

引用格式:王浩,张金涛,代林,王全才,王继华. 基于数值模拟的泥石流拦挡坝群布局优化[J]. 山地学报, 2024, 42(6): 805-815.

WANG Hao, ZHANG Jintao, DAI Lin, WANG Quancai, WANG Jihua. Layout optimization of debris flow check dam cascade based on numerical simulation [J]. Mountain Research, 2024, 42(6): 805-815.

基于数值模拟的泥石流拦挡坝群布局优化

王浩¹, 张金涛¹, 代林¹, 王全才², 王继华³

(1. 河南大学 建筑工程学院, 河南 开封 475000; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610213;

3. 河南省自然资源监测和国土整治院, 郑州 450000)

摘要: 在工程实践中,常采用拦挡坝群协同布局防治泥石流灾害。泥石流翻越首坝后,其运动状态会发生显著变化,次级坝体的受力状况以及整体的防治效果,均会受到坝体间距和坝体结构的重要影响。前期研究关注单一坝体,对坝群间距如何影响坝体承载模式及防治效果尚缺乏认识。本文基于野外实地勘察,利用 ANSYS-Fluent 的流固耦合模型,模拟在泥石流冲击作用下,多级拦挡坝的不同间距、坝型与坝体应力之间的关联。结合 RAMMS 的 Voellmy 流变模型,对二郎山后山泥石流进行了多级拦挡坝设立间距的模拟分析。从坝体静力和防治效果两个方面,深入探讨了坝体间距的影响。研究表明:(1)在空库过流达到稳定流动状态后,泥石流浆体的总压力呈现出上小下大的层状分布特征。(2)与拱形坝相比,矩形坝所产生的应力和位移相对较小。首道坝体所承受的应力和位移均小于次级坝体。(3)设立两级拦挡坝对泥石流运动起到明显的调控作用。随着两级坝体间距不断扩大,拦挡坝所受位移与应力发生波动。当间距 80 m 时,两级拦挡坝的应力与位移均达到最大值,为最不利间隔。(4)随着坝体间距增加,泥石流最大堆积高度与流速呈现先增大后减小的变化趋势。(5)当二郎山坡面泥石流拦挡坝的设立间隔为 40 m、100 m、120 m 时,防护效果较为理想。研究结果对多级泥石流拦挡坝的优化设计具有借鉴意义。

关键词: 泥石流;拦挡坝群;数值模拟;优化设计

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

拦挡坝群是防治大型沟道泥石流灾害的常用工程措施。其通过多个拦挡坝级联布局,逐级拦排泥石流流体中的固体物质、降低泥石流流速、削减峰值流量,从而减轻泥石流对坝体的冲击动能^[1-6]。拦挡坝群整体的拦截能力与诸多因素紧密相关,包括单体结构尺寸^[7-8]、坝群空间布局^[9-11],以及坝库淤积状态^[12-13]等。优化拦挡坝群结构与布局设计,对提高坝群整体协同防治能力、延长坝体使用寿命具有重要意义。

单一拦砂坝坝体的拦蓄能力研究,已经取得了

丰富的理论成果与实践验证^[14-20],但面对高频次、超设防流量的大型泥石流冲击,单一拦砂坝的拦挡作用有限,而拦砂坝群发挥梯级消能作用,往往可以取得更为显著的防护成效。观察发现,当泥石流冲击拦挡坝群时,会在第一道坝体前发生“爬升—翻坝—回淤”以及翻坝后侵蚀等复杂行为^[21-22]。因此,对坝群坝体数量、尺寸及坝间距等协同设计,能够改变泥石流的动力学特征,缓解坝体承载压力,从而提高拦挡坝的防治效果。然而,工程界对于坝体间距如何影响拦挡坝的受力及防治效果尚缺乏深入

收稿日期(Received date): 2024-05-28; 改回日期(Accepted date): 2024-12-16

基金项目(Foundation item): 河南省科技攻关项目(232102321012, 242102321007)。[Scientific Project of Henan Science and Technology Department(232102321012, 242102321007)]

作者简介(Biography): 王浩(1986-),男,河南信阳人,博士,副教授,主要研究方向:地质灾害机理及防治技术。[WANG Hao(1986-), male, born in Xinyang, Henan Province, Ph. D., associate professor, research on mechanisms of geological hazards and prevention technologies]
E-mail: wanghao8023@henu.edu.cn

的认识。

本文以二郎山后山泥石流为研究对象,根据现场调查数据,构建高精度地形模型;使用 Fluent 流固耦合模型和 RAMMS 软件,模拟不同坝型和坝体间距场景,分析两级拦挡坝的坝体载荷分布,并综合评估坝间距对拦挡坝坝体受力和防治效果的影响。研究结果可以为泥石流拦挡坝的优化设计提供参考。

1 研究区概况

研究区位于四川省泸定县与天全县交会地带的二郎山隧道管理处后方,地理位置为 $29^{\circ}50'40''N$ 、 $102^{\circ}15'47''E$ 。研究区内最高海拔为 2610 m,最低海拔为 2000 m,相对高差达 610 m,上部因矿山采矿形成坡度约 $45^{\circ} \sim 58^{\circ}$ 的人工边坡,高度达 50 ~ 80 m。该地区位于季风气候与干冷气候交会地区,所以每年 5—10 月份降雨量大,其余月份多风、降雨量小。历史年平均降雨量仅为 664.4 mm。二郎山隧道施工完成后,气候有所改变,1999 年降雨量增加至 765.2 mm。

泥石流沟的主要物源为上部别托石灰岩矿山开采后产生的大量弃渣。沟道内堆积的弃渣堆积物分布范围面积约 $1.4 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆积物厚度平均约 2 ~ 3 m,初步估算矿山弃渣堆积方量约 $3 \times 10^4 \sim$

$4 \times 10^4 \text{ m}^3$,弃渣场区沟床纵坡比降达 60% ~ 100%,且微冲沟沟侧斜坡坡面坡度也较大,一般在 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。暴雨和陡峭的坡度是该研究区坡面泥石流形成的主要原因。由于沟内堆积物主要由碎块石组成,粘土类物质较少,因此该泥石流呈现为稀性坡面型泥石流。

已修筑的第一级拦挡坝位于坡面弃渣场一带,矿区部分弃渣直接堆弃于斜坡上,目前弃渣堆砌高度已经达到第一级拦挡坝坝顶,且现有拦挡坝为干砌块石坝,坝体自身强度低,所以该坝拦挡弃渣的功能已经失效,需要加固或重建。第二道拦挡坝位于原废弃采料场宽缓平台部位,修建于 2010 年上半年,下部为干砌块石上部为袋装砂石坝,坝高仅约 2.5 ~ 3 m,坝底宽约 1.5 m,坝顶宽约 1 ~ 1.2 m,坝轴线长度约 38 m,第一级拦挡坝与第二级拦挡坝设立间距为 80 m,两坝坝体自身强度极差。调查期间发现局部地段的沙袋已经损坏而导致墙体坍塌,其拦挡功能几近丧失,因此两道拦渣坝都应重建,具体如图 1 所示。

2 数值模拟

泥石流灾害的突然性和随机性给实地调查和数

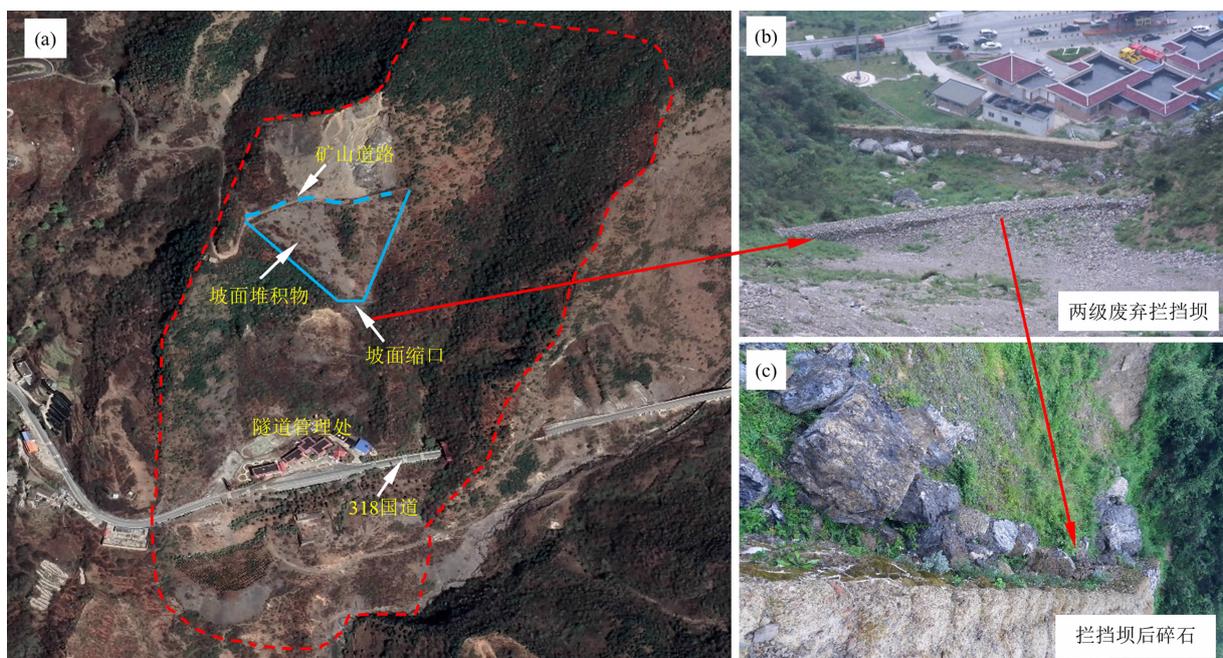


图 1 研究区概况图:(a)研究区周围环境;(b)废弃拦挡坝;(c)拦挡坝后的碎石

Fig. 1 Overview map of the study area;

(a) surrounding environment of the study area; (b) abandoned debris flow check dams; (c) gravels behind the dam

据收集工作带来很大的困难,因此,数值模拟技术已成为研究泥石流灾害的重要工具。瑞士雪崩研究所开发的快速质量运动模拟软件 RAMMS(Rapid Mass Movement Simulation)具备在真实地形模型上定义多个泥石物源区的能力,并允许使用者为每个源区配置特定的参数。此外,RAMMS 支持以基于实际观测数据自定义水文释放曲线来控制泥石流的启动过程。这些功能显著提高了模拟结果与实际观测数据的一致性^[23-24]。在拦挡坝内力响应模拟方面,ANSYS-Fluent 软件基于有限体积法,通过离散化网格和迭代求解,实现了高效率的计算过程,其模拟结果的准确性已在多项研究中得到了验证^[11,25]。

本研究的数值模拟分为两个主要部分。首先,利用 ANSYS-Fluent 对不同间距设置下的矩形和拱形拦挡坝进行泥石流冲击作用下的受力和位移分析,以确定最优坝型。随后,采用 RAMMS 软件模拟不同间距设置下两级拦挡坝对泥石流防治效果的影响,并结合 ANSYS-Fluent 的力学分析结果,从防治效果和结构受力两方面进行综合评估,最终总结出最佳拦挡坝间距。研究路线如图 2 所示。

2.1 拦挡坝间距对坝体受力影响模拟

拦挡坝在泥石流过程中的受力情况将决定其是

否会发生破坏,泥石流爆发的突然性和运动过程的持续性对拦挡坝的受力情况提出了较高的要求^[26]。所以,分析和比较泥石流冲击拦挡坝过程中拦挡坝的内力情况十分必要。流固耦合分析分为单向和双向两种。单向流固耦合分析指流体数据单向传递给固体,不考虑固体变形对流场的影响,适用于固体结构刚性极高、形变可忽略的情况。本文的研究重点是拦挡坝在泥石流浆体冲击下的工作状态,单向流固耦合分析已足够满足研究需求。ANSYS-Fluent 流固耦合过程中有两个模块参与,流体采用 Fluent 计算,固体采用瞬态动力学计算。待流体计算完毕后将数据传递至固体模块进行计算,最终实现耦合。

在开始模拟前应首先进行拦挡工程与流场的三维建模。因实际中泥石流坡面起伏大,地形特征值较为复杂,且 Fluent 无法采用实际地面模型进行模拟,故本文采用 Spaceclaim 软件对其进行简化建模。经反复试算后确定的外流场尺寸如图 3 所示,假定外流场的底面水平且侧面竖直,流场前部为 20°坡面。流域上部长 50 m,宽与坝体轴线保持一致为 45 m。矩形重力拦挡坝尺寸参考实际勘察设置,轴线长 45 m,底宽 3 m,顶宽 1.5 m,高 6 m,拱形重力拦挡坝轴线长 45 m,底宽 3 m,顶宽 1.5 m,弧形夹

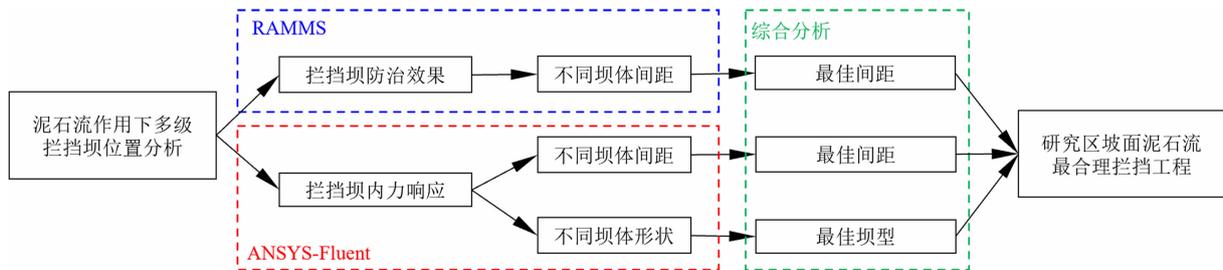


图 2 研究路线图

Fig. 2 Research framework

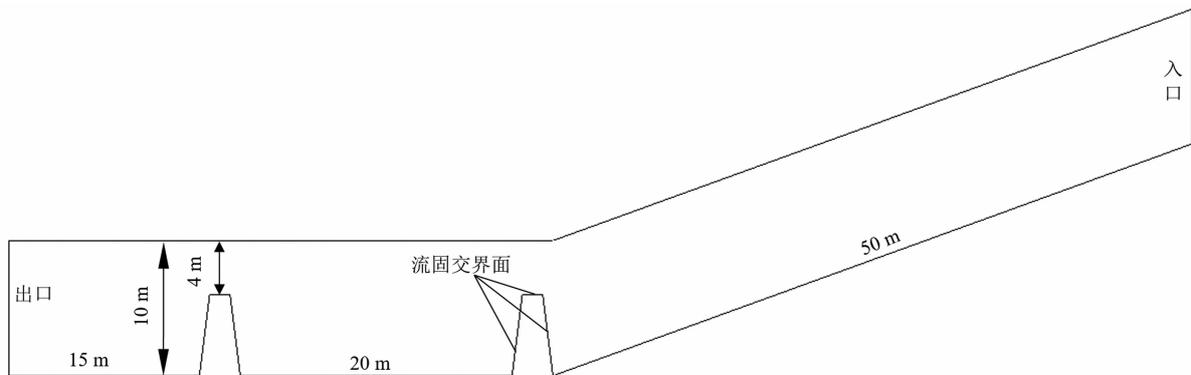


图 3 流场尺寸设置

Fig. 3 Dimensional design of external flow field

角为 45° , 流场出口靠第二级拦挡坝背面水平距离为 15 m, 两级坝之间按照间隔 20、40、60、80、100、120 m 设置。

建模完成后将其导入 Mesh 模块进行网格划分并对其分块处理, 因为整体模型较为规则, 所以网格划分采用尺寸调整方法, 单元尺寸划分为流场单元 1 m, 坝体单元为 0.5 m。图 4 显示了划分网格后的外流场模型。

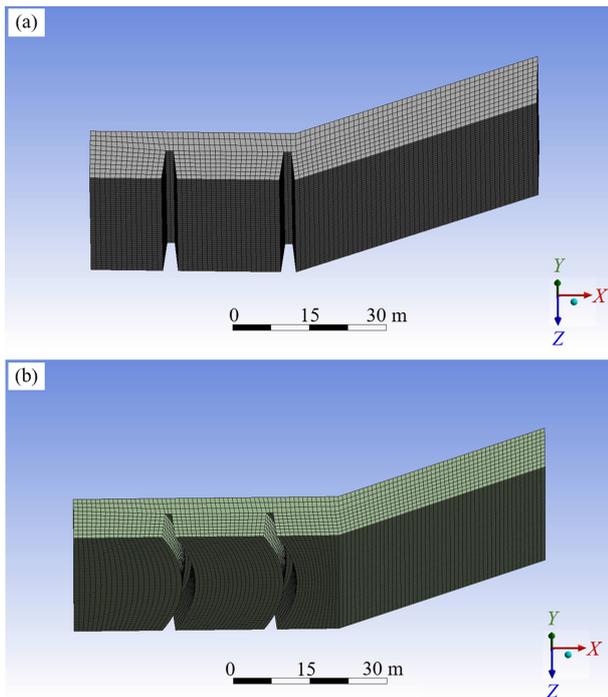


图 4 划分外流场网格: (a) 矩形坝; (b) 拱形坝
Fig. 4 Generate grids for external flow field;
(a) rectangular check dam; (b) arched check dam

流域范围的边界条件设置如图 5 所示, 外流场最右端为速度入口, 设置为 inlet 边界, 泥石流浆体方向为与 x 轴夹角 20° 负方向; 沿 x 方向最左端为压力出口, 添加大气压强, 设置为 outlet 边界; 在实际工程中, 流场顶部与大气相通, 且泥石流冲击拦挡坝后向上产生溅射, 所以将流域顶部边界条件设置为 opening; 将流域对称侧面及底部设置为 wall, 坝体与流域交会面为耦合面, 用于数据传递。

采用 Fluent 进行泥石流流固耦合模拟时, 流体参数需要自行设置。外流场分析的目的是获取可用于固体结构计算的流体压力, 流体自身变化情况并不是研究的重点, 所以可将泥石流浆体定义为纯物质; 依据二郎山坡面泥石流现场调查结果可以确定

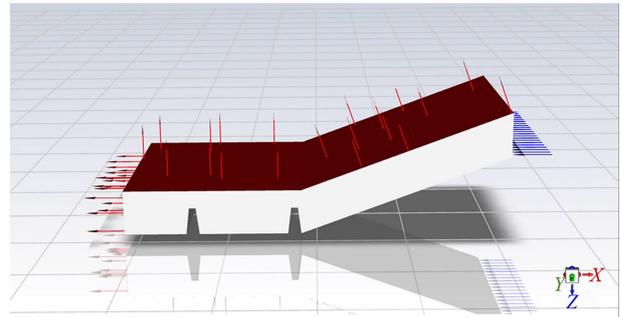


图 5 外流场边界条件设置

Fig. 5 Boundary condition settings for external flow field

流体的密度和动力粘度, 分别为 1600 kg/m^3 和 $0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。由雷诺数计算公式以及流动状态判定准则可知, 所涉及的泥石流浆体外部流动属于湍流流动, 根据 Fluent 所提供的各模型的特点及其适用条件并结合试算比较, 选用两方程模型中的 $k-\varepsilon$ 标准湍流模型^[27]。

应用于拦挡坝的固体模型按照泥石流防治规范选用浆砌石坝体材料, 参照砌石坝设计规范^[28]确定参数: 选取标号 600 的块石作为浆砌石坝体的骨料, 选取标号 50 的砂浆作为胶结材料, 拦挡坝具体材料参数为密度 2300 kg/m^3 , 弹性模量 $8 \times 10^6 \text{ kPa}$, 泊松比 0.23, 屈服应力 $8 \times 10^3 \text{ kPa}$, 切线模量 $1 \times 10^{-3} \text{ kPa}$ 。对于拦挡坝的约束, 将底部与两侧设为固定支撑, 冲击面为弹性面, 从而更好模拟出泥石流对迎流面的冲击作用。

2.2 拦挡坝间距对泥石流运动的影响模拟

泥石流是一种复杂的多相混合流体, 其运动状态由多种因素共同决定, 尤其是地形因素。本研究将于二郎山隧道西口管理处后山坡面泥石流案例地形模型之上, 利用 RAMMS 泥石流模拟软件探究拦挡坝间隔大小对泥石流运动状态的影响, 从防治效果的角度揭示拦挡坝最佳间隔。

RAMMS 采用 Vollemy 连续介质模型模拟泥石流、雪崩等自然灾害的运动过程, 该模型将泥石流假设为一种非稳定以及非均质的流体进行计算^[29]。RAMMS 利用真实地面模型来进行泥石流模拟, 将研究区 DEM 数据通过 ArcGIS 软件转换为 ASCII 文件之后即可导入 RAMMS 软件建立地形模型; 在模拟完成后, 能够直观地查看地形模型上任意时间、地点的流速及沉积厚度变化。

在重建拦挡工程后, 研究区未发生大型泥石流。

为深入分析拦挡坝的防治效果,本研究以百年一遇降雨工况下发生的坡面泥石流为例,对比分析空库条件下研究区后山坡面新建多级拦挡坝坝体间距为20、40、60、80、100和120 m时对泥石流的防治效果。模拟中的物源情况按照野外勘察数据设置,释放区物源多为松散碎石堆积体,厚度约为2.5 m,总堆积量约为40 000 m³。根据野外勘察结果可知,该坡面物源多为碎石土,在暴雨情况下会形成稀性泥石流,所以将泥石流密度设为1600 g/cm³[30]。降雨参数可根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》所提供的公式计算获得[31],二郎山管理处后山地区1%暴雨频率下暴雨洪峰流量值为185.9 m³/s,泥石流峰值流量为408.98 m³/s。地面模型及物源设置情况如图6所示。

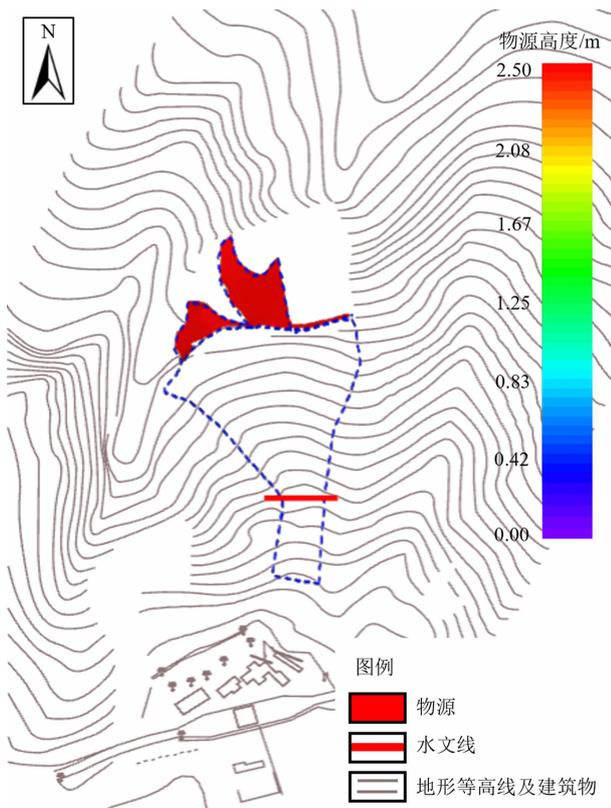


图6 地面模型及泥石流物源情况

Fig. 6 Ground model and debris flow sources

在 Voellmy 流变模型中,湍流系数 ξ 和干摩擦系数 μ 是两个重要参数[29],分别主导泥石流运动在不同场景与时段的表现。其中,湍流系数 ξ 主要影响快速流动泥石流的速度,而干摩擦系数 μ 更多作用于泥石流即将结束时的速度变化,本文摩擦系数 ξ 和 μ 则按照 RAMMS 使用手册中最佳案例建议值选取, ξ 取 150 m²/s, μ 取 0.225。RAMMS 模拟参数取值如表1所示。

3 模拟结果及讨论

3.1 坝体间距对拦挡坝静力影响

受到泥石流冲击时相同间距的拱形坝和矩形坝的应力、位移情况如图7所示。流场中两级坝体所受应力、位移有较大差别,前一级拦挡坝数值小于后一级挡坝。这主要是由于随着泥石流流量增加,在坝体淤满后再次受到浆体冲击,后一级拦挡坝所受压力增加,导致满库过坝比空库过坝产生的压力更大。泥石流浆体总压力呈层状分布,表现为上小下大,与液体压强沿深度方向的分布规律一致。

表2为坝体间距逐渐递增时矩形、拱形坝体的应力、应变情况。在5种不同工况下,泥石流浆体冲击两级不同类型拦挡坝产生的位移在0.1~1 mm,等效应力最大值为 1.10×10^3 kPa,满足拦挡坝混凝土极限抗压强度限制,几乎不会产生压碎破坏。

由表2中提取数据绘制不同坝体间隔对拦挡坝静力影响曲线,如图8所示。矩形和拱形多级拦挡坝的后级所产生位移、应力大于前级,说明在满库后泥石流过坝产生的压力更大;在位移方面,两坝位移变化较小,呈现波浪形变化趋势。对于矩形坝,两坝间隔为60 m时坝体位移取得最小值;对于拱形坝,两坝间隔为40 m时发生最小位移;两种坝型的最大位移均是在80 m间隔时发生。在应力方面,随着坝间间隔不断增大,两种坝型第一级拦挡坝都在坝间距60 m时取得应力最小值,80 m时取得应力最大值,第二级拦挡坝应力产生先下降后上升的变化趋

表1 RAMMS 模拟参数设置

Tab. 1 RAMMS simulation parameter setting

泥石流密度/(kg·m ⁻³)	最大侵蚀深度/m	网格分辨率/m	模拟时长/s	湍流系数 ξ /(m ² ·s ⁻¹)	干摩擦系数 μ
1600	2.5	3×3	2000	150	0.225

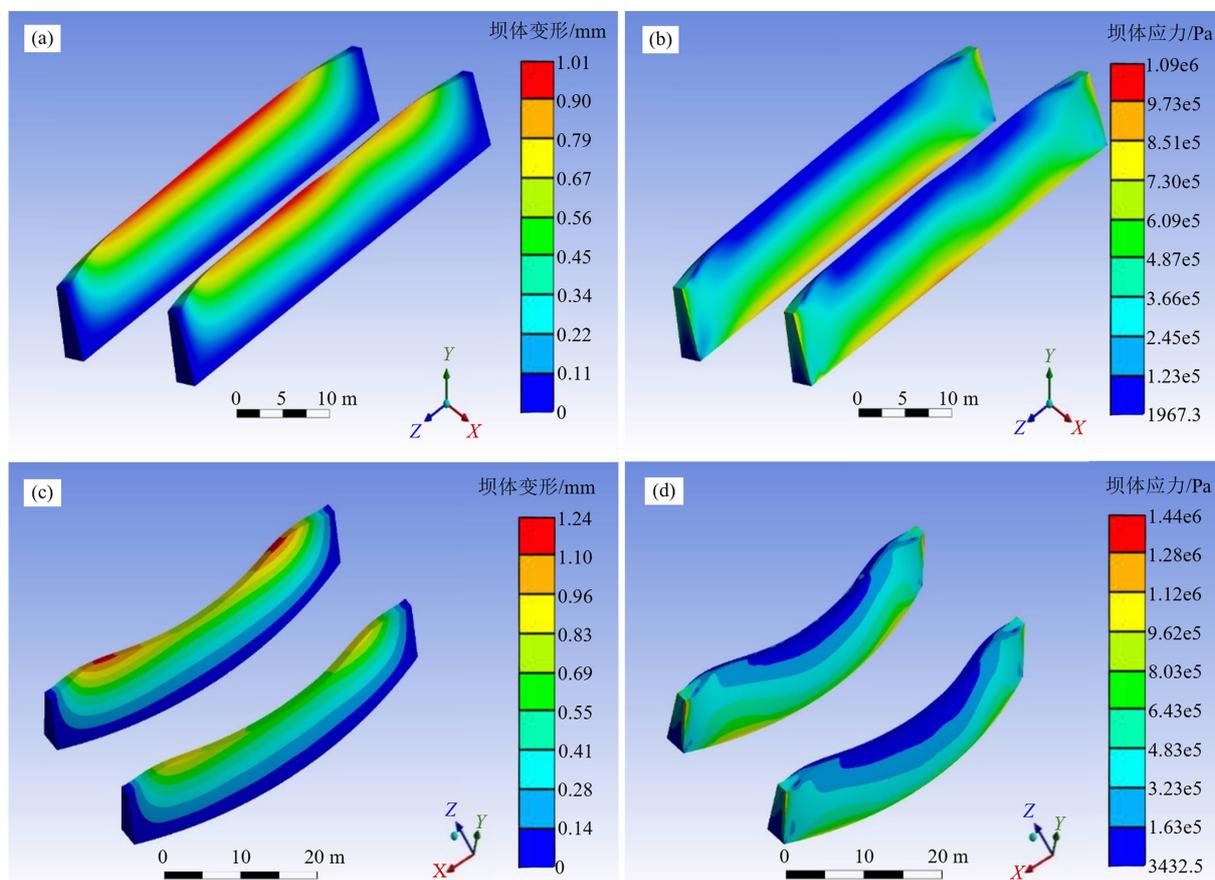


图 7 浆体冲击不同坝型结构分析图：(a) 矩形拦挡坝坝体位移云图；

(b) 矩形拦挡坝坝体应力云图；(c) 拱形拦挡坝坝体位移云图；(d) 拱形拦挡坝坝体应力云图

Fig. 7 Structural analysis diagram of different dam types under impact: (a) displacement of rectangular check dam;

(b) stress of rectangular check dam; (c) displacement of arched check dam; (d) stress of arched check dam

表 2 坝体应力、应变统计表

Tab. 2 Statistical table of stress and strain of check dam

坝型	坝体间距/m	总变形/mm		等效应力/kPa	
		1#坝	2#坝	1#坝	2#坝
矩形	20	0.140	0.774	286.180	923.469
	40	0.170	0.751	298.700	851.256
	60	0.154	0.735	255.920	764.820
	80	0.210	0.792	329.820	798.550
	100	0.197	0.776	294.330	828.000
	120	0.168	0.749	299.800	826.470
拱形	20	0.244	0.874	395.260	1 098.000
	40	0.235	0.843	373.540	1 000.200
	60	0.250	0.854	368.920	956.090
	80	0.274	0.878	424.510	992.680
	100	0.271	0.852	386.790	979.126
	120	0.247	0.866	404.920	1 065.000

势,在两坝间隔为 60 m 时取得应力最小值,无法判断应力最大值。两种坝型中,前坝所受应力与位移都小于后坝,且拱形坝受到应力与位移大于矩形坝。

3.2 多级拦挡坝防治效果分析

图 9 为无拦挡坝和重建 40 m 间隔两级矩形坝后坡面泥石流的运动情况。模拟结果显示与无防护措施时相比,拦挡坝对泥石流具有明显的淤停和拦阻效应,图中泥石流过坝堆积高度具有明显变化,间隔为 40 m 坝体得出流动过程中最大堆积高度为 8.37 m,出现在冲沟与管理处平台交会处,与无防护措施出现位置相同,总堆积量为 200 836.84 m³,两者相较于无防护措施时都有明显减小,坝体对泥石流具有显著阻碍作用,在坝体前产生更大回淤高度。

然而在管理处平台与上方冲沟交界处泥石流流量仍然较大,泥石流无法迅速在堆积区扩散,所以最大堆积高度产生在相同位置。

图 10 为不同间距矩形拦挡坝作用下的泥石流运动特征参数。设立防护措施后,坡面泥石流堆积高度、流速、堆积量都显著减小,随着坝体间距不断增加,泥石流最大堆积高度与流速呈现先增大后减小的变化趋势,且两参数变化趋势相同。坝体间距为 80 m 时堆积高度与流速达到最大值。随着坝体间距继续增大,堆积高度与交界处的流速逐渐减小,间距 120 m 时取得最小值。设立拦挡坝后泥石流流至堆积区后总堆积量变化不大,坝体间距 20 m 时取得最大值,坝体间距 40 m 时取得最小值。研究区原

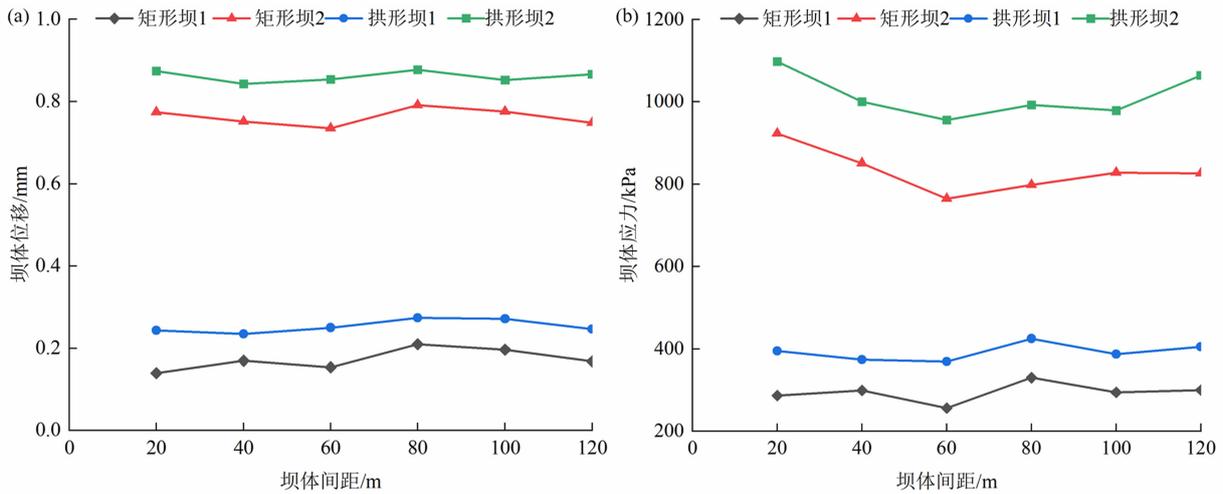


图 8 不同坝体间隔对拦挡坝的静力影响:(a)坝体位移情况;(b)坝体应力情况

Fig. 8 Static influence of different spacings on two-level check dam cascade:
(a) displacement of check dam body; (b) stress of check dam body

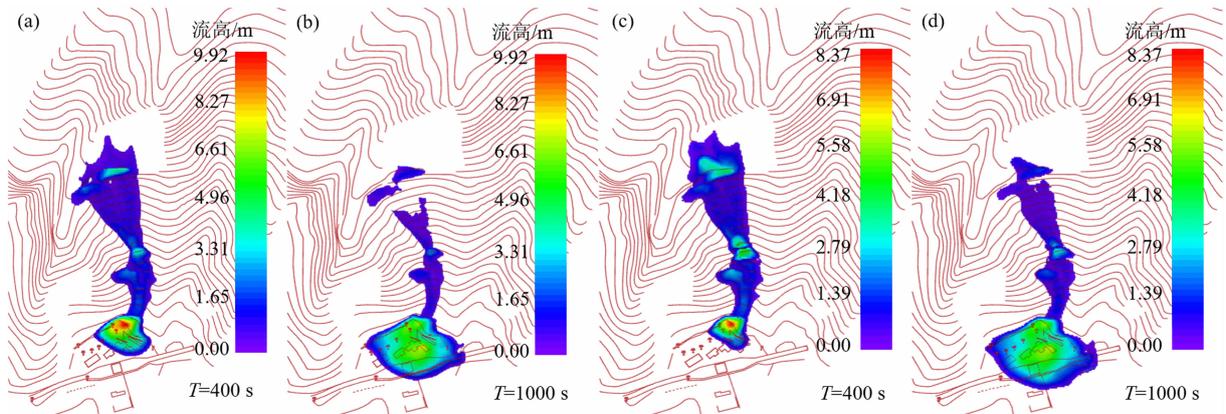


图 9 拦挡坝防治效果模拟:(a, b)无拦挡坝;(c, d)40 m 间隔两级拦挡坝

Fig. 9 Simulate result of prevention and control effect of debris flow check dam cascade:
(a, b) no check dam; (c, d) two-level check dam cascade with a spacing of 40 m

有两级拦挡坝坝体间距为 80 m,由上述分析可得,在此间距下泥石流产生的最大堆积高度与流速值最大,泥石流堆积区堆积量较高,不宜采取此间距建立拦挡坝。而坝体间距为 40 m 时,泥石流最大堆积高度与流速值较小,堆积区堆积量最少。

3.3 拦挡工程对泥石流危险区的影响

泥石流危险度分区可以直观地展现多级拦挡坝的防护效能。分区以泥石流的高度与流速为依据,能够清晰地反映泥石流的淤积特性及强度^[32](图 11)。与无拦挡坝的情况相比,以 40 m 为间隔设置两级拦挡坝时,高危险覆盖区域的面积减少了约 20%,在降低泥石流危险性方面取得了较好的成效。

综上,结合 Fluent 模拟得出的拦挡坝应力、位移变化,二郎山隧道西口管理处坡面泥石流最佳拦挡

坝坝型为两级相同矩形坝,当坝体间距为 40、100 和 120 m 时都能够将泥石流的流速、堆积高度及总堆积量控制在较低水平,削减泥石流的动能和影响范围,对泥石流运动起到了较好的防治作用。间隔为 80 m 时泥石流冲击坝体所产生的应力和位移较大,且泥石流的流速和堆积高度相对较高,为最不利间隔。分析结果可以为二郎山隧道西口坡面泥石流拦挡坝防治提供理论借鉴,具体位置还需根据现场地质勘察结果合理设置。

4 结论

本文使用 Fluent 流固耦合模型对矩形、拱形两种形态的拦挡坝在不同间隔情况下的静力学性能进

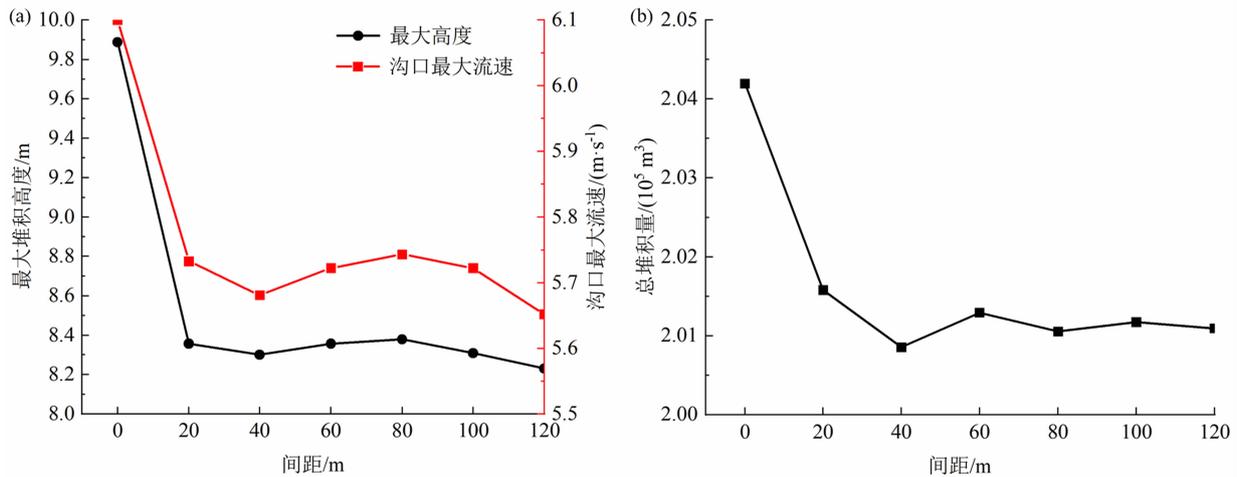


图 10 不同间距两级矩形拦挡坝作用下的泥石流运动特征:

(a) 堆积高度与沟口最大流速变化; (b) 堆积区堆积量变化

Fig. 10 Movement characteristics of debris flow under two-level check dam cascades with different spacings

(a) accumulation height and maximum flow velocity at channel outflow; (b) accumulation amount

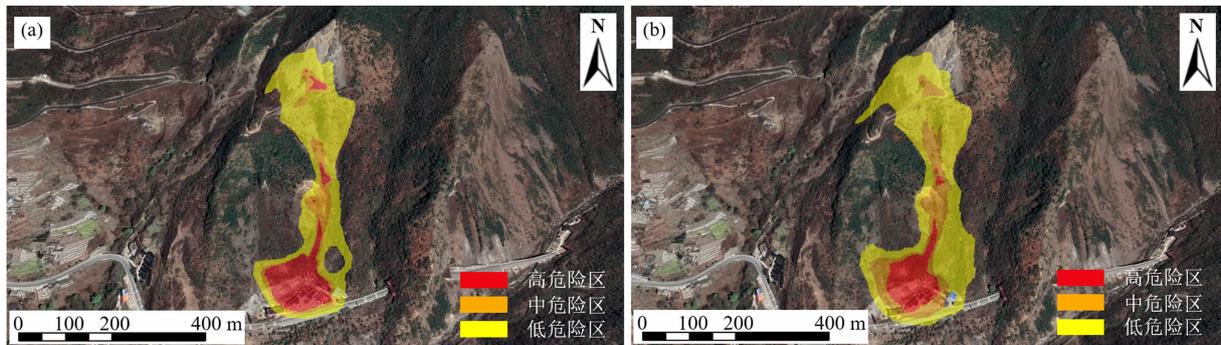


图 11 拦挡坝设立前后泥石流危险性对比: (a) 无拦挡坝; (b) 40 m 间隔两级拦挡坝

Fig. 11 Comparison of debris flow hazard with and without check dams:

(a) no check dam; (b) two-level check dam cascade with a spacing of 40 m

行了模拟,随后使用 RAMMS 模拟了二郎山隧道西口坡面泥石流不同间隔拦挡坝的防治效果,并对其进行综合分析,得到主要结论如下。

(1) 在空库过流至流动状态稳定后,泥石流浆体总压力呈现出上小下大的层状分布,这一结果与液体压强随深度增加而增大的物理规律相符。矩形坝相较于拱形坝在相同泥石流冲击条件下的应力和位移更小;第一级拦挡坝所承受的应力和位移显著低于第二级。随着两级坝间距的扩大,坝体的应力和位移呈现出不规则波动趋势,并在 80 m 间距时出现位移最大值。

(2) 设置两级拦挡坝显著削减了泥石流的运动强度。随着坝间距的增加,泥石流的最大堆积高度和流速先上升后下降。当坝间距分别为 40、100 和 120 m 时,显示出较好的防护效果;而 80 m 间距则导致较高的堆积高度和流速,不利于泥石流的有效控制。

(3) 风险分区分析表明,采用适当间距(如 40 m)设置的两级拦挡坝能够显著减少高风险区域面积,约减少 20%,从而有效提升整体安全性。与无拦挡坝的情况相比,合理的多级拦挡坝布局可以显著降低泥石流灾害的风险,提高区域的安全水平。

参考文献(References)

- [1] 崔鹏, 邹强. 山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法[J]. 地理科学进展, 2016, **35**(2): 137 - 147. [CUI Peng, ZOU Qiang. Theory and method of risk assessment and risk management of debris flows and flash floods [J]. Progress in Geography, 2016, **35**(2): 137 - 147] DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.02.001
- [2] 陈宁生, 周海波, 卢阳, 等. 西南山区泥石流防治工程效益浅析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, **40**(1): 50 - 58. [CHEN Ningsheng, ZHOU Haibo, LU Yang, et al. Analysis of benefits of debris flow control projects in southwest mountain areas of China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, **40**(1): 50 - 58] DOI: 10.3969/j.issn.1671-9727.2013.01.008
- [3] 石振明, 吴彬, 郑鸿超, 等. 泥石流防治措施与冲击力研究进展[J]. 地球科学, 2022, **47**(12): 4339 - 4349. [SHI Zhenming, WU Bin, ZHENG Hongchao, et al. State of the art on prevention and control measures and impact model for debris flow [J]. Earth Science, 2022, **47**(12): 4339 - 4349] DOI: 10.3799/dqkx.2022.376
- [4] OSANAI N, MIZUNO H, MIZUYAMA T. Design standard of control structures against debris flow in Japan [J]. Journal of Disaster Research, 2010, **5**(3): 307 - 314. DOI: 10.20965/jdr.2010.p0307
- [5] SHIMA J, MORIYAMA H, KOKURYO H, et al. Prevention and mitigation of debris flow hazards by using steel open-type sabo dams [J]. International Journal of Erosion Control Engineering, 2016, **9**(3): 135 - 144. DOI: 10.13101/ijece.9.135
- [6] ZANUTTIGH B, LAMBERTI A. Experimental analysis of the impact of dry avalanches on structures and implication for debris flows [J]. Journal of Hydraulic Research, 2006, **44**(4): 522 - 534. DOI: 10.1080/00221686.2006.9521703
- [7] SHIEH C L, TING C H, PAN H W. Impulsive force of debris flow on a curved dam [J]. International Journal of Sediment Research, 2008, **23**(2): 149 - 158.
- [8] 王东坡, 张小梅. 泥石流冲击弧形拦挡坝动力响应研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(12): 3851 - 3861. [WANG Dongpo, ZHANG Xiaomei. Study on dynamic response of debris flow impact arch-shaped dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(12): 3851 - 3861] DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0311
- [9] SHEN Wei, LI Tonglu, LI Ping, et al. Numerical assessment for the efficiencies of check dams in debris flow gullies: A case study [J]. Computers and Geotechnics, 2020, **122**: 103541. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103541
- [10] 郑仕超. 尾矿库溃坝泥石流冲击力及防护措施试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019: 21 - 46. [ZHENG Shichao. Experimental study on impact and protection of the tailings debris flow [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019: 21 - 46]
- [11] 陈露. 泥石流多级拦挡组合模式及参数分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016: 34 - 46. [CHEN Lu. Multistage block portfolio mode and parameter analysis of debris flow [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016: 34 - 46]
- [12] 王东坡, 瞿华南, 沈伟, 等. 考虑坝后淤积的泥石流冲击拦挡坝动力响应研究[J]. 工程科学与技术, 2021, **53**(2): 1 - 9. [WANG Dongpo, QU Huanan, SHEN Wei, et al. Dynamic response analysis for debris flow dam with sediments [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, **53**(2): 1 - 9] DOI: 10.15961/j.jsuese.202000449
- [13] 瞿华南. 考虑坝后淤积作用下的泥石流冲击拦挡坝动力响应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021: 20 - 33. [QU Huanan. Study on dynamic response of debris flow impact dam considering post-dam sedimentation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021: 20 - 33]
- [14] VAGNON F, SEGALINI A. Debris flow impact estimation on a rigid barrier [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2016, **16**(7): 1691 - 1697. DOI: 10.5194/nhess-16-1691-2016
- [15] 刘兴荣, 魏新平, 陈豫津, 等. 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[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, **32**(2): 78 - 83. [LIU Xingrong, WEI Xinping, CHEN Yujin, et al. Numerical

- simulation of impact resistance of debris flow dam: A case study of the debris flow dam in Sanyanyu Gully, Zhouqu County, Gansu Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, **32**(2): 78 – 83] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.02.11
- [16] 李俊杰, 王秀丽, 冉永红. 泥石流块石冲击下新型拦挡坝动力响应试验研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, **39**(5): 889 – 896. [LI Junjie, WANG Xiuli, RAN Yonghong. Experimental study dynamic response of a new dam to the impact of block stones in debris flow [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, **39**(5): 889 – 896] DOI: 10.11990/jheu.201611032
- [17] 苏洁, 周成, 陈生水, 等. 石笼拱柔性拦截坝新技术及其数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(2): 269 – 275. [SU Jie, ZHOU Cheng, CHEN Shengshui, et al. Numerical simulation of flexible gabion arch dam to prevent and control debris flow blocks [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(2): 269 – 275] DOI: 10.11779/CJGE201502009
- [18] 陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅, 等. 泥石流冲击荷载的时频分析方法及应用[J]. *防灾减灾工程学报*, 2011, **31**(3): 255 – 260. [CHEN Hongkai, XIAN Xuefu, TANG Hongmei, et al. Time-frequency analysis method of debris flow impact loads and its application [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2011, **31**(3): 255 – 260] DOI: 10.3969/j.issn.1672-2132.2011.03.004
- [19] JEONG S, LEE K. Analysis of the impact force of debris flows on a check dam by using a coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, **116**: 103214. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103214
- [20] LIU Wei, YAN Shuaixing, HE Siming. A simple method to evaluate the performance of an intercept dam for debris-flow mitigation [J]. *Engineering Geology*, 2020, **276**: 105771. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105771
- [21] 王东坡, 廖承兴, 瞿华南, 等. 坝后淤积条件下泥石流冲击拦挡坝动力响应研究[J]. *地球科学*, 2024, **49**(3): 1017 – 1027. [WANG Dongpo, LIAO Chengxing, QU Huanan. Study on dynamic response of debris flow impact on check dam with sediments [J]. *Earth Science*, 2024, **49**(3): 1017 – 1027] DOI: 10.3799/dqkx.2022.424
- [22] 张友谊, 古维扬, 黄琛. 基于模型试验的翻坝泥石流铲刮效应研究[J]. *灾害学*, 2023, **38**(3): 75 – 81 + 86. [ZHANG Youyi, GU Weiyang, HUANG Chen. Study on scraping effect of dam-overtopping debris flow based on model test [J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, **38**(3): 75 – 81 + 86] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.012
- [23] WANG Hao, ZHANG Jintao, HU Qing, et al. Effect of channel confluence on the dynamics of debris flow in the Niutang Gully [J]. *Natural Hazards*, 2024. DOI: 10.1007/s11069-024-06861-1
- [24] LIU Bo, HU Xiewen, MA Guotao, et al. Back calculation and hazard prediction of a debris flow in Wenchuan meizoseismal area, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, **80**: 3457 – 3474. DOI: 10.1007/s10064-021-02127-3
- [25] 贾邦中, 吴义鹰, 冯文凯, 等. 龙川县米贝村 1#泥石流灾害特征与运动过程[J]. *科学技术与工程*, 2024, **24**(9): 3576 – 3585. [JIA Bangzhong, WU Yiyong, FENG Wenkai, et al. 1# debris flow disaster characteristics and movement process in Mibei Village, Longchuan County [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, **24**(9): 3576 – 3585] DOI: 10.12404/j.issn.1671-1815.2304262
- [26] 陈华勇, 柳金峰, 赵万玉, 等. 非透水性泥石流拦砂坝研究现状及展望[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, **36**(2): 323 – 330. [CHEN Huayong, LIU Jinfeng, ZHAO Wanyu, et al. A review and prospect: The study on the closed-type check dams [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, **36**(2): 323 – 330] DOI: 10.13409/j.cnki.jpme.2016.02.023
- [27] 江民圣. ANSYS Workbench19.0 基础入门与工程实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019: 322 – 337. [JIANG Minsheng. Introduction and engineering practice of ANSYS Workbench19.0 foundation [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2019: 322 – 337]
- [28] SL25-2006. 砌石坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019. [SL25-2006. Design specification for stone masonry dams [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2019]
- [29] CHRISTEN M, KOWALSKI J, BARTELT P. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, **63**(1-2): 1 – 14. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.04.005
- [30] 唐邦兴, 周必凡, 吴积善. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000: 1 – 375. [TANG Bangxing, ZHOU Bifan, WU Jishan. Debris flow in China [M]. Beijing: The Commercial Press, 2000: 1 – 375]
- [31] 四川省水利电力厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册[M]. 成都: 四川省水利电力厅, 1984: 3 – 15. [Sichuan Provincial Water Resources and Electric Power Department. Rainstorm flood calculation manual for small and medium basins in Sichuan Province [M]. Chengdu: Sichuan Provincial Water Resources and Electric Power Department, 1984: 3 – 15]
- [32] CHANG Ming, TANG Chuan, VAN ASCH T W J, et al. Hazard assessment of debris flows in the Wenchuan earthquake-stricken area, south west China [J]. *Landslides*, 2017, **14**(17): 1783 – 1792. DOI: 10.1007/s10346-017-0824-9

Layout Optimization of Debris Flow Check Dam Cascade Based on Numerical Simulation

WANG Hao¹, ZHANG Jintao¹, DAI lin¹, WANG Quancai², WANG Jihua³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475000, Henan, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Chengdu 610213, China;

3. Institute of Natural Resources Monitoring and Comprehensive Land Improvement of Henan Province, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In engineering practice, a check dam cascade is arranged in a coordinated layout to prevent massive debris flow disasters. After a debris flow overtops the first dam of a dam cascade, its movement pattern undergoes significant changes, with the stress state in the second-level dam and the overall prevention efficiency being both greatly affected by the distance between dams as well as dam structure. Previous studies only concerned about the behaviors of a single dam in debris flow control design, lacking knowledge of how the spacing between dams affects their load-bearing patterns and prevention effectiveness.

In this paper, based on field investigation, a fluid-solid coupled model in ANSYS-Fluent was utilized to simulate the correlation among different spacings, types and stresses of multi-level check dams under the impact of debris flow. Combined with the Voellmy rheological model in RAMMS, a thorough analysis of the spacing of the dams was exemplified by a real debris flow gully, located at backslope of the Erlang Mountain, Sichuan, China. The influence of dam spacing was discussed from two aspects: dam body static force and prevention effectiveness.

(1) After achieving a stable state of overflow in dam reservoir, the total pressure of debris flow slurry on dam exhibited a laminar distribution with higher pressure at bottom and lower pressure at top.

(2) Compared with arched dams, the rectangular dam generated relatively smaller stress and displacement. The stress and displacement endured by the first-level dam body was both less than those in the secondary-level dam body.

(3) The establishment of a two-level check dam cascade provided a significant regulating effect on debris flow movement. With continuous expansion the spacing between two dam bodies, the displacement and stress in the second-level dam fluctuated. When the spacing was 80 m, the stresses and displacements in the two-level check dam both reached the maximum value, indicating the most unfavorable spacing.

(4) With the increase of dam spacing, the maximum accumulation height and velocity of debris flow showed a trend of increasing first and then decreasing.

(5) As for the real case of debris flow on the backslope of the Erlang Mountain, the protection effect was more satisfactory when the dam spacing were designed at intervals of 40 m, 100 m and 120 m.

This study has implications for optimal design of debris flow check dam cascade.

Key words: debris flow; debris flow check dam cascade; numerical simulation; layout optimization

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)