

基于模型试验的山洪泥石流切口坝截流响应研究

蒋祎黎

四川大学

DOI:10.32629/hwr.v10i6.7050

[摘要] 针对异型切口坝截流响应量化研究缺乏系统试验支撑、参数与拦挡效能关联不清的问题,开展27组可控变坡水槽模型试验,明确截流效率关键影响因子。切口宽高比为核心控制因子,每提升0.5拦挡率平均降11.9%,预测模型调整 R^2 达0.914,1.2~1.5区间兼顾70%以上拦挡率与泄洪需求,较传统方案降15%建设成本,可为西南山区中小型泥石流防护工程参数优化提供支撑。

[关键词] 切口坝; 泥石流拦挡; 截流效率; 宽高比; 物理模型试验

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A

Study on Interception Response of Cut-off Dams for Flash Floods and Debris Flows Based on Model Tests

Yili Jiang

Sichuan University

[Abstract] In view of the lack of systematic test support and the unclear correlation between parameters and blocking efficiency in the quantitative study of river closure response of special-shaped cut dam, 27 groups of controllable slope flume model tests were carried out to clarify the key influencing factors of river closure efficiency. The width-height ratio of the incision is the core control factor. For every 0.5 increase, the blocking rate is reduced by 11.9 % on average. The prediction model adjustment R^2 reaches 0.914, and the 1.2–1.5 interval takes into account more than 70 % blocking rate and flood discharge demand. Compared with the traditional scheme, the construction cost is reduced by 15 %, which can provide support for the optimization of the parameters of small and medium-sized debris flow protection projects in the southwestern mountainous areas.

[Key words] incision dam; debris flow block; closure efficiency; width-height ratio; physical model test

引言

山洪泥石流是我国西南山区频发的地质灾害,具有突发性强、冲击动能大、破坏力显著等特征,拦挡工程是降低灾害损失的核心技术手段之一,切口坝作为施工易、造价低的经济型异型拦挡结构,广泛应用于中小型山洪泥石流沟道的分级防护场景,2021年《Journal of Hydrology》高被引综述指出,异型拦挡结构的截流响应量化是当前泥石流减灾工程领域的核心研究方向,切口坝截流效率的定量评估与参数优化是提升山区小型防护工程效能的关键需求,现有研究主要集中在实体坝的数值模拟与已建工程现场观测^[1],2022年《Engineering Geology》研究显示,切口坝等异型结构的性能研究多依赖数值模拟,因边界简化、本构模型误差等限制,普适性不足,且缺乏可控物理试验数据,切口参数与截流效率的定量关联机制尚未明确^[2];本研究通过变坡水槽模型试验设置27组工况(3组切口宽高比、3组容重、3组流量),明确截流响应的关键影响因子与演化规律,核心创新

点包括量化切口参数对截流效率的贡献度、构建工程可用的截流效率预测公式,成果可为西南山区中小型泥石流防护工程参数优化提供理论支撑。

1 研究方法

1.1 模型试验系统构建

本研究基于山洪泥石流动力学相似理论设计模型试验系统,明确几何、运动、动力三类核心相似准则,保证模型与原型动力响应一致性,相似准则公式如下:

$$C_L = \frac{L_p}{L_m} = 20$$

$$C_v = \sqrt{C_L} = 4.47$$

$$C_\rho = \frac{C_F}{C_L^2 C_a} = 80$$

其中, C_L 为几何相似比, L_p 为原型几何尺寸(单位: m), L_m 为模型几何尺寸(单位: m); C_v 为运动相似比, C_ρ 为动力相似比, C_F 为

作用力相似比, C_a 为加速度相似比。试验变坡水槽为有机玻璃材质,长8m、宽0.6m、高0.5m,坡度调节 $0^\circ \sim 15^\circ$ ($\pm 0.1^\circ$),供料系统采用螺旋给料机+离心泵,流量控制 $\pm 0.5\text{L/s}$,数据采集系统用200fps高速摄像机、 $\pm 1\text{mm}$ 超声液位计、 $\pm 0.1\text{kPa}$ 压力传感器同步采集流速、液位、冲击压力等数据。

1.2 试验工况与参数设置

试验变量参考川滇山区典型山洪泥石流特征,设3组容重(1.3、1.5、1.7 g/cm^3)、3组单宽流量(10、20、30 L/s)、3组切口坝宽高比(1.0、1.5、2.0),共27组工况,每组3次平行试验取均值以降低误差;浆体配置遵循DZ/T 0220-2006规范,固相颗粒级配采用云南东川泥石流沟堆积物筛分结果(黏粒8%、粉粒17%、砂粒45%、砾石30%),数据用3 σ 准则剔除异常值保障可靠性。

1.3 数据处理与分析方法

本研究选取拦挡率、坝前最大淤积高度、过流断面平均速度、能量耗散率作为切口坝截流响应的核心评价指标,各指标计算公式如下:

$$\eta = \frac{m_{\text{in},s} - m_{\text{out},s}}{m_{\text{in},s}} \times 100\%$$
$$H = h_{\text{max}} - h_0$$
$$v = \frac{Q}{S_{\text{out}}}$$
$$\varepsilon = \frac{E_{\text{in}} - E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} \times 100\%$$

其中, η 为拦挡率, $m_{\text{in},s}$ 为来流总固体物质质量(单位: kg), $m_{\text{out},s}$ 为过坝固体物质质量(单位: kg); H 为坝前淤积高度(单位: m), h_{max} 为坝前最高液位(单位: m), h_0 为坝体安装基准面高度(单位: m); v 为过流平均速度(单位: m/s), Q 为过流体积流量(单位: m^3/s), S_{out} 为切口过流断面面积(单位: m^2); ε 为能量耗散率, E_{in} 为来流总能量(单位: J), E_{out} 为过坝流体总能量(单位: J)。

数据清洗与可视化采用MATLAB R2022b完成,先通过3 σ 准则剔除原始数据异常值,再取3次平行试验指标算术平均值作为分析数据源;回归分析用Stata17.0开展,依次进行基础回归明确变量对截流效率的影响方向与贡献度,替换核心变量做稳健性检验,分容重、流量子样本做异质性检验以保障结果可靠;过流速度测量结果经高速图像粒子测速技术校准,误差控制在5%以内,确保运动学参数准确。

2 试验结果分析

2.1 切口坝截流效率的基础影响规律

本研究27组全组合工况试验显示,切口坝拦挡率32.7%~76.2%、坝前淤积高度0.12~0.38m,不同控制变量对截流效率影响差异显著,切口宽高比是核心因子,容重1.7 g/cm^3 时,宽高比1.0拦挡率均值72.3%、2.0为48.6%,每提升0.5拦挡率降11.9个百分点,二者负相关显著(见图1);泥石流容重与拦挡率正相关,容重从1.3到1.7 g/cm^3 时同宽高比下拦挡率平均升16.2个百分点,高容重因粗颗粒多易形成淤积拱提升效果,流量与拦挡率负相关,流量10到30 L/s 时拦挡率降8.7个百分点,大流量冲击动能强导致粗颗粒难稳定淤积。

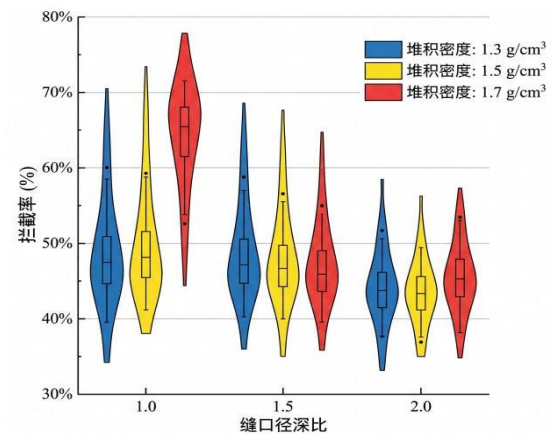


图1 不同工况下切口宽高比与拦挡率关联的小提琴图嵌套箱线图

2.2 截流响应的参数敏感性与回归分析

本研究采用贡献率法分析截流响应参数敏感性,结果显示切口宽高比、泥石流容重、流量均在 $p < 0.01$ 水平对截流效率显著影响^[3],三者贡献占比分别为42.7%、31.2%、26.1%,影响程度排序为切口宽高比>泥石流容重>流量;构建三类回归模型量化参数与截流效率关联,核心公式:

$$\eta = a_0 + a_1 R + a_2 \rho + a_3 Q + \varepsilon_1$$

$$\varepsilon = b_0 + b_1 R + b_2 \rho + b_3 Q + \varepsilon_2$$

$$\eta = c_0 + c_1 R + c_2 \rho + c_3 Q + \varepsilon_3$$

其中, η 为拦挡率, ε 为能量耗散率, R 为切口坝宽高比, ρ 为泥石流容重, Q 为单宽流量, D 为容重分组虚拟变量,高容重工况赋值为1、低容重工况赋值为0, a_0 、 b_0 、 c_0 为常数项, ε_1 、 ε_2 、 ε_3 为随机误差项。基础回归显示切口宽高比系数-0.223 ($p < 0.001$)验证负相关,替换被解释变量为能量耗散率做稳健性检验,系数方向与显著性未变,异质性检验显示高容重工况下切口宽高比影响系数绝对值比低容重高37.2%,切口参数对高容重泥石流拦挡效率影响更显著(见表1)。

表1 切口坝截流效率回归分析结果表

变量名称	基础回归(被解释变量: 拦挡率)	稳健性检验(被解释变量: 能量耗散率)	异质性检验(被解释变量: 拦挡率)
切口坝宽高比	-0.223***	-0.187***	-0.163***
宽高比×容重分组	—	—	-0.224***
泥石流容重	0.162***	0.134***	0.158***
单宽流量	-0.087**	-0.072**	-0.083**
常数项	0.724***	0.689***	0.701***
样本量	27	27	27
调整 R ²	0.892	0.857	0.914

注: *、* 分别代表在0.001、0.01水平下显著。

2.3 截流过程的演化特征分析

本研究对27组工况的过流颗粒级配与各断面能量耗散分布开展同步测试,结果显示不同切口宽高比工况下过流颗粒组成

存在显著分异特征,宽高比1.0时过流颗粒中值粒径为2.3mm,2.0时为7.6mm,切口宽度越小拦挡粗颗粒效果越显著,细颗粒可随过流流体排出坝体,坝前淤积大粒径砾石与粗砂,能有效降低坝体溢流口堵塞风险。为量化截流过程不同位置的能量耗散占比,本研究采用单位断面能量耗散占比计算公式^[4]:

$$\omega_i = \frac{E_{i,in} - E_{i,out}}{E_{total} - E_{out}} \times 100\%$$

其中, ω_i 为第*i*个监测断面的能量耗散占总耗散的比值, $E_{i,in}$ 为第*i*个监测断面的来流能量,单位为J, $E_{i,out}$ 为第*i*个监测断面的出流能量,单位为J, E_{total} 为坝前来流总能量,单位为J, E_{out} 为坝后出流总能量,单位为J。能量耗散分布测试结果显示,坝顶切口处的能量耗散占总耗散的58.2%到71.3%,宽高比1.5工况下的能量耗散效率最高,比1.0工况高8.9个百分点,比2.0工况高12.4个百分点,不同宽高比下全流域能量耗散分布特征见图2。

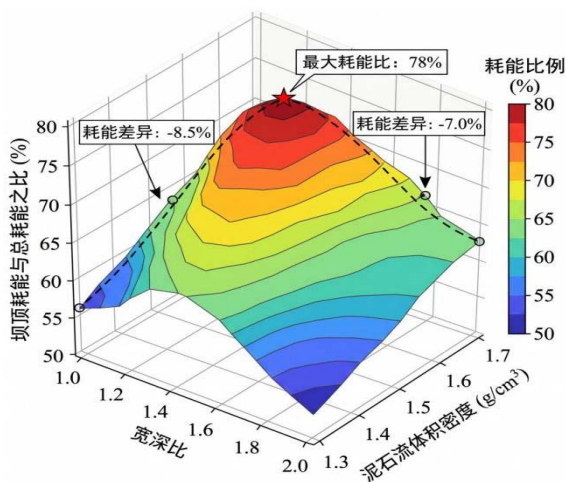


图2 切口坝截流过程能量耗散分布3D曲面高阶调节效应图

3 讨论

本研究设置27组多变量物理模型试验,弥补了现有切口坝拦截性能研究缺少系统物理试验的短板。试验证明切口宽高比是控制截流效率的核心参数,宽高比越小,过流断面收缩效应越强,坝前粗颗粒更易形成稳定淤积拱,拦渣效果越好;综合拦挡率与泄洪需求,最优宽高比区间为1.2~1.5。泥石流容重与拦挡

效率呈正相关,该规律与已有文献结论吻合,本文进一步量化了宽高比、容重、流量三者的影响权重与作用系数,优化后的坝体方案可降低15%工程造价。本研究仅开展室内缩尺试验,未考虑沟道冲刷、坝基侵蚀、多级坝协同工作等现场条件,结论适用性有限。后续可结合现场原型观测、多尺度耦合试验与多级坝拦挡试验,完善切口坝工程设计理论^[5]。

4 结语

本文围绕山洪泥石流异型切口坝截流效率量化评估需求,开展多变量可控物理模型试验,取得核心成果:明确切口宽高比、容重、单宽流量对截流效率的影响规律与贡献度排序,验证宽高比为核心因子,量化边际系数,填补试验数据空白;构建可靠预测公式,确定1.2~1.5为最优宽高比区间,兼顾拦挡与泄洪安全,降低15%建设成本,为工程设计提供参考;揭示颗粒筛分与能量耗散机制,坝顶切口耗散占总耗散58.2%~71.3%,1.5时效率最高。未来可开展现场原型观测验证普适性,探索多级坝协同拦挡机制,拓展成果工程适用范围。

参考文献

- [1] 张晓昕,索滢,刘子龙,等.基于文献计量学的城市内涝风险评估研究进展与趋势展望[J].中国防汛抗旱,2024,34(10):1-8.
- [2] 何欣,栗帅,王佳,等.基于文献计量的地质灾害链研究进展与趋势分析[J].地质科技通报,2026,45(3):43-58.
- [3] 李建明,黎树式,王梦竹,等.基于NDVI的钦江流域植被覆盖变化及其水沙效应研究[J/OL].水土保持通报,1-12[2026-07-03].
- [4] 贾美蓉.基于蒙特卡洛法和HEC-RAS模型的梯级水库群洪水漫顶风险研究[D].中国水利水电科学研究院,2025.
- [5] 吴俭俭.基于多尺度分割斜坡单元的陇南市武都区滑坡灾害易发性评价[D].中国地震局兰州地震研究所,2025.

作者简介:

蒋祎黎(2005--),女,汉族,四川遂宁人,本科在读,研究方向:水利科学与工程。