

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.424>



坝后淤积条件下泥石流冲击拦挡坝动力响应研究

王东坡¹, 廖承兴¹, 瞿华南², 闫帅星¹

1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059
2. 四川省地质环境调查研究中心, 四川成都 610036

摘要: 拦挡坝有效库容和泥石流冲击力是泥石流实体拦挡坝设计的重要指标, 现有实体拦挡坝在泥石流反复冲击作用下淤积甚至填满, 会对坝体调控能力产生重要影响。为此, 基于理论分析和物理模型试验, 开展坝后淤积条件下泥石流冲击实体拦挡坝动力响应研究, 推导坝后淤积条件下泥石流速度衰减率、坝体拦挡率的无量纲计算公式, 并建立考虑空间分布特性的坝后淤积条件下泥石流冲击力计算模型。结果表明: 泥石流速度衰减率和坝体拦挡率与淤积体高度/淤积长度比值和泥石流相对容重呈正相关; 泥石流冲击力静动荷载组合计算模型能较好反映坝后淤积条件下泥石流冲击力的组成和分布特征。上述研究可为泥石流实体拦挡坝工程设计提供理论及技术支持。

关键词: 实体拦挡坝; 坝后淤积; 速度衰减率; 拦挡率; 冲击力; 动力响应; 工程地质。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2024)03-1017-11

收稿日期: 2022-07-14

Study on Dynamic Response of Debris Flow Impact on Check Dam with Sediments

Wang Dongpo¹, Liao Chengxing¹, Qu Huanan², Yan Shuaixing¹

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. Sichuan Geological Environment Survey and Research Center, Chengdu 610036, China

Abstract: Effective reservoir capacity of retaining dam and impact force of debris flow are important indexes for the design of entity check dam of debris flow. Deposits or even fills in the existing entity check dam under repeated impact of debris flows, have great influence on the control ability of dam body. In this paper, based on theoretical analysis and physical model test, dynamic response of debris flow impinging entity check dam under the condition of silting behind dam is studied, dimensionless calculation formulas of velocity attenuation rate and retaining rate of dam body under the condition of silting behind dam are derived, and calculation model of impact force of debris flow under the condition of silting behind dam considering spatial distribution characteristics is established. The results show that the velocity attenuation rate and dam retaining rate of debris flow are positively correlated with the ratio of silt height to silt length and the relative density of debris flow. The combined calculation model of impact force and static and dynamic load of debris flow can better reflect the composition and distribution of impact force of debris flow under the condition of silting behind the dam. This study can provide theoretical and technical support for the design of solid debris flow retaining dam engineering.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 42207232); 四川省交通科技项目 (No. 2021-A-04); 四川省科技计划项目任务书 (No. 2023YFS0444)。

作者简介: 王东坡 (1984-), 男, 博士, 教授, 主要从事地质灾害冲击动力学方面研究。ORCID: 0000-0002-6172-4753. E-mail: wangdongpo@cdut.edu.cn

引用格式: 王东坡, 廖承兴, 瞿华南, 闫帅星, 2024. 坝后淤积条件下泥石流冲击拦挡坝动力响应研究. 地球科学, 49(3): 1017-1027.

Citation: Wang Dongpo, Liao Chengxing, Qu Huanan, Yan Shuaixing, 2024. Study on Dynamic Response of Debris Flow Impact on Check Dam with Sediments. *Earth Science*, 49(3): 1017-1027.

Key words: entity check dam; sediments behind the dam; velocity attenuation rate; blocking rate; impact force; dynamic response; engineering geology.

0 引言

泥石流实体拦挡坝作为调控泥石流的重要防治工程措施,被广泛应用于我国西部山区(柴波等, 2020; 李尧等, 2022). 在实体拦挡坝建设初期,坝体通过拦蓄固体物质从而调控泥石流规模,但随着坝体长期运营,实体拦挡坝在多次、大规模泥石流反复作用下逐渐淤积填满,对后续泥石流的调控能力显著降低(谢涛等, 2017; 周超等, 2023). 目前,关于坝后淤积对实体拦挡坝调控能力和泥石流冲击特性的影响尚不清晰,使管理部门无法快速察觉隐患的存在,导致类似甘肃舟曲特大型泥石流致灾事件发生(胡凯衡等, 2010). 因此开展坝后淤积条件下泥石流冲击拦挡坝动力响应研究具有重要意义.

坝后淤积作为实体拦挡坝调控泥石流的主要拦截特征,影响着坝体剩余调控能力. 近年来,研究者通过考虑泥石流力学特征和沟道形态等因素,建立回淤比降计算公式对坝后淤积形态开展研究(柳金峰和游勇, 2011; Chen *et al.*, 2016),并结合泥石流峰值流量衰减率、平均容重衰减率和坝体拦挡率等指标(Law *et al.*, 2016),探究淤积形态对实体拦挡坝调控能力的影响. 然而目前关于淤积形态的研究多在空库工况下开展,忽略了初始坝后淤积体的渗透变形特性对后续泥石流冲击所形成的最终淤积形态的影响(Zhang *et al.*, 2020; Peng *et al.*, 2021),这将高估实体拦挡坝的调控能力,因此开展考虑初始坝后淤积对坝体调控能力的试验研究具有重要意义.

目前对实体拦挡坝动力响应的研究主要采用物理模型试验和数值模拟方法,对泥石流冲击过程中呈现的“流通-爬升-回流-堆积”运动特征进行深入分析(Ng *et al.*, 2021; 史洪滨等, 2021),并进一步建立泥石流最大冲击力经验模型(Cui *et al.*, 2015; Wendeler *et al.*, 2019). 考虑到经验模型多为单一冲击荷载模型,无法考虑泥石流冲击力的组成,因此国内外学者采用离散元方法开展相关研究,认为泥石流冲击荷载由动荷载和静荷载共同组成(Li and Zhao, 2018; Xiao *et al.*, 2019; 张睿骁等, 2022). 然而受初始坝后淤积的影响,泥石流冲

击力作用位置、分布及大小将会发生变化,如在淤积体覆盖处坝体荷载分布呈现类似静压力分布(Kwan *et al.*, 2019)而非在空库工况下获得的三角形分布(刘兴荣等, 2021). 目前研究多在空库工况下开展,这导致现有冲击力计算模型虽然考虑了泥石流冲击荷载组成,但忽略了初始坝后淤积和泥石流的相互作用对泥石流冲击过程的影响. 同时,开展数值模拟研究需在深入了解初始坝后淤积对拦挡坝动力响应影响的基础上根据物理模型试验对相关参数进行标定,并对泥石流冲击过程进行验证,因此应开展考虑初始坝后淤积对泥石流冲击过程影响的基础试验研究.

综上所述,现阶段综合考虑坝后淤积对实体拦挡坝调控能力和泥石流冲击力变化规律的研究相对较少,本文通过坝后淤积条件下泥石流冲击实体拦挡坝试验,研究坝后淤积形态特征和泥石流相对容重等因素对实体拦挡坝调控能力的影响,基于量纲分析法定量评价其调控能力,并探讨坝后淤积条件下泥石流冲击力分布特征和坝体受力变化规律,进而建立考虑坝后淤积条件下泥石流冲击力计算模型,为实体拦挡坝设计提供科学依据.

1 试验设计

1.1 试验装置

1.1.1 试验系统 泥石流试验模拟系统分为物源区、流通区、泥石流与拦挡坝相互作用区及堆积区 4 个部分,分别由供料池、沟槽、实体拦挡坝模型、堆积平台构成,如图 1 所示. 其中物源区位于沟槽顶部,由长 0.4 m、宽 0.3 m、高 0.9 m 的长方体金属料箱组成. 流通区长 4.2 m、宽 0.3 m、侧壁高 0.4 m,坡度可在 15°~30°调节. 实体拦挡坝模型固定在距水槽末端 0.5 m 处,外形尺寸与试验槽截面尺寸相同,将 4 个压阻式传感器沿坝身中部垂直布置,从坝底至坝顶依次为 1[#]~4[#],便于测量拦挡坝不同位置受泥石流冲击力数值. 沟口安装有长 2.5 m、宽 2.5 m 的堆积平台.

对舟曲和红椿沟流域泥石流防治工程的野外调查表明,实体拦挡坝是调查区应用最为广泛的坝型(陈华勇等, 2016),本次试验目的是研究不同坝

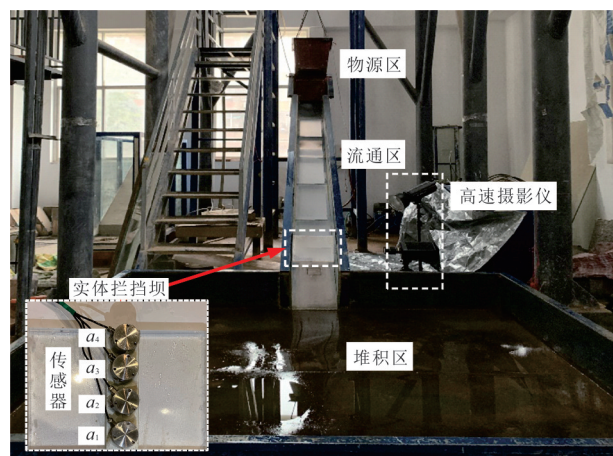


图1 物理模型试验装置

Fig.1 Physical model equipment

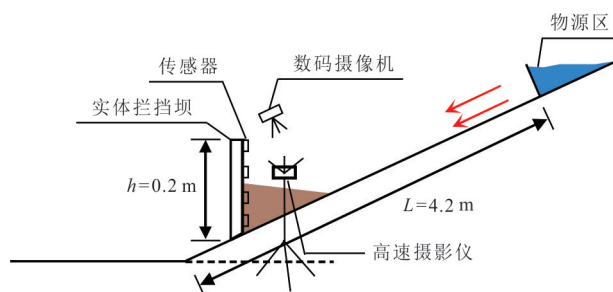


图2 试验设计布局

Fig.2 Layout of test design

后淤积条件对泥石流冲击特征的影响,当存在坝后淤积时,坝体泄水孔将堵塞,形成封闭式实体拦挡坝;因此试验拦挡坝模型忽略泄水孔的影响,设计尺寸为0.3 m(与沟道等宽) \times 0.2 m \times 0.03 m的概化封闭式实体拦挡坝模型.同时假设坝体为刚性体、坝体高度足够高,并且坝体与沟槽固定连接,保证坝体本身在泥石流冲击过程中无位移变化.试验中主要的几何参数如图2所示.

1.1.2 测试系统 测试系统由一台高速摄像机及两台数码摄像机组成,其中高速摄像机安置于拦挡坝右侧,仪器视角与沟槽倾角平行,用于记录泥石流冲击坝体过程,并利用PIV测算各工况下泥石流的流速、流深及淤积体形态;两台数码照摄像机分别安置于水槽正上方和正前方用于捕捉泥石流冲击拦挡坝及翻坝后的运动过程.

1.2 试验材料及设计

试验中泥石流颗粒级配如图3所示,其中颗粒粒径范围在20~30 mm、10~20 mm、5~10 mm、1~5 mm和0.1~1.0 mm的含量分别为19.7%、33.8%、18.8%、22.1%和5.6%,试验泥石流颗粒有效粒径

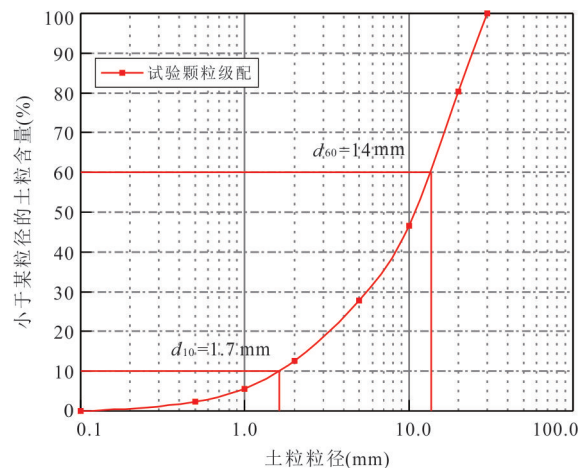


图3 泥石流颗粒级配曲线

Fig.3 Particle size distribution curve

表1 试验控制变量

Table 1 Control variables of experiment

试验组数	坝后淤积程度	泥石流容重 (kN/m ³)	试验沟槽坡度 (°)
1~9	空库	14、16、18	20、23、26
10~18	半库	14、16、18	20、23、26
19~27	满库	14、16、18	20、23、26

$d_{10}=1.7$ mm, 限制粒径 $d_{60}=14$ mm, 不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别为8.2和1.3, 模型试验材料颗粒级配相对良好.采用烘干法测得泥石流颗粒含水量为3%.

试验基于控制变量法,设计如表1所示的试验方案,共计开展27组试验,每组试验重复3次,以坝后淤积程度、泥石流容重和沟槽坡度为变量,获取泥石流流速、流深、堆积体体积和冲击力等相关参数,分析泥石流速度衰减率、坝体拦挡率和泥石流冲击力等指标,研究不同坝后淤积条件下,实体拦挡坝对泥石流的调控能力和泥石流对实体拦挡坝的冲击特征变化规律.本次泥石流冲击实体拦挡坝物理模型试验所获得的弗劳德数 Fr 在3.3到4.9之间,与前人的室内试验所得 $Fr=1.8\sim7.6$ (Choi *et al.*, 2015)相适应,因此本试验所得结果不适用于 $Fr<1$ 的缓流工况.

不同的固体物质质量和含水量对泥石流运动过程影响显著,泥石流容重是描述泥石流中固体物质含量的参数,一定程度上反映了泥石流运动特性.试验采用体积比法确定试验所需泥石流容重.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s f + 1}{f + 1}, \quad (1)$$

其中： γ_d 为泥石流容重； γ_s 为固体物质容重； f 为固体物质和水的体积比。

经计算得，配置 14、16、18 kN/m³ 三种泥石流容重所需加水质量分别为 17.8、12.8、9.1 kg。

2 试验结果与分析

2.1 坝后淤积条件下泥石流冲击拦挡坝运动过程分析

图 4 为泥石流容重为 16 kN/m³、沟槽坡度为 23° 时通过高速摄影仪记录的不同坝后淤积条件下泥石流冲击拦挡坝的运动过程，结果表明：

在空库工况下，泥石流以 3.46 m/s 的速度直接冲击坝体底部，在 1# 处测得最大冲击力，一部分泥石流与坝体碰撞后速度降低至 1.22 m/s 并沿坝体爬升后翻坝向下游运动（图 4a 中红色箭头所示），另一部分泥石流急速降低在坝后发生回淤并形成淤积体，后续泥石流与回淤体相互裹挟（黄色箭头所示），能量在此处大量耗散。该工况

下泥石流运动特征表现为“冲击—爬升—翻坝—回淤”（Hong *et al.*, 2015; Armanini *et al.*, 2020）。

在半库工况下，泥石流首先冲击淤积体，由于淤积体具有一定的可压缩性，淤积体随着泥石流向坝体方向发生挤压流动，淤积坡度由 30° 增大至 63°，形成拱形淤积体（图 4b 中白色虚线所示）。现有研究表明，坝后淤积体在动态荷载传递过程中起着重要作用，同时泥石流通过与淤积体产生摩擦而耗散部分能量（Tiberghien *et al.*, 2007; Ashwood and Hungr, 2016）。本试验中泥石流沿着淤积体表面运动，对淤积体起到较强的剪切摩擦作用（红色箭头所示），从而铲刮部分淤积体共同冲击坝体中部，在 3# 处测得冲击力最大值。

在满库工况下，由于泥石流对坝后淤积体的冲击铲刮裹挟作用，淤积体范围随淤积坡度增大而减小，淤积长度由 0.53 m 逐渐减短至 0.24 m（图 4c 中白色虚线所示）。泥石流在运动过程中与裹挟的淤积体共同作用于坝体 4# 处，冲击过程中无明显的爬升现象，同时泥石流在坝后的淤积表现为在淤积体表

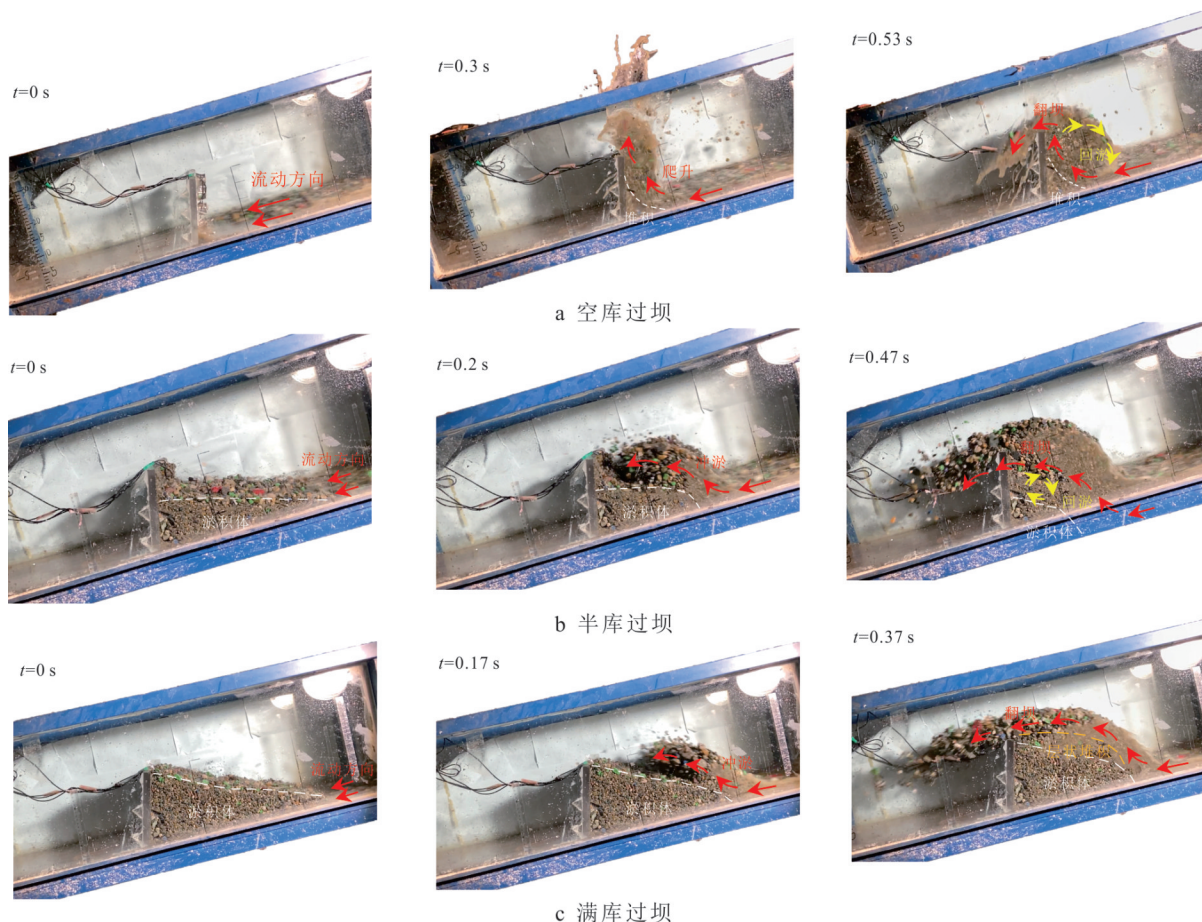


图 4 不同坝后淤积下泥石流冲击拦挡坝过程

Fig.4 Debris flow impact barrier dam under different sediments behind dam

面形成层状堆积(橙色虚线所示),回淤现象不明显.该现象类似于Kwan *et al.* (2015)在泥石流冲击实体拦挡坝数值模拟中观察到的过程,然而其没有对坝体调控性能及冲击载荷减少程度进行量化研究.

综上所述,坝后淤积体对泥石流冲击能量的耗散及冲击方向的改变具有重要影响,因此在分析时需要重点考虑坝后淤积体对坝体调控性能及泥石流冲击力特征的影响.

2.2 坝后淤积对坝体调控能力的影响

2.2.1 坝后淤积对坝体调控能力试验结果分析

泥石流流速及冲出固体物质总量是反映泥石流运动特征和规模的重要指标,本文以坝后淤积程度、泥石流容重和沟槽坡度为变量,泥石流速度衰减率、坝体拦挡率为评价指标,开展在坝后淤积条件下实体拦挡坝对泥石流的调控能力研究.速度衰减率 T_a 及拦挡率 T_b 的表达式如下:

$$T_a = \frac{v_0 - v_1}{v_0} \times 100\%, \quad (2)$$

$$T_b = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\%, \quad (3)$$

其中: T_a 为泥石流速度衰减率(%); T_b 为坝体拦挡率(%); v_0 为泥石流冲击坝体前 10 cm 处的速度(m/s); v_1 为泥石流翻坝后 10 cm 处的速度(m/s); m_0 为初始释放泥石流总质量(kg); m_1 为冲出沟口后淤积体质量(kg).

图 5a 显示了坝后淤积对泥石流速度衰减率的影响.从试验结果可以看出随着坝后淤积体体积的增加,速度衰减率逐渐减小,满库工况相比空库和半库工况下速度衰减率最大降低幅度分别为

54% 和 39%.以沟槽坡度为 23° 的工况为例,当坝后淤积工况分别为空库、半库、满库工况时,泥石流过坝后的速度衰减率分别为 63%~67%、51%~59%、37%~46%.图 5b 为不同坝后淤积对拦挡坝拦挡率的影响.表现为随着坝后淤积体体积增加,拦挡率呈降低趋势,满库工况相比空库和半库工况下坝体拦挡率最大降低幅度分别为 86% 和 55%.以沟槽坡度为 23° 为例进行分析,当坝后淤积工况分别为空库、半库、满库工况时,坝体拦挡率分别为 49%~89%、23%~80%、7%~62%.

该现象表明坝后淤积体体积越多,坝体对泥石流的调控能力越弱.结合泥石流运动过程中的耗能机理研究可知(Faug *et al.*, 2012; Albaba *et al.*, 2018),在空库工况下时,龙头处泥石流冲击能量的耗散以与坝体相互碰撞耗能为主,随后冲击的泥石流先与坝体拦截下来的松散淤积体相互作用将淤积体挤压密实发生碰撞耗能,随后再与坝体相互作用进一步耗能,因此对泥石流表现出较好的调控能力;在满库工况下,淤积体密实程度较高,泥石流通过冲击淤积体耗散的能量较少,随后在泥石流沿着淤积体表面运动直至翻坝的过程中,泥石流的能量耗散以与淤积体摩擦耗能为主,因此坝体的调控能力较差;在半库工况下,泥石流的耗能过程介于二者之间,即泥石流通过冲击坝体及淤积体发生碰撞耗能,同时沿着淤积体表面运动发生摩擦耗能,但由于坝体有效坝高减少,因此泥石流通过直接冲击坝体耗散的能量较空库工况下时减少,坝体的调控能力减弱.值得注意的是在泥石流容重为 18 kN/m³ 时,坝体表现出较高的拦挡率,分析其原因是

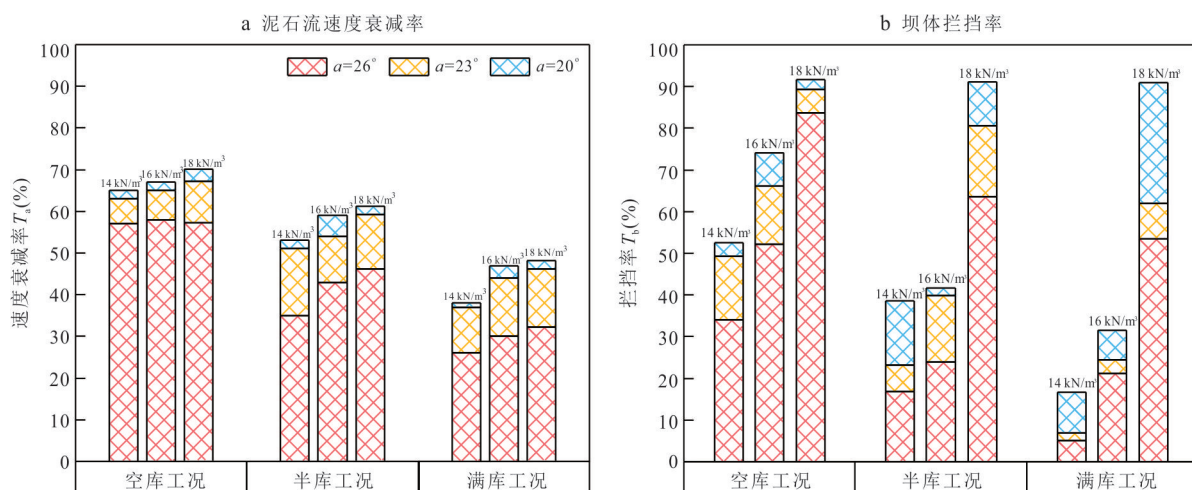


图5 调控能力对比

Fig.5 Comparison of regulation and control ability

由于在高容重条件下泥石流流速较小、冲击动能较低,泥石流冲击能量在发生碰撞及摩擦作用后显著耗散,剩余能量不足以支持泥石流进一步爬升,使其在坝后淤积,表现出较高的拦挡率。

2.2.2 坝后淤积条件下实体拦挡坝调控能力参数无量纲化模型 在坝后淤积条件下实体拦挡坝调控能力受坝前泥石流速度(v_0)、坝前泥石流流深(h_m)、泥石流容重(γ_m)、泥石流固相容重(γ_s)、坝后淤积体长度(l_d)、淤积体高度(h_d)、沟槽坡度(θ)和重力加速度(g)等多因素共同作用。本文在开展泥石流冲击实体拦挡坝调控能力理论计算过程中,对运动过程进行适当简化:(1)泥石流在运动过程中保持释放总体积和含水量不变;(2)泥石流速度在深度方向上均匀连续(即以速度 v_0 代表纵剖面的速度);(3)泥石流流深在同一横剖面上保持恒定。

对泥石流冲击实体拦挡坝运动过程进行分析,可将在坝后淤积条件下拦挡坝调控性能参数 T 看作是与 8 个影响因子(v_0 、 h_m 、 γ_m 、 γ_s 、 l_d 、 h_d 、 θ 、 g)相关的函数:

$$T_{a,b}=f(v_0, h_m, \gamma_m, \gamma_s, l_d, h_d, \theta, g), (4)$$

其中, T_a 为泥石流速度衰减率; T_b 坝体拦挡率。

各影响因子的量纲信息如表 2 所列,基于量纲分析法可知由于 θ 是无量纲量,则在开展无量纲化的过程中可暂时忽略 θ 的影响,所以剩余的 7 个因子包含长度 L 、时间 T 、质量 M 三个基本量($m=3$)。在坝后淤积条件下拦挡坝调控性能 T 的无量纲表达式可描述为:

$$\begin{aligned} T_{a,b} &= \lambda_0 \left(\frac{h_d}{l_d} \right)^{\lambda_1} \left(\frac{h_m}{h_d} \right)^{\lambda_2} \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_s} \right)^{\lambda_3} \left(\frac{v_0}{\sqrt{gh_d}} \right)^{\lambda_4} \times 100\% \\ &= \lambda_0 \left(\frac{h_d}{l_d} \right)^{\lambda_1} \left(\frac{h_m}{h_d} \right)^{\lambda_2} (\gamma')^{\lambda_3} (Fr_1)^{\lambda_4} \end{aligned} \quad (5)$$

其中: λ_0 为无量纲比例系数; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 为各项待定系数; $Fr=v_0/(gh_d)^{1/2}$,为弗劳德数; $\gamma'=\gamma_m/\gamma_s$,为泥石流相对容重; h_d/l_d 为淤积体高度-淤积长度比; h_m/h_d 为泥石流相对高度。

基于式(5),根据物理模型试验各物理参数、泥石流速度衰减率及坝体拦挡率结果,通过多元非线性回归分析建立经验方程,确定速度衰减率下的待定系数: λ_0 、 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 ,待定系数最优解分别为:3.344、0.538、0.741、1.405、-0.549;拦挡率下的待定系数最优解分别为:4.376、0.629、-0.018、8.651、1.671。

表 2 影响因子量纲信息

Table 2 Dimensional information of impact factors

变量	符号	量纲
坝前泥石流流速	v_0	$[L][T]^{-1}$
坝前泥石流流深	h_m	$[L]$
泥石流容重	γ_m	$[M][T]^{-2}[L]^{-2}$
泥石流固相容重	γ_s	$[M][T]^{-2}[L]^{-2}$
淤积体长度	l_d	$[L]$
淤积体高度	h_d	$[L]$
沟道纵坡坡度	θ	1
重力加速度	g	$[L][T]^{-2}$

为此,速度衰减率及拦挡率的无量纲表达式可被分别描述为:

$$T_a = 3.344 \left(\frac{h_d}{l_d} \right)^{0.538} \left(\frac{h_m}{h_d} \right)^{0.741} (\gamma')^{1.405} (Fr_1)^{-0.549} \times 100\%, \quad (6)$$

$$T_b = 4.376 \left(\frac{h_d}{l_d} \right)^{0.629} \left(\frac{h_m}{h_d} \right)^{-0.018} (\gamma')^{8.651} (Fr_1)^{1.671} \times 100\%. \quad (7)$$

2.3 坝后淤积对泥石流冲击力特性的影响

2.3.1 不同坝后淤积条件下泥石流典型冲击力时程曲线

基于实体拦挡坝受冲击荷载不同,将不同坝后淤积条件下泥石流冲击实体拦挡坝的模式分为动态冲击型和准静态堆积型。对于动态冲击型,泥石流直接作用于拦挡坝,如图 6 中空库工况下 1[#]、半库工况下 3[#]、满库工况下 4[#]位置的冲击力时程曲线所示,冲击力在短时间内迅速增大至峰值,随时间的推进,冲击力振荡降低并趋于稳定,泥石流最大冲击力远大于静止后的堆积压力。对于准静态堆积型,泥石流冲击坝后淤积体通过冲击能量的传递间接作用于拦挡坝,如图 6 中满库工况下 1[#]和 2[#]处的冲击力曲线所示,冲击力随时间缓慢增大,并逐渐保持稳定,泥石流最大冲击力与静止后的堆积压力相接近。

2.3.2 泥石流最大冲击力及其空间分布特性 当坝后淤积体体积由空库增加至满库时,泥石流最大冲击力与冲击位置分布如图 7 所示。表现为随着坝后淤积体的增加,泥石流最大冲击力作用位置逐渐由坝体底部过渡至顶部,且最大冲击力随着沟槽坡度及泥石流容重的增大而增大。以泥石流容重为 16 kN/m³、坡度为 23°为例,在空库工况下,在拦挡坝 1[#]处的泥石流冲击力明显大于 2[#]~4[#],其最大冲击力为 34.26 N,坝体在 1[#]处的最大冲击力为 2[#]~4[#]

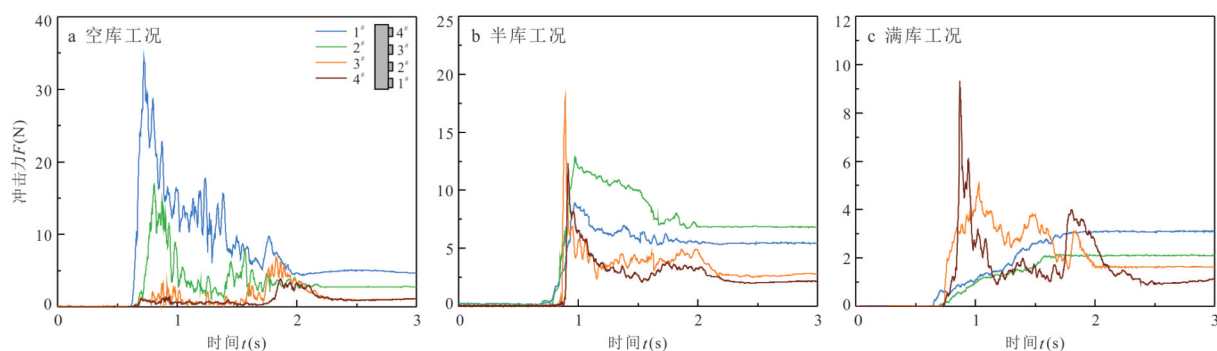


图6 冲击力时程曲线

Fig.6 Time history curves of impact force

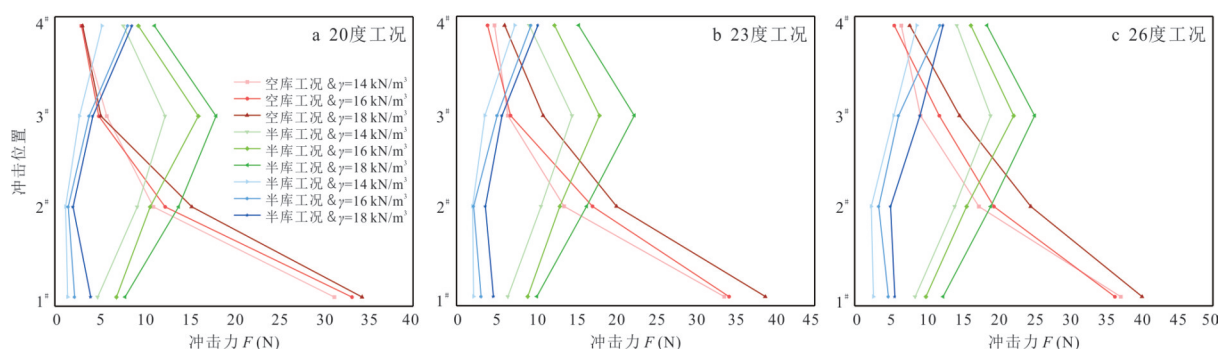


图7 泥石流最大冲击力及分布关系

Fig.7 Maximum impact force and distribution of debris flow

处的2.01倍、5.02倍和8.85倍,泥石流的最大冲击力分布表现为从坝底到坝顶逐渐降低的线性分布;而在半库工况下时,坝体在3[#]处监测到最大冲击力,其值为17.96 N,为1[#]和2[#]处的2.01倍和1.38倍、4[#]处的1.46倍;在满库工况下,在4[#]处的最大冲击力为9.32 N,为1[#]~3[#]处的1.83~4.36倍,表现出非线性分布;同时随着淤积体体积的增加最大冲击力呈现减小趋势,在空库工况下1[#]处的最大冲击力为半库3[#]处的1.91倍和满库4[#]处的3.68倍。

这一现象说明坝后淤积体是影响泥石流冲击特性的重要因素.造成这个现象的原因是:(1)根据泥石流冲击荷载在拦挡坝上的时空分布特征可知(Liu *et al.*, 2019),随着坝后淤积体体积的增加,泥石流和淤积体相互作用的范围增大,当泥石流运动至坝后淤积体表面时,由于坝后淤积体的缓冲和摩擦作用使得泥石流流动方向发生改变,使泥石流在半库工况下直接作用于坝体3[#]处、满库工况下直接冲击坝体4[#]处.同时由于泥石流对坝后淤积体发生冲击和剪切作用,使得坝后淤积体沿冲击方向发生挤压,耗散了泥石流部分能量,使得泥石流对坝体的直接冲击荷载减小;(2)结合

关于冲击荷载沿坝体产生非线性分布情况的分析可知(Jiang and Towhata, 2013),由于坝后淤积体在泥石流冲击和自重作用下发生压缩密实形成土拱,产生土拱效应,引起泥石流运动方向偏转,冲击位置发生改变,泥石流不能直接有效作用于坝体上,同时冲击能量沿着土拱转移至无淤积体堆积的位置上,使坝体在半库工况下3[#]处、满库工况下4[#]处的最大冲击力远大于其他位置,此时淤积体下部坝体主要受淤积体的自重和淤积体传递的部分泥石流冲击力作用,从而造成坝体上冲击力的非线性分布。

2.3.3 泥石流堆积压力 为探究不同坝后淤积条件下泥石流运动过程静止后坝体受到的堆积压力的变化规律,定义堆积压力 F_p 与最大冲击力 F_{max} 之比为 ω (Albaba *et al.*, 2018)。

在不同坝后淤积条件下堆积压力 F_p 变化规律如图8所示.结合泥石流冲击实体拦挡坝最大冲击力及其冲击位置分布特征可知,在空库工况下,泥石流对拦挡坝的最大冲击力远大于堆积压力,坝体1[#]处的堆积压力仅为最大冲击力的13.5%,说明泥石流对拦挡坝的直接冲击作用产生的动荷载是最大冲击荷载的主要组成部分;在半库工况

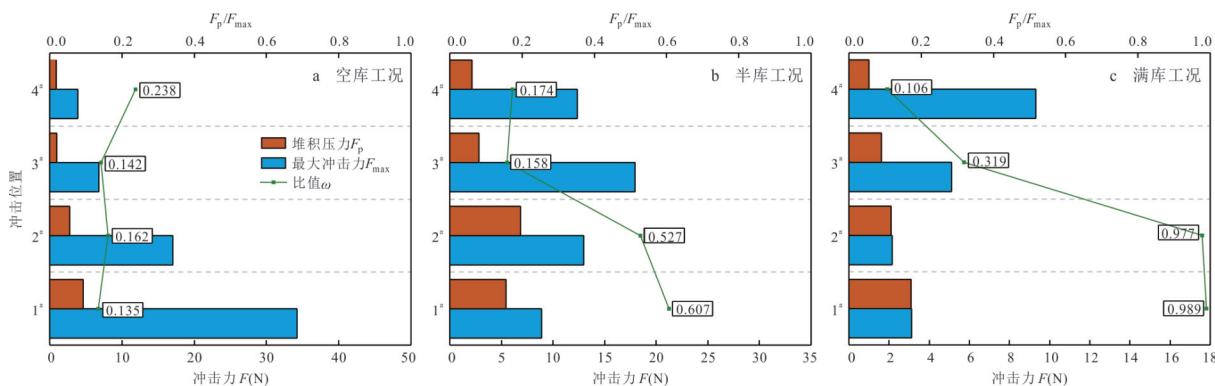


图 8 堆积压力与最大冲击力关系

Fig.8 Relationship between accumulation pressure and maximum impact force

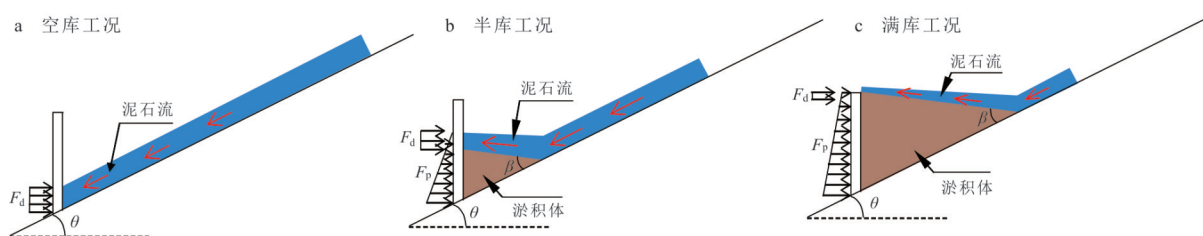


图 9 不同坝后淤积泥石流冲击拦挡坝力学模型

Fig.9 Schematic diagram of debris flow impact check dam with different sediments behind dam

下,在坝体 1[#]和 2[#]处堆积压力与最大冲击力比值分别提高到 52.7% 和 60.7%,表明堆积压力占最大冲击力的比例随淤积体体积的增加而增大,此时最大冲击荷载由泥石流的动荷载和淤积体的静荷载共同组成;在满库工况下,在坝体 1[#]和 2[#]处的堆积压力 F_p 占最大冲击力 F_{max} 的比例达到 98.9% 和 97.7%,说明此时冲击荷载以淤积体的静荷载形式有效地传递到坝体不同位置。

2.3.4 坝后淤积条件下泥石流冲击力模型 由试验分析结果可知在坝后淤积影响下坝体上的冲击力呈现非线性分布特征,结合泥石流冲击荷载组成情况,为简化泥石流冲击过程,做如下假设:(1)在泥石流冲击过程中,泥石流产生的动荷载保持恒定,并存在极限值;(2)在封闭式实体拦挡坝同一横剖面上冲击荷载相同;(3)淤积体保持冲击力峰值时刻的几何形态。

目前泥石流冲击力计算方法主要有动力学方法 (Hung, 2008) 和静力学方法 (Armani et al., 2020),前者是基于流体力学一维连续方程和动量守恒方程推导得出,后者是通过将流体简化为完全反射的均匀流体求解得到。本试验综合考虑冲击过程中坝后淤积体及泥石流对实体拦挡坝产生的静动荷

载组合及分布特征,根据不同坝后淤积条件,针对空库工况,采用动荷载计算模型;对于半库工况,则泥石流与淤积体分别采用动荷载及静动荷载组合计算模型;而针对满库工况,泥石流与淤积体采用静荷载计算模型。泥石流冲击力计算模型如图 9 所示。

假设淤积体在冲击力峰值时刻的几何形态为三角形,泥石流冲击坝体淤积后,将保持冲击碰撞后的速度沿淤积体表面运动,因此简化后的动态荷载 F_d 可表示为:

$$F_d = C \rho_m [v_a \cos(\beta)]^2 A_d \cos(\theta - \beta), \quad (8)$$

其中, ρ_m 为泥石流密度; v_a 为泥石流碰撞后流速; β 为淤积角度; A_d 为冲击面积; $C = aFr^b$ 为动力经验系数, a 和 b 为待定系数,基于试验结果对动力经验系数进行拟合,得到待定系数 a 为 8.634, b 为 -1.128。

代入式(8)得泥石流动荷载的计算公式:

$$F_d = 8.634 Fr^{-1.128} \rho_m [v \cos(\beta)]^2 A_d \cos(\theta - \beta). \quad (9)$$

设泥石流冲击碰撞后流深不发生改变,即 $h_a = h_m$,则静态荷载可表示为:

$$F_p = \frac{1}{2} k (\gamma_m h_a + \gamma_d h_d) A_p \cos \theta, \quad (10)$$

其中, γ_m 为泥石流容重; h_a 为泥石流碰撞后流

深; γ_d 为淤积体容重; h_d 为淤积体高度; A_p 为堆积面积; θ 为沟槽坡度; k 为土压力经验系数。

通过试验发现在满库工况下, 实体拦挡坝受力以淤积体堆积和传递的静态荷载为主, 可采用静力学方法对冲击荷载进行计算。基于量纲分析法, 可将土压力经验系数 k 看作是与 5 个影响因子 (ρ_m 、 ρ_s 、 h_m 、 l_b 、 h_b) 相关的函数, 并建立土压力经验系数 k 的多元非线性回归模型, 土压力经验系数 k 的无量纲表达式可描述为:

$$k = \lambda_0 \left(\frac{h_d}{l_d} \right)^{\lambda_1} \left(\frac{h_a}{h_d} \right)^{\lambda_2} (\rho')^{\lambda_3}, \quad (11)$$

其中: λ_0 为无量纲比例系数; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为各项待定系数; $\rho' = \rho_m / \rho_s$, 为泥石流相对密度。

基于式(11), 根据物理模型试验各物理参数以及土压力经验系数 k 的结果, 通过多元非线性回归分析建立经验方程, 确定土压力经验系数 k 的待定系数 λ_0 、 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 。通过回归分析, 确定待定系数最优解分别为: 7.211、0.702、0.147、2.577。为此, 土压力经验系数 k 的无量纲表达式可描述为:

$$k = 7.211 \left(\frac{h_d}{l_d} \right)^{0.702} \left(\frac{h_a}{h_d} \right)^{0.147} (\rho')^{2.577}. \quad (12)$$

在坝后淤积条件下静态荷载理论计算方法可描述为:

$$F_p = 3.606 \left(\frac{h_d}{l_d} \right)^{0.702} \left(\frac{h_a}{h_d} \right)^{0.147} (\rho')^{2.577} (\gamma_m h_a + \gamma_d h_d) A_p \cos \theta. \quad (13)$$

2.3.5 对比分析 为验证本文所提泥石流冲击力计算方法的合理性与实用性, 选用大尺度泥石流冲击实体拦挡坝试验数据 (Ng *et al.*, 2017) 予以论证。该试验选用泥石流容重为 15.8 kN/m^3 、沟槽坡度 25° 工况开展冲击试验, 本文选取不同坝体高度处 (0.5 m、1.5 m、2.5 m、3.5 m) 泥石流冲击力数据开展验证分析。冲击力试验值与计算值对比如下图 10 所示。

由图 10 可知, 泥石流冲击力计算值与试验结果吻合度较高, 误差最大约为 16.17%, 均在工程允许误差范围内。通过对比发现在空库工况下, 泥石流冲击力计算值与试验值相接近, 而当考虑泥石流与淤积体相互作用时, 冲击力计算值较试验值小, 分析原因是由于试验中流体是氯化锌、甘油与水组成的混合物与本试验中物源组成具有差异, 导致理论值与试验值之间存在偏差; 其次是因为在本次试验中, 沟槽角度以及泥石流容重变

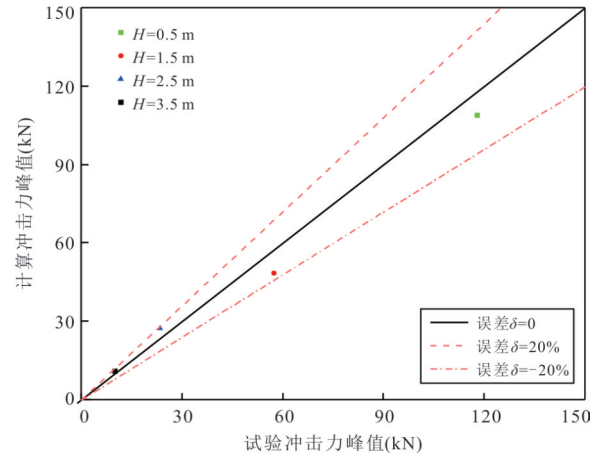


图 10 泥石流冲击力试验值与理论值对比

Fig.10 Comparison between test value and theoretical value of impact force of debris flow

化幅度不大, 导致拟合得到的土压力经验系数 k 存在一定差异, 这需要在以后的工作中不断扩充数据库, 提高土压力经验系数 k 的拟合精度, 进而进一步完善泥石流冲击力计算公式的准确性。

3 结论

基于理论分析及物理模型试验, 开展了坝后淤积条件下泥石流冲击实体拦挡坝动力响应研究, 推导了泥石流速度衰减率、坝体拦挡率的无量纲计算公式, 建立了考虑空间分布特性的不同坝后淤积条件下泥石流冲击力计算模型。得到结论如下:

(1) 泥石流运动过程受淤积体摩擦耗能影响由爬升-回淤发展为在淤积体表面形成层状堆积。在坝后淤积体缓冲耗能作用下, 泥石流冲击特性表现为冲击方向偏转和冲击力减小。

(2) 物理模型试验及量纲分析结果表明, 速度衰减率与淤积体高度-淤积长度比、泥石流相对高度 h_m/h_d 和泥石流相对容重 γ' 呈正相关关系; 坝体拦挡率与淤积体高度-淤积长度比 h_d/l_d 、泥石流相对容重 γ' 、弗劳德数 Fr_1 呈正相关关系, 与泥石流相对高度 h_m/h_d 呈负相关关系。

(3) 泥石流冲击荷载组成及其分布受控于坝后淤积体。随着坝后淤积体的增加, 泥石流对拦挡坝的直接冲击荷载逐渐减小, 淤积体堆积传导的静荷载逐渐增大; 基于此构建的泥石流冲击力静动荷载组合计算模型, 并对比分析文献中大尺度模型试验结果与计算值, 两者计算结果具有较好的一致性。

(4) 综合试验分析结果和实际工程中坝身

较为稳定,从实体拦挡坝安全运营和效益最大化角度考虑,建议坝体淤积量为半库淤积较为合适.考虑到空库和满库工况下坝基和坝肩易发生破坏,可增设缓冲层以提高坝体抗冲击力,同时当坝体淤满时应及时开展清淤工作.

本文的研究结果是在概化封闭式实体拦挡坝和简化平滑沟槽试验条件下获得,并未考虑沟槽动床条件、泥石流和淤积体不同含水量及泄水孔对结果的影响.为拓宽模型适用性,在未来的研究中可采用动力学数值模拟、大型原位试验和实际案例监测相结合的方法进一步改进计算模型.

致谢:感谢匿名审稿专家提供的有益建议!

References

- Albaba, A., Lambert, S., Faug, T., 2018. Dry Granular Avalanche Impact Force on a Rigid Wall: Analytic Shock Solution Versus Discrete Element Simulations. *Physical Review E*, 97(5): 052903. <https://doi.org/10.1103/physreve.97.052903>
- Armanini, A., Rossi, G., Larcher, M., 2020. Dynamic Impact of a Water and Sediments Surge Against a Rigid Wall. *Journal of Hydraulic Research*, 58(2): 314–325. <https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1579113>
- Ashwood, W., Hungr, O., 2016. Estimating Total Resisting Force in Flexible Barrier Impacted by a Granular Avalanche Using Physical and Numerical Modeling. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(10): 1700–1717. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0481>
- Chai, B., Tao, Y. Y., Du, J., et al., 2020. Hazard Assessment of Debris Flow Triggered by Outburst of Jialong Glacial Lake in Nyalam County, Tibet. *Earth Science*, 45(12): 4630–4639 (in Chinese with English abstract)
- Chen, H. Y., Cui, P., Chen, J. G., et al., 2016. Effects of Spillway Types on Debris Flow Trajectory and Scour Behind a Sabo Dam. *Journal of Mountain Science*, 13(2): 203–212. <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3607-6>
- Chen, H. Y., Liu, J. F., Zhao, W. Y., et al., 2016. A Review and Prospect: The Study on the Closed-Type Check Dams. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 36(2): 323–330 (in Chinese with English abstract)
- Choi, C. E., Au-Yeung, S. C. H., Ng, C. W. W., et al., 2015. Flume Investigation of Landslide Granular Debris and Water Runup Mechanisms. *Géotechnique Letters*, 5(1): 28–32. <https://doi.org/10.1680/geolett.14.00080>
- Cui, P., Zeng, C., Lei, Y., 2015. Experimental Analysis on the Impact Force of Viscous Debris Flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(12): 1644–1655. <https://doi.org/10.1002/esp.3744>
- Faug, T., Caccamo, P., Chanut, B., 2012. A Scaling Law for Impact Force of a Granular Avalanche Flowing Past a Wall. *Geophysical Research Letters*, 39(23): L23401. <https://doi.org/10.1029/2012gl054112>
- Hong, Y., Wang, J. P., Li, D. Q., et al., 2015. Statistical and Probabilistic Analyses of Impact Pressure and Discharge of Debris Flow from 139 Events during 1961 and 2000 at Jiangjia Ravine, China. *Engineering Geology*, 187: 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.12.011>
- Hu, K. H., Ge, Y. G., Cui, P., et al., 2010. Preliminary Analysis of Extra-Large-Scale Debris Flow Disaster in Zhouqu County of Gansu Province. *Journal of Mountain Science*, 28(5): 628–634 (in Chinese with English abstract)
- Hungr, O., 2008. Simplified Models of Spreading Flow of Dry Granular Material. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(8): 1156–1168. <https://doi.org/10.1139/t08-059>
- Jiang, Y. J., Towhata, I., 2013. Experimental Study of Dry Granular Flow and Impact Behavior Against a Rigid Retaining Wall. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(4): 713–729. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0293-3>
- Kwan, J. S. H., Koo, R. C. H., Ng, C. W. W., 2015. Landslide Mobility Analysis for Design of Multiple Debris-Resisting Barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(9): 1345–1359. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0152>
- Kwan, J. S. H., Sze, E. H. Y., Lam, C., 2019. Finite Element Analysis for Rockfall and Debris Flow Mitigation Works. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(9): 1225–1250. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0628>
- Law, R. P. H., Choi, C. E., Ng, C. W. W., 2016. Discrete-Element Investigation of Influence of Granular Debris Flow Baffles on Rigid Barrier Impact. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(1): 179–185. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0394>
- Li, X. Y., Zhao, J. D., 2018. A Unified CFD-DEM Approach for Modeling of Debris Flow Impacts on Flexible Barriers. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 42(14): 1643–1670. <https://doi.org/10.1002/nag.2806>
- Li, Y., Cui, Y. F., Li, Z. H., et al., 2022. Evolution of Glacier Debris Flow and Its Monitoring System along Sichuan-Tibet Traffic Corridor. *Earth Science*, 47(6): 1969–1984 (in Chinese with English abstract)

- Liu, D. C., You, Y., Liu, J. F., et al., 2019. Spatial-Temporal Distribution of Debris Flow Impact Pressure on Rigid Barrier. *Journal of Mountain Science*, 16(4): 793—805. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5316-4>
- Liu, J. F., You, Y., 2011. Experimental Study on Back Siltation in the Outlet of Viscous Debris Flow Channel. *Journal of Mountain Science*, 29(2): 226—233 (in Chinese with English abstract)
- Liu, X. R., Wei, X. P., Chen, Y. J., et al., 2021. Numerical Simulation of Impact Resistance of Debris Flow Dam: A Case Study of the Debris Flow Dam in Sanyan Gully, Zhouqu County, Gansu Province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32(2): 78—83 (in Chinese with English abstract)
- Ng, C. W. W., Majeed, U., Choi, C. E., et al., 2021. New Impact Equation Using Barrier Froude Number for the Design of Dual Rigid Barriers Against Debris Flows. *Landslides*, 18(6): 2309—2321. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01631-7>
- Ng, C. W. W., Song, D., Choi, C. E., et al., 2017. Impact Mechanisms of Granular and Viscous Flows on Rigid and Flexible Barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(2): 188—206. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0128>
- Peng, M., Ma, C. Y., Chen, H. X., et al., 2021. Experimental Study on Breaching Mechanisms of Landslide Dams Composed of Different Materials under Surge Waves. *Engineering Geology*, 291: 106242. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106242>
- Shi, H. B., Hu, X. W., Wen, Q., et al., 2021. Debris Flow Development Characteristics and Dynamic Process Numerical Simulation of Xiali 2[#] Gully on the Proposed Sichuan-Tibet Railway. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 32(3): 39—46 (in Chinese with English abstract)
- Tiberghien, D., Laigle, D., Naaim, M., et al., 2007. Experimental Investigations of Interaction between Mudflow and an Obstacle. International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Chengdu.
- Wendeler, C., Volkwein, A., McArdell, B. W., et al., 2019. Load Model for Designing Flexible Steel Barriers for Debris Flow Mitigation. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(6): 893—910. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0157>
- Xiao, S. Y., Su, L. J., Jiang, Y. J., et al., 2019. Estimating the Maximum Impact Force of Dry Granular Flow Based on Pileup Characteristics. *Journal of Mountain Science*, 16(10): 2435—2452. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5428-5>
- Xie, T., Xu, X. L., Chen, H. K., 2017. Review and Trends on Debris Dam Research. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 28(2): 137—145 (in Chinese with English abstract)
- Zhang, F. S., Wang, T., Liu, F., et al., 2020. Modeling of Fluid-Particle Interaction by Coupling the Discrete Element Method with a Dynamic Fluid Mesh: Implications to Suffusion in Gap-Graded Soils. *Computers and Geotechnics*, 124: 103617. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103617>
- Zhang, R. X., Su, D., Fan, X. Y., et al., 2022. Influence of Site Conditions on the Motion and Impact Effect of Rock Avalanches. *Journal of Vibration and Shock*, 41(2): 229—239 (in Chinese with English abstract)
- Zhou, C., Chang, M., Xu, L., et al., 2023. Failure Modes and Dynamic Characteristics of the Landslide Dams in Strong Earthquake Area. *Earth Science*, 48(8): 3115—3126 (in Chinese with English abstract)
- ### 中文参考文献
- 柴波, 陶阳阳, 杜娟, 等, 2020. 西藏聂拉木县嘉龙湖冰湖溃决型泥石流危险性评价. *地球科学*, 45(12): 4630—4639.
- 陈华勇, 柳金峰, 赵万玉, 等, 2016. 非透过性泥石流拦砂坝研究现状及展望. *防灾减灾工程学报*, 36(2): 323—330.
- 胡凯衡, 葛永刚, 崔鹏, 等, 2010. 对甘肃舟曲特大泥石流灾害的初步认识. *山地学报*, 28(5): 628—634.
- 李尧, 崔一飞, 李振洪, 等, 2022. 川藏交通廊道林波段冰川泥石流发育动态演化分析及监测预警方案. *地球科学*, 47(6): 1969—1984.
- 柳金峰, 游勇, 2011. 粘性泥石流沟口回淤实验研究. *山地学报*, 29(2): 226—233.
- 刘兴荣, 魏新平, 陈豫津, 等, 2021. 基于增量加载法的泥石流拦挡坝抗冲击力数值模拟: 以甘肃舟曲三眼峪沟泥石流拦挡坝为例. *中国地质灾害与防治学报*, 32(2): 78—83.
- 史洪滨, 胡卸文, 文强, 等, 2021. 拟建川藏铁路夏里2[#]沟泥石流发育特征及动力学过程数值模拟. *地质灾害与环境保护*, 32(3): 39—46.
- 谢涛, 徐小林, 陈洪凯, 2017. 泥石流拦挡坝研究现状及发展趋势. *中国地质灾害与防治学报*, 28(2): 137—145.
- 张睿骁, 苏栋, 樊晓一, 等, 2022. 场地条件对滑坡-碎屑流运动冲击特征的影响研究. *振动与冲击*, 41(2): 229—239.
- 周超, 常鸣, 徐璐, 等, 2023. 强震区沟道堰塞体失稳模式及其动力学特征. *地球科学*, 48(8): 3115—3126.