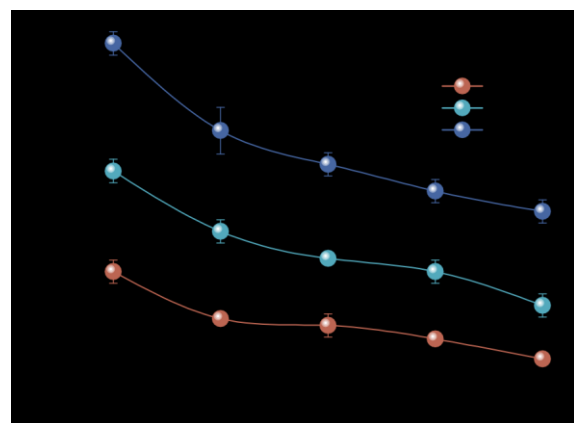


图 12 归一化质量流量与坝体角度关系

Fig. 12 Relationship between normalized mass flow rate and dam angles

(2) 坝体角度对拦截率的影响

拦截率表征了缝隙坝捕获碎屑颗粒的能力，其定义如下：

$$E_G = \frac{M_{trapped}}{M_{total}} \quad (9)$$

式中： $M_{trapped}$ 是缝隙坝拦截的碎屑颗粒的质量， M_{total} 是模拟中碎屑颗粒的总质量。拦截率 E_G 越大，表明该构型的缝隙坝的拦截能力越强， E_G 为1时表示碎屑颗粒被全部拦截。

不同相对缝隙开口下缝隙坝对碎屑颗粒的拦截率随坝体角度的演变如图 13 所示。从曲线趋势看，碎屑颗粒的拦截率受坝体角度的影响显著，整体上呈现随着坝体角度增大而增大的趋势。在坝体角度 60°时，s3 的拦截效率为 0.62，s4 为 0.38，s5 为 0.22，随着坝体角度从 60°逐步增加至 120°时，s3 的拦截效率持续提升并接近 1（近乎完全拦截）且提升 61%，s4 升至 0.73 且提升 92%，s5 提升至 0.33 仅提升 33%。由此可见，在同一坝体角度下，随着相对缝隙开口的增大，拦截率呈现减小的趋势。此外，这一现象也说明相对缝隙开口的增大还会削弱坝体角度对碎屑颗粒拦截率的影响，其原因有两点：其一，较大的开口允许更多颗粒直接通过；其二，即便形成力拱，因跨度较大导致力拱不稳定，在后续来流冲击下，力拱容易破坏（Huang et al., 2023）。

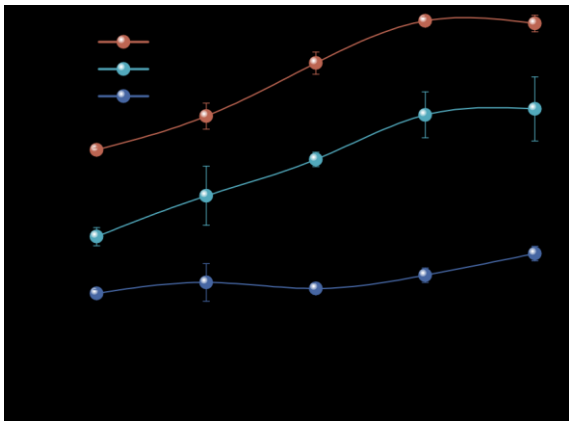


图 13 颗粒拦截率与坝体角度的关系

Fig. 13 Relationship between grain-trapping efficiency and dam angles

衡量缝隙坝性能的优劣除了对比拦截率之外，还需考虑经缝隙坝调控后下游承灾体的受力情况。在设计缝隙结构时，实现拦截率和下游承灾体受力的平衡至关重要：拦截率过高会导致库容迅速淤满，丧失调控功能；而拦截率过低则会削弱缝隙坝的作用，碎屑颗粒直接冲击承灾体，缝隙坝无法达到良好的调控效果（Ng et al., 2015; Gong et al., 2021）。

因此，为了进一步分析不同坝体角度下缝隙坝拦截率和下游承灾体受力之间的平衡关系，本文将下游承灾体归一化受力（承灾体位置见图 2，缝隙坝存在时下游承灾体所受的最大法向冲击力与无坝时下游承灾体所受的最大法向冲击力的比值）与拦截率相对比（图 14）。在此部分，我们对 0°(180°)、30°、150°这几种坝体角度进行分析。从图中可以看出，缝隙坝的拦截率与下游承灾体受力呈现相反的趋势。在有坝情况下，坝体角度 30°时对应的拦截率虽相对偏低，但此时的下游承灾体受力却相较于其它工况而言偏高；90°-150°区间，拦截率继续升高甚至接近 1（近乎全部拦截），此时下游的承灾体的受力虽明显减小，但过高拦截率造成库容淤满，削弱缝隙坝的使用寿命；而在 60°-90°区间，拦截率上升趋势明显，但承灾体受力变化趋势相对平稳。根据上述缝隙坝拦截率与下游承灾体受力的平衡关系，在本文的研究范围内，我们发现坝体角度 60°附近能够较好地兼顾“避免库容过快淤满”与“降低下游冲击风险”，是较优的设计选择。

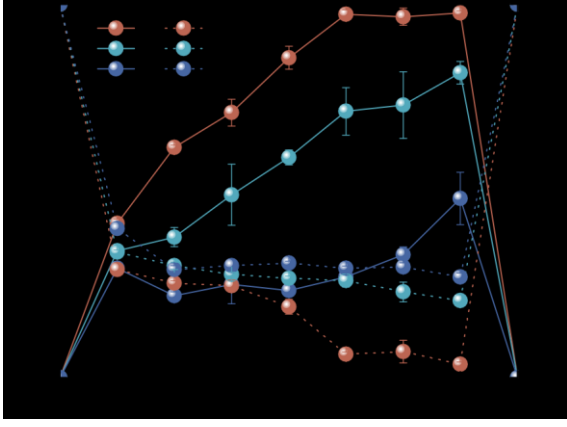


图 14 颗粒拦截率与下游承灾体受力的关系图。实线代表拦截率，虚线代表承灾体归一化受力。

Fig. 14 Relationship between grain-trapping efficiency and the normalized impact force of downstream structure. The solid lines represent the grain-trapping efficiency, while the dashed lines indicate the normalized impact force.

4 讨论

4.1 坝体角度对碎屑冲击的影响机制

为了进一步研究坝体角度对冲击过程的影响机制，采用能量耗散对其机制进行讨论。能量耗散以无坝时碎屑颗粒的动能为基准以计算缝隙坝所带来的额外耗散。按照“平动+转动”计算流滑过程的动能，具体计算公式如下：

$$K = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I_i \omega_i^2 \right) \quad (10)$$

式中： N 为监测区颗粒的数目； I_i 为颗粒的转动惯量。

同时，为了准确量化缝隙坝的耗能能力，定义了如下的耗能效率（Marchelli et al., 2020）：

$$E_k = \frac{\int_{t_0}^t (K_{open} - K_{slit}) dt}{\int_{t_0}^t K_{open} dt} \approx \frac{\sum_{t_0}^t K_{open} - \sum_{t_0}^t K_{slit}}{\sum_{t_0}^t K_{open}} \quad (11)$$

式中： t_0 为第一次冲击的时刻；本研究中， $t_0=0.93s$ ，前 10 个无量纲时间单位对应的 $t=2.82s$ ，为保守起

见并确保积分完整性，本研究取 $t=3s$ ； K_{open} 表示无坝时碎屑颗粒的动能， K_{slit} 表示缝隙坝存在时碎屑颗粒的动能。需要说明的是，无坝工况下的动能 K_{open} 本身已受到水槽及颗粒间摩擦等因素的耗散作用。因此， $K_{open} - K_{slit}$ 所反映的并非系统总耗能，而是增设缝隙坝后所额外引入的耗散能量。 E_k 表征的是缝隙坝结构对碎屑流动能的附加耗散效率。

不同相对缝隙开口下缝隙坝的耗能效率 E_k 随坝体角度的变化如图 15 所示。从图中可以看出，缝隙坝的耗能效率随坝体角度的增大而增长，这是因为坝体角度增加使得颗粒扩散距离减小，颗粒间接触更紧密，使动能快速耗散，该现象与前文中“死区”的变化趋势一致（3.1 小节）。法向冲击力的变化趋势也与能量耗散密切相关：在低角度时，缝隙坝的耗能较低，表现出较低的冲击力；角度增加后，能量耗散随之增加，碎屑颗粒的撞击速度与坝体的夹角也增大，更多动能作用于坝体，使得坝体受力更大。同时，随着能量耗散的加剧，更多的颗粒在坝脚堆积，堵塞效应增强，导致拦截率提升和质量流量降低。

综上所述，坝体角度增加使颗粒扩散距离减小，颗粒之间、颗粒与坝体的接触摩擦增强，加剧了能量的耗散，从而导致更多的颗粒堆积形成“死区”，最终导致了坝体受力增加、质量流量降低和拦截率提高。

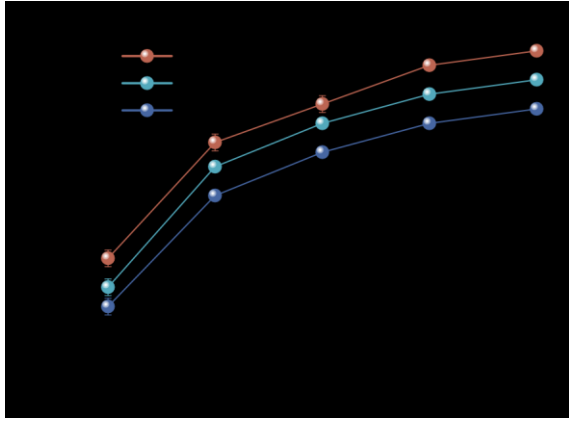


图 15 耗能效率与坝体角度的关系图

Fig. 15 Relationship between energy dissipation efficiency and dam angles

4.2 实际工程中动力冲击系数 α 的取值

前文的分析表明，在本文模拟参数范围内，坝体角度对降雨型滑坡流滑冲击缝隙坝的动力学过程具有显著的影响，最大法向冲击力与动力冲击系数 α 均随坝体角度增大呈先减小后增大的非单调变化趋势。在现有工程实践与理论分析中，动力冲击系数 α 通常基于坝体角度为 90° 的工况进行取值，并据此确定防治工程所需承受的最大冗余冲击力（Cui et al., 2015; Song et al., 2021）。然而，在本文的研究范围 $60^\circ \sim 120^\circ$ 内，动力冲击系数 α 在 90° 附近取得最小值，偏离 90° （无论增大或减小）时，冲击力系数均明显增大（图 10）。这意味着以 90° 工况下获得的动力冲击系数作为设计依据，本质上对应的是冲击响应的“相对最不利点”。在真实工程条件下，受地形约束、坝体构型及施工偏差等因素影响，坝体角度往往难以严格维持在 90° 。因此，一旦坝体角度发生偏移，碎屑颗粒与坝体之间相互作用的动力学机制将发生改变。

综上所述，现行基于 90° 工况确定冲击系数的

设计方法，在一定程度上存在系统性低估冲击效应的问题，可能使结构在极端工况或长期服役中面临失稳与破坏风险。基于本文研究成果，建议工程设计中采用施工偏差角度包络原则，并将 90° 工况对应的冲击系数统一放大 1.3 倍用于冗余承载力计算，以充分覆盖角度偏差带来的冲击增大效应，保障缝隙坝结构安全。

4.3 参数敏感性分析

离散元模拟中，接触参数（如摩擦系数、恢复系数、滚动摩擦系数）对力拱形成及拦截率具有高度敏感性。为检验本文研究范围内，“坝体角度 60° 为最优工况”这一结论的稳健性，本研究选取相对缝隙开口 s3 下 60° 和 90° 两组坝体角度，分别对颗粒摩擦系数（1.1）、恢复系数（0.5）及滚动摩擦系数（0.07）进行敏感性分析。

结果表明，在所有测试工况下，坝体角度 60° 的拦截率均低于 90° ，差值范围为 0.05~0.11。可见，尽管接触系数的改变会影响拦截率的绝对值，但“ 60° 拦截率低于 90° ”的规律在参数扰动下保持不变。因此，本研究关于坝体角度 60° 为最优的结论具有较好的参数稳健性。

4.4 研究的局限性与展望

（1）模型适用性

本文聚焦于滑坡解体后以颗粒碰撞与摩擦为主导的运动阶段，采用干颗粒 DEM 模型进行模拟。对于高含水或高黏性泥流，其结果可能存在偏差。实际降雨型滑坡常伴随较高的含水率，水的作用会显著影响颗粒间的接触行为、孔隙水压力及流动距离（周公旦，2014; Fang et al., 2022）。未来需结

合计算流体力学-离散元法(CFD-DEM)耦合方法,进一步考虑流-固相互作用对坝体冲击特性的影响。

(2) 颗粒级配的影响

本研究为聚焦坝体角度这一核心变量,采用单一粒径颗粒(10mm)的简化模型,排除了级配因素的干扰。然而,实际降雨型滑坡碎屑流具有宽级配特征,粒径分布会显著影响颗粒分离及流态变化(Gray, 2018; Trewhele et al., 2021; Cui et al., 2022)。

在宽级配条件下,细颗粒填充粗颗粒骨架孔隙,一方面提高堆积密实度与内摩擦角,颗粒之间咬合能力增强,形成的力拱更加稳定;另一方面,细颗粒向下迁移使颗粒流中基底的摩擦作用从滑动摩擦转变为滚动摩擦,降低摩擦耗散,改变坝体受力。由于本文重点关注坝体角度的影响,仅采用了单粒径的球形颗粒,在未来的研究中,我们将进一步考虑粒径分布对坝体角度调控缝隙坝的影响,以完善缝隙坝在复杂工况下的设计理论。

5 结论

本文利用离散元方法对降雨型滑坡流滑冲击缝隙坝进行模拟,从冲击过程、冲击力、质量流量、拦截率以及能量耗散几个方面出发,考虑了不同坝体角度及其相对缝隙开口对降雨型滑坡流滑冲击特性的影响,主要取得的结论如下:

(1) 坝体角度会显著影响降雨型滑坡流滑冲击坝体的过程。坝体角度较低时,碎屑颗粒易沿坝体爬升,坝脚“死区”形成的速率随着坝体角度的增大而加快。

(2) 坝体角度会显著影响降雨型滑坡冲击力。最大法向冲击力随坝体角度呈现先减后增的趋势,

坝体角度 120°较 90°时法向冲击力提升约 10%,动力冲击系数 α 提高约 20%,而切向冲击力随坝体角度增大持续减小。

(3) 坝体角度会显著影响缝隙坝的调控作用。在同一相对缝隙开口下,对降雨型滑坡流滑冲击缝隙坝过程中的质量流量、拦截率和能量耗散进行分析,发现拦截率和能量耗散随坝体角度增大而升高,质量流量则随坝体角度增大而降低。

(4) 结合缝隙坝的拦截效率以及下游承灾体受力分析,在本文的研究范围内,坝体角度为 60°时,缝隙坝既能避免库容快速淤满,又能保障下游承灾体的受力较小,此时缝隙坝的综合调控能力最优。

References

- Choi, C.E., Goodwin, G.R., Ng, C.W.W., et al., 2016. Coarse Granular Flow Interaction with Slit Structures [J]. *Géotechnique Letters*, 6(4): 267—274. DOI:10.1680/jgele.16.00103.
- Choi, C.E., Ng, C.W.W., Liu, H.M., et al., 2020. Interaction between Dry Granular Flow and Rigid Barrier with Basal Clearance: Analytical and Physical Modelling [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(2): 236—245. DOI:10.1139/cgj-2018-0622.
- Chu, T., Hill, G., McClung, D.M., et al., 1995. Experiments on Granular Flows to Predict Avalanche Runup [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(2): 285—295. DOI:10.1139/t95-030.
- Cui, P., Zeng, C., Lei, Y., 2015. Experimental Analysis on the Impact Force of Viscous Debris Flow [J]. *Earth Surface*

- Processes and Landforms*, 40(12): 1644—1655.
DOI:10.1002/esp.3744.
- Cui, K.F.E., Zhou, G.G.D., Jing, L., 2022. Particle Segregation and Diffusion in Fluid-saturated Granular Shear Flows [J]. *Physical Review Fluids*, 7 (1) : 014305. DOI:10.1103/PhysRevFluids.7.014305.
- Fang, J., Wang, L.Z., Hong, Y., et al., 2022. Influence of Solid–fluid Interaction on Impact Dynamics Against Rigid Barrier: CFD–DEM Modelling [J]. *Géotechnique*, 72(5): 391—406. DOI:10.1680/jgeot.19.P.160.
- Fang, K., Tang, H.M., Hu, X.L., et al., 2024. Development and Application of Multi-field Intelligent Monitoring Technology for Landslide Physical Model Test [J/OL]. *Earth Science Frontiers*. (in Chinese with English abstract).
- Gong, S.X., Zhao, T., Zhao, J.D., et al., 2021. Discrete Element Analysis of Dry Granular Flow Impact on Slit Dams [J]. *Landslides*, 18(3): 1143—1152. DOI:10.1007/s10346-020-01531-2.
- Goodwin, G.R., 2019. Unsteady Dry Granular Flow Interaction with Slit-Structures (PhD Thesis). PQDT-Glob.
- Gray, J. M. N. T., 2018. Particle Segregation in Dense Granular Flows [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 50(Volume 50, 2018), 407—433. DOI:10.1146/annurev-fluid-122316-045201.
- He, X.R., Yin, Y.P., Zhao, L.M., et al., 2024. Disintegration and Fragmentation Effect of High Position Rock Landslide Debris Flow Based on Large Scale Physical Model Test [J]. *Earth Science*, 49 (7): 2650-2661. (in Chinese with English abstract).
- Hu, H.S., Zhou, G.G.D., Song, D.R., et al., 2020. Effect of Slit Size on the Impact Load Against Debris-flow Mitigation Dams [J]. *Engineering Geology*, 274: 105764. DOI:10.1016/j.enggeo.2020.105764.
- Huang, Y., Zhang, B., Zhu, C.Q., 2021. Computational Assessment of Baffle Performance Against Rapid Granular Flows [J]. *Landslides*, 18(1): 485—501. DOI:10.1007/s10346-020-01511-6.
- Huang, Y., Bi, Y.D., Zhang, B., 2023. DEM Investigation of the Interaction between Rapid Dry Granular Flow and Dual-slit Structures [J]. *Engineering Geology*, 313: 106957. DOI:10.1016/j.enggeo.2022.106957.
- Jiang, Y.J., Towhata, I., 2013. Experimental Study of Dry Granular Flow and Impact Behavior Against a Rigid Retaining Wall [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(4): 713—729. DOI:10.1007/s00603-012-0293-3.
- Jiang, Y.J., Fan, X.Y., Li, T.H., et al., 2018. Influence of Particle-Size Segregation on the Impact of Dry Granular Flow [J]. *Powder Technology*, 340: 39—51. DOI:10.1016/j.powtec.2018.09.014.
- Kwan, J.S.H., 2012. Supplementary Technical Guidance on Design of Rigid Debris-resisting Barriers. Technical Note No.TN 2/2012. Geotech. Eng. Off (Civil Engineering and Development Department, The HKSAR Government).
- Li, B., Gao, Y., Zhuang, Y., et al., 2025. Characteristics and Cascading Effects of the Blatten Avalanche in the Swiss Alps [J]. *Earth Science*, 50(12):4950-4969. (in Chinese with English abstract).
- Li, N.J., Zhou, G.G.D., Cui, K.F.E., et al., 2025. The Influence

- of the Slit Size and Spacing on the Impact Dynamics of Dry Granular Flows on Slit Dams [J]. *Géotechnique*: 1—13. DOI:10.1680/jgeot.24.00053.
- Mancarella, D., Hungr, O., 2010. Analysis of Run-up of Granular Avalanches Against Steep, Adverse Slopes and Protective Barriers [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(8): 827—841. DOI:10.1139/T09-143.
- Marchelli, M., Leonardi, A., Pirulli, M., et al., 2020. On the Efficiency of Slit-check Dams in Retaining Granular Flows [J]. *Géotechnique*, 70(3): 226—237. DOI:10.1680/jgeot.18.P.044.
- Ng, C.W.W., Choi, C.E., Song, D.R., et al., 2015. Physical Modeling of Baffles Influence on Landslide Debris Mobility [J]. *Landslides*, 12(1): 1—18. DOI:10.1007/s10346-014-0476-y.
- Pan, Q., Zhang, Q.Z., Li, Y.L., 2020. Discrete Element Simulation Study of Debris Flow Movement Law and Impact Performance [J]. *Journal of Engineering Geology*, 28(5): 1057-1065. (in Chinese with English abstract).
- Shen, W.G., Zhao, T., Zhao, J.D., et al., 2018. Quantifying the Impact of Dry Debris Flow Against a Rigid Barrier by DEM Analyses [J]. *Engineering Geology*, 241: 86—96. DOI:10.1016/j.enggeo.2018.05.011.
- Song, D.R., Zhou, G.G.D., Chen, X.Q., et al., 2021. General Equations for Landslide-debris Impact and Their Application to Debris-flow Flexible Barrier [J]. *Engineering Geology*, 288: 106154. DOI:10.1016/j.enggeo.2021.106154.
- Trewhela, T., Ancey, C., Gray, J. M. N. T., 2021. An Experimental Scaling Law for Particle-size Segregation in Dense Granular Flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 916, A55. DOI:10.1017/jfm.2021.227.
- Wang, B., Su, L.J., Xiao, S.Y., et al., 2025. Study on the Impact Dynamic Characteristics of Landslide Debris Flow on Permeable Flexible Network [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 45 (1): 71-83. (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B., Huang, Y., 2022. Impact Behavior of Superspeed Granular Flow: Insights from Centrifuge Modeling and DEM Simulation [J]. *Engineering Geology*, 299: 106569. DOI:10.1016/j.enggeo.2022.106569.
- Zhang, S.S., Hu, J.Z., An, J., et al., 2025. Study on the Chain Formation Mechanism and Emergency Monitoring and Early Warning of High-level Landslide-debris Flow Disaster in Junlian, Sichuan [J/OL]. *Journal of Engineering Geology*. (in Chinese with English abstract).
- Zheng, G., Xu, Q., Liu, X.W., et al. 2020. The Jichang Landslide on July 23, 2019 in Shuicheng, Guizhou: Characteristics and Failure Mechanism [J]. *Journal of Engineering Geology*, 28(3): 541-556. (in Chinese with English abstract).
- Zhou, G.D., 2014. Effect of Pore Water Pressure on the Triggering and Mobilization of Landslides [J]. *Chinese Journal of Nature*, 36 (5): 325-335. (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 方堃, 唐辉明, 胡新丽, 等, 2024. 滑坡物理模型试验多场智能监测技术的研发和应用 [J/OL]. 地学前缘.
- 贺旭荣, 殷跃平, 赵立明, 等, 2024. 基于大型物理模型试验的高位岩质滑坡碎屑流解体破碎效应 [J]. 地球科学, 49 (7): 2650—2661.
- 李滨, 高杨, 庄宇, 等, 2025. 瑞士瓦莱州Blatten高位远程崩滑碎屑流成灾特征与级联放大效应 [J]. 地球科学, 50 (12): 4950—4969.

- 潘青, 张清照, 李艺灵, 2020. 基于edem的碎屑流运动规律及冲击性能研究[J]. 工程地质学报, 28(5): 1057—1065.
- 王彬, 苏立君, 肖思友, 等, 2025. 滑坡碎屑流对透过性柔性网的冲击动力特征研究[J]. 防灾减灾工程学报, 45(1): 71—83.
- 张世殊, 胡建忠, 安炯, 等, 2025. 四川筠连高位滑坡-碎屑流灾害链式成因机制及应急监测预警研究[J/OL]. 工程地质学报.
- 郑光, 许强, 刘秀伟, 等, 2020. 2019年7月23日贵州水城县鸡场镇滑坡-碎屑流特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 28(3): 541—556.
- 周公旦, 2014. 孔隙水压力在滑坡泥石流起动和运动中的作用[J]. 自然杂志, 36(5): 325—335.