

引用格式: 姚鸿坤, 邹强, 蒋虎, 周文韬, 陈思谕, 周斌. 泥石流承灾体群体效应特征反演——以 7·12 四川平武县黑水沟泥石流为例[J]. 山地学报, 2024, 42(1): 47-59.

YAO Hongkun, ZOU Qiang, JIANG Hu, ZHOU Wentao, CHEN Siyu, ZHOU Bin. Collective effects of debris flow striking on structure clusters downstream: A case study of the Heishui gully debris flow on July 12th in Pingwu county, Sichuan province, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(1): 47-59.

泥石流承灾体群体效应特征反演 ——以 7·12 四川平武县黑水沟泥石流为例

姚鸿坤^{1,2}, 邹强^{1*}, 蒋虎^{1,2}, 周文韬^{1,2}, 陈思谕^{1,3}, 周斌^{1,2}

(1. 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全国重点实验室, 成都 610299;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 群体建筑结构的分布格局、结构形式等因素影响泥石流冲击过程和致灾表现。泥石流冲击存在绕流现象、放大作用和遮蔽效应, 泥石流与建筑群之间存在复杂的流固耦合模态, 但针对这类泥石流承灾体群体效应的过程与机制仍不清晰。本研究通过野外调查、物理实验和数值模拟等方法, 调查泥石流承灾体群体效应特征, 反演泥石流冲击流场分布和建筑损伤过程, 提出了一套建筑群对泥石流的承灾动力响应特征分析方法。研究结果表明: (1) 泥石流流场存在放大作用。面对泥石流冲击, 建筑群的破坏导致沟道区域流速增加 20%, 建筑群区域流速增加 46%。(2) 泥石流流场存在绕流现象。建筑群阻碍泥石流直进运输, 导致建筑拐角之间存在局部压力高度集中现象。(3) 在建筑群中存在明显的遮蔽效应。失去建筑的上游遮蔽保护可使下游建筑受到的泥石流冲击强度增加 120%。(4) 泥石流致灾过程中, 建筑群周边与内部的泥石流冲击特征差异明显。在建筑群外围, 受前排建筑破坏的影响, 泥石流流线后排建筑受泥石流冲击时刻提前 10 s, 泥石流冲击强度增加速率达 2.1 倍; (5) 泥石流对建筑群内建筑冲击强度分为冲击力急剧增加—缓慢增加—逐渐稳定三个阶段, 对应泥石流流深增高、缓慢淤积过程。研究结果可以为泥石流易发区村落城镇的建筑规划布局和防灾减灾措施提供科学参考。

关键词: 建筑群; 黑水沟; 泥石流; 承灾动力响应

中图分类号: P954

文献标志码: A

中国山区约有 1300 多座村镇遭受泥石流的威胁^[1-2]。泥石流下泄冲击山区下游村镇, 对修建在泥石流堆积扇或山前坡地上的各类民建设施形成一种承灾体群体效应^[3]。由民房、道路桥梁、电力水利设施等为主体构成的沟口建筑群, 如处于泥石流行洪范围内, 其分布格局、结构形式等因素将干扰泥石流运动方式, 这给泥石流风险评估来了困难^[4]。

针对泥石流动量分区评估, 现有数值模拟软件并不能很好地反映承灾群体效应。例如, Flo-2D 应用程序基于质量守恒和动量守恒方程的二维计算模型, 虽然可用来分析泥石流危险性^[5], 但难以在三维情境下充分考虑泥石流对建筑结构的影响; 基于深度积分连续介质力学方法^[6]的 Massflow 地表过程动力学模型^[7], 并未涉及流体和建筑结构的耦合

收稿日期 (Received date): 2023-06-25; **改回日期** (Accepted date): 2024-02-02

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (42171085); 中国科学院西部之光基金 (xbzg-zdsys-202104); 四川省科技厅计划 (2023YFS0434)。[National Nature Science Foundation of China (42171085); West Light Foundation of Chinese Academy of Sciences (xbzg-zdsys-202104); Sichuan Science and Technology Planning Program (2023YFS0434)]

作者简介 (Biography): 姚鸿坤 (1997-), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要研究方向: 山地灾害动力过程。[YAO Hongkun (1997-), male, born in Jian, Jiangxi province, M. Sc. candidate, research on the dynamic process of mountain disasters] E-mail: yhk@imde.ac.cn

*** 通讯作者** (Corresponding author): 邹强 (1982-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 山地灾害致灾机理与风险。[ZOU Qiang (1982-), male, Ph. D., professor, research on disaster-causing mechanisms and risks of mountain hazards] E-mail: zouqiang@imde.ac.cn

效应。在一些实验研究中,多侧重于泥石流对单体建筑的冲击作用^[8-11],忽略了建筑群的联合影响^[11-14]。研究发现^[15],当泥石流冲击建筑结构群时,个体结构之间存在相互干扰流场现象,泥石流的演进过程与无障碍流场存在明显的差异性。然而,目前对于这一现象的研究,还局限于海啸^[16-18]和洪水^[19-23]等灾种,针对泥石流对建筑群的承灾动力响应的认识并不充分。

本文采用野外调查、室内实验以及三维反演等研究方法,引入流固耦合模型,提出了一套分析建筑群对泥石流动力响应特征的方法;以 2022 年 7 月 12 日四川省绵阳市平武县木座乡黑水沟泥石流灾害事件为案例,使用计算流体力学应用程序,分析泥石流动力反馈过程,评估建筑群受损程度,验证方法的准确性。研究结果填补了泥石流对建筑群承灾动力响应特征研究的空白,对山区泥石流多发区村镇规划布局和防灾减灾路径具有参考价值。

1 研究区概况

黑水沟位于四川省平武县夺补河左岸,沟口坐标为 $104^{\circ}31'17.80''\text{E}$, $32^{\circ}36'18.03''\text{N}$,距平武县城 22.46 km。流域总面积达 102.66 km^2 (图 1),沟深且长,主沟长约 16.25 km,位于沟口处的流域最低点高程为 1188 m,最高点高程为 3792 m,相对高差

2604 m。流域总体南北向伸展,且北高南低。流域上游为泥石流物源区,横断面呈深切 V 型;中游为泥石流流通区,沟道逐渐变宽,横断面呈 V 型向 U 型的过渡状态;下游为泥石流堆积区,横断面呈窄深 U 型。研究区属于亚热带季风气候区,具有气候温和、降水丰沛、云多雾少等特点^[24],其中 5—9 月为雨季,降水量约占全年的 80%。该地区平均气温约为 $14.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,受地势的显著变化和高差的影响,气候特征呈现出与海拔高度相关的垂直分布。

2022 年 7 月 12 日 04:00—08:00,四川省平武县木座乡遭遇强降雨,导致黑水沟暴发大规模泥石流灾害,水电中断,截至 12 日 15:40,灾害共造成 18 人遇难或失联,数十所房屋损毁,区域内交通、电力、通信一度中断,沟口河流淤埋严重,千余位居民流离失所。

2 材料与方法

2.1 数据基础

为量化建筑物承灾强度与泥石流动力学特征,研究开展了野外考察、室内试验、遥感解译与三维场景重构等工作。其中,涉及泥石流动力学特征计算的关键参数包括泥石流粒径分布、容重、现场冲击泥痕高度等。另外,基于现场调查和无人机航测,重构

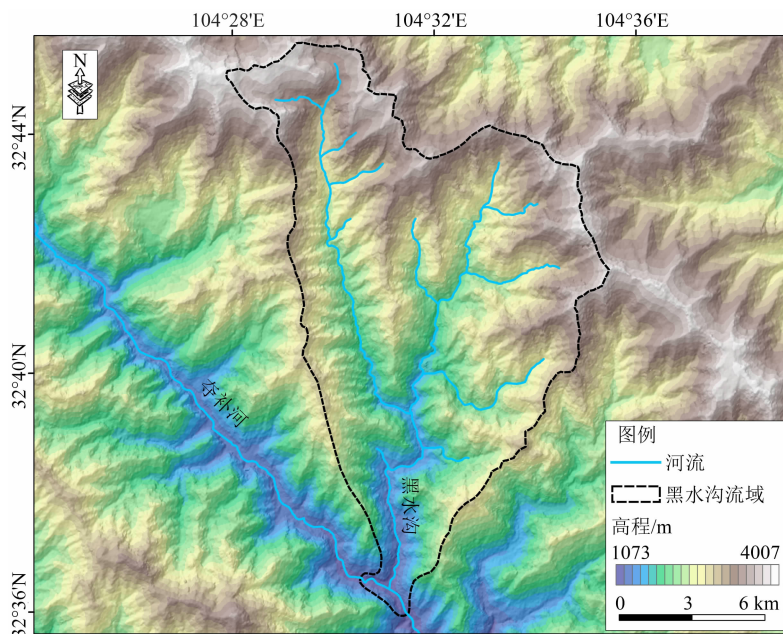


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Location of the study area

了建筑群三维空间分布与精细化的地形起伏。具体量化过程如下文所示。

2.1.1 泥石流物理参数

本研究泥石流浆体参数由 2022 年 8 月 1 日泥石流灾害事件后进行的现场采样所获取。野外主要取样工具为密封袋、铁铲,测量设备为 APRESYS LRB4000 远程激光测距仪和 MG868 户外手持 GPS 采集器。室内颗粒分析实验大颗粒采用振动筛分仪、小颗粒采用马尔文激光粒度仪测定。根据下式确定泥石流的密度:

$$y = -1.32 \times 10^3 x^7 - 5.13 \times 10^2 x^6 + 8.91 x^5 - 55x^4 + 34.6x^3 - 67x^2 + 12.5x + 1.55 \quad (1)$$

式中, y 为泥石流密度; x 为泥石流沉积物中粘土含量的百分比。

颗粒分析实验结果显示(图 2),粘土含量百分比为 1.69%。计算得到该泥石流的密度为 $1.74 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$,可以判定该泥石流属于粘性泥石流^[25]。

参考《泥石流灾害防治工程勘查规范》中相关方法^[26]计算粘性泥石流流速,计算公式如下:

$$v_c = \frac{1}{n_c} H_c^{2/3} I_c^{1/2} \quad (2)$$

式中, v_c 为泥石流初始流速; n_c 为沟道的糙率,取值为 0.10; H_c 为泥石流的流深,实测值为 3.50 m; I_c 为沟道的比降,实测值为 0.19。将以上参数代入式(2),得到 $v_c 10.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.1.2 建筑分布及特征

木座乡的建筑主要由居民自建房构成,钢筋混

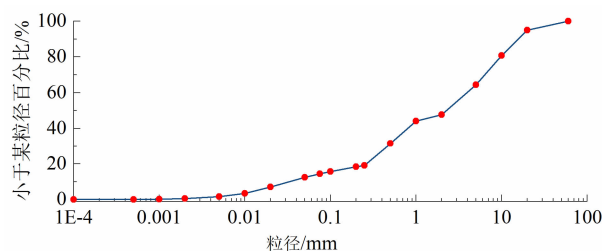


图 2 泥石流堆积物的粒径分布对数曲线

Fig. 2 Logarithmic curve of the particle size distribution of debris flow deposits

凝土建筑占比较小,多数为木结构和砖混建筑(图 3a)。钢筋混凝土建筑主要为汶川地震后新建的建筑,其中包含木座乡小学和木座乡医院两处建造等级和规模较大的钢筋混凝土框架建筑,这类建筑都分布在黑水沟的右岸,为 3~4 层,具有较好的抵抗泥石流冲击破坏的能力。此外还有 19 栋砖混建筑分布在木座乡场镇,该处这类建筑分布较为分散,由于主要由砖石混凝土修建,其墙面和柱体抗剪切能力较低,易被泥石流剪切破坏。分布最多的建筑类型为木结构,这类结构类型的建筑抗泥石流冲击破坏的强度低且桩基较浅,极易被整体推倒,多为 1~2 层,共有 62 栋建筑都为此种结构类型(图 3b)。

2.2 模型构建

模型计算有以下假定前提。首先,建筑物被视为存在的且会对泥石流运移过程产生影响。其次,当泥石流对建筑的冲击压强达到建筑的强度阈值时,建筑将被整体破坏。建筑被摧毁后不考虑建筑结构的毁坏过程,并且不考虑建筑碎片对后排建筑

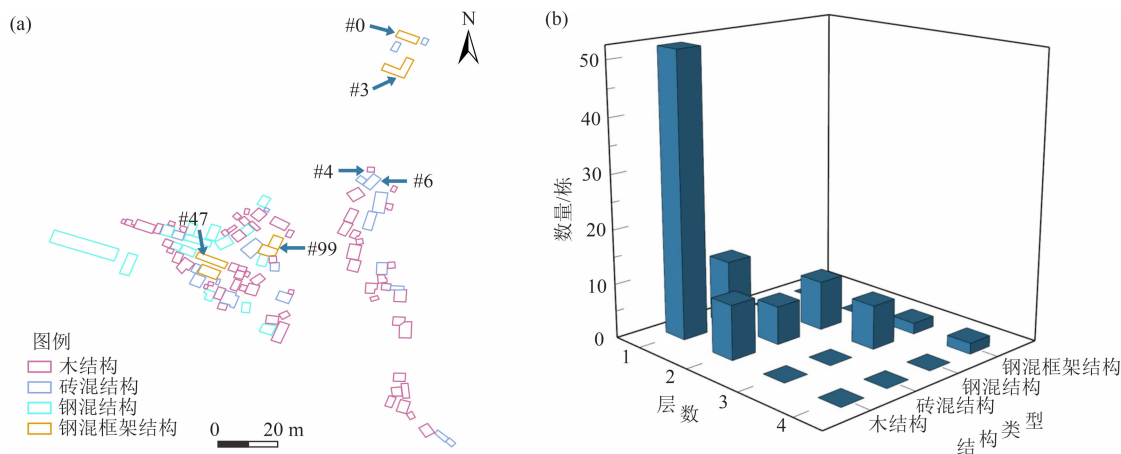


图 3 建筑分布及类型:(a)不同结构类型建筑分布;(b)结构类型和数量统计

Fig. 3 Distribution and types of buildings: (a) distribution of buildings with different structural types;

(b) statistical chart of structural types and quantities

的影响。泥石流浆体被假设为均匀的各向同性流体,在流动过程中保持其性质的均匀不变性,且不发生热传递现象。此外,沟道的形变和体积变化被认为恒定不变,泥石流不会对沟道造成侵蚀和夹带作用。在建立实际地形时遵循由点到线、由线组面、由面成体的建模思路。另外,对于具有粘塑性特性的流体而言,泥石流的模型可以应用宾汉流体模型^[27]描述其流变关系^[28]。

2.2.1 几何模型

为真实反映泥石流冲击过程,使用精度为 0.01 m 的大疆 Mavic II pro 无人机获得黑水沟沟口三维数字高程影像(图 4a)。为实现计算效率,在建立模型时使用 GIS 工具对其进行抽稀处理,将导出后的等高线数据建立不规则的地形曲面模型。在计算尺寸的选择时,只选取沟口建筑群部分作为计算域。泥石流通道长 621 m,沟道口宽 805 m,最大高差为 80 m。依据卫星影像和无人机数据确定建筑在沟道的位置坐标、平面长宽,由现场实测获得建筑高度数据。按 1:1 的比例建立建筑几何实体模型,忽略建筑设计细节以保证计算结果收敛精度(图 4b、图 4c)。

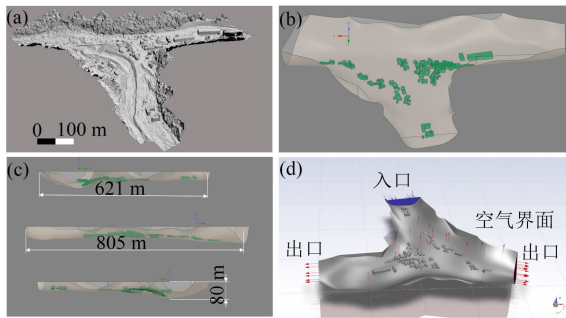


图 4 计算模型构建过程:(a)无人机扫描模型;
(b)几何实体模型;(c)1:1模型尺寸;(d)边界条件设定
Fig. 4 Construction process of computational model:
(a) unmanned aerial vehicle scanning model establishment;
(b) geometric entity model establishment; (c) 1:1 model
dimensions setting; (d) boundary condition setting

泥石流流域由地形与建筑实体模型切割空气区域构成。泥石流初始流速依据计算获得,初始流深根据《勘查规范》^[26]中给出的泥石流最大冲高公式计算:

$$H = \frac{v_c^2}{2g} \quad (3)$$

式中, H 为初始流深; g 为重力加速度。将 H 设置

为初始流深。经计算取 H 值为 5 m。

2.2.2 定义流体材料

在固体颗粒之间的摩擦碰撞和液相泥浆之间的粘滞力传递的过程中,动量起着重要作用。采用的宾汉模型通过宾汉极限剪切应力和粘滞系数描述颗粒之间的相互作用力,并强调泥石流中液相浆体的作用,忽略大颗粒之间相互碰撞对阻力的影响。因此,该模型适用于主要由细颗粒组成的粘性泥石流^[29]。宾汉模型的流变方程如下:

$$\tau = \tau_B + \mu \frac{du}{dy} \quad (4)$$

式中, τ 为泥石流的剪应力; τ_B 为宾汉体极限剪应力; μ 为粘滞系数; du/dy 为剪切速率。在计算程序中采用 Herschel-Bulkley 模型表示宾汉体流动,其流变方程如下:

$$\begin{aligned} \text{当 } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0 = \frac{\tau_0}{\mu_0} \text{ 时,} \\ \eta = k \dot{\gamma}^{n-1} + \tau_0 \dot{\gamma}^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{当 } \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0 = \frac{\tau_0}{\mu_0} \text{ 时,} \\ \eta = k(\dot{\gamma}_0)^{n-1} [(2-n) + (n-1)\dot{\gamma} \cdot \dot{\gamma}_0^{-1}] \\ + \tau_0 \left(2 - \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0}\right) \dot{\gamma}^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; $\dot{\gamma}_0$ 为临界剪切速率; τ_0 为初始屈服应力,为 16.00 Pa; μ_0 为屈服粘度; η 为粘度; k 为流变曲线中的斜率表示塑性粘度,为 0.70 Pa·s; n 为幂律指数,当 n 取值为 1 时为宾汉体流动。

2.3 求解过程

泥石流的运动过程通过有限体积法求解,流体粘性模型采用 k-eps 模型。泥石流为不可压缩粘性流体,主要为求解质量和动量守恒对应的连续方程和动量方程。

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

动量方程为:

$$\begin{cases} \rho \frac{dv_x}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \rho \frac{dv_y}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \\ \rho \frac{dv_z}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \end{cases} \quad (8)$$

式中, ρ 为流体密度; t 为时间; v_x 、 v_y 、 v_z 为速度分量。

k-eps 模型湍流动能 k 和耗散率 ε 表达分别为:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t \Phi - \rho \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \Phi - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

式中, Φ 为粘性耗散; u_i 为第 i 个法向流速; μ_t 为湍流粘度; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 σ_k 和 σ_ε 为系数, 其值常为半经验系数, 取值分别为 1.44、1.92、1.0 和 1.3。

2.3.1 边界条件

边界条件设定对泥石流动力学特征反演至关重要。泥石流的冲击力主要集中在龙头, 并与时间密切相关, 本研究采用瞬态分析进行计算, 时间步长为 5×10^{-3} s, 总计算时间为 125 s, 共 2.5×10^4 次计算步。此外, 由于仅计算泥石流对沟口建筑群的冲击过程, 计算时间较短, 按照图 4d 设定边界条件, 泥石流入口设置为流速入口, 与空气接触的边界设置为开放边界, 出口设置为压力出口, 周围山体设置为壁面边界, 沟道底部设置为底部壁面边界, 山体和沟道底部摩擦系数均设置为 0.5, 建筑壁面设置为流固耦合边界, 摩擦系数设置为 0.2。

2.3.2 建筑失效判定依据

建筑物的结构损坏与泥石流冲击的侧向力 F_y 引起的位移量 d_y 密切相关^[30]。图 5a~5c 显示了建筑从轻微损伤到倒塌的损伤状态, 屈服能力 (F_y , d_y) 是曲线上 (图 5d) 建筑物开始发生永久横向位移的点, 暗示随着侧向力的增加导致建筑永久变形后失稳倒塌。曲线中最终抵抗阈值 (F_u , d_u) 表示可能发生结构失效或倒塌的点。Jakob^[31] 等在 2012 年描述了泥石流事件的危险强度, 并引入解释泥石流流动特性和冲击力变化的其他变量。基于 HAZUS 手册^[32-33], 泥石流作用于建筑物的横向综合力 F_{DF} 可以表示为:

$$F_{DF} = K_d (0.5 \cdot \rho C_d B (h v^2)) \quad (11)$$

式中, K_d 为非维度泥石流撞击系数; C_d 为无量纲阻力系数; B 为建筑宽度, 垂直于流动方向测量; $h v^2$ 为动量通量, 定义为流动深度与最大流速的平方的乘积。在泥石流建模中, 式(11)表示为建筑物撞击现场计

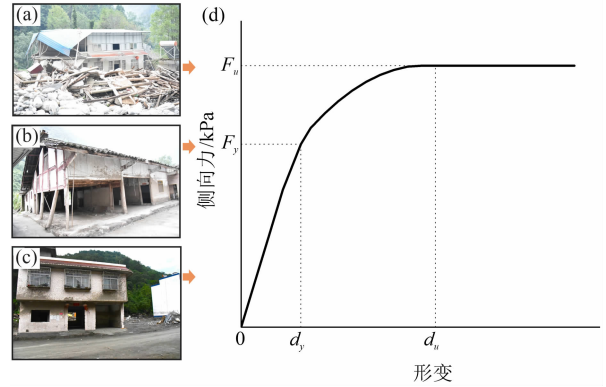


图5 建筑失稳判定:

(a) 失稳倒塌; (b) 中等损伤状态;

(c) 轻微损伤状态; (d) HAZUS 手册建筑推覆曲线^[32-33]

Fig. 5 Assessment of building instability:

(a) instability collapse; (b) moderate damage;

(c) slight damage; (d) building pushover curve derived from

HAZUS manual^[32-33]

算的泥石流水力模型代表的一维平均力。

借鉴 HAZUS 海啸模型, 研究量化泥石流冲击力和建筑抵抗能力, 推导农村山区环境中常见的建筑类型的推覆曲线。虽然结构损坏与横向建筑位移量直接相关, 但可以使用常见建筑原型的推覆曲线将预期的损坏水平与泥石流事件的相应物理力联系起来。通过实际调查将木座乡的建筑划分为四类: 木结构、砖混结构、钢混结构和医院、学校等钢混框架结构四种类型的建筑。依据前人对建筑结构抗冲击破坏的研究^[4-5, 34-41] (图 6), 拟合建筑破坏曲线方程为:

$$F_u = -7.33 \cdot (1 - 2.56^d) \quad (12)$$

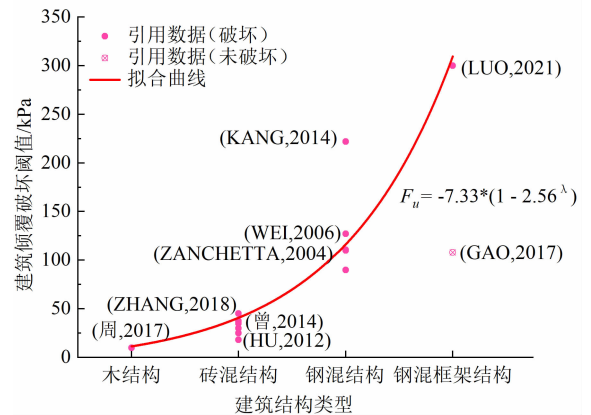


图6 不同结构类型建筑倾覆破坏阈值拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of overturning damage thresholds for buildings with different structural types

式中, λ 为建筑类型, 木结构到钢筋混凝土框架结构依次取值为 1~4, 可得出其对应抗冲击破坏强度阈值(表 1)。

表 1 建筑倾覆破坏阈值表

Tab. 1 Threshold of building overturning damage

建筑类型 λ	阈值 F_u/kPa
木结构	>11
砖混结构	>41
钢混结构	>116
医院、学校等钢混框架结构	>309

当泥石流的冲击压强大于建筑抵抗强度时建筑发生倾覆破坏。

$$F_{DF} > F_u \quad (13)$$

式中, F_{DF} 为泥石流作用于建筑的综合力; F_u 为建筑抵抗阈值。

3 响应特征分析

3.1 泥石流运移过程

通过对黑水沟泥石流冲击过程的模拟, 获得泥石流流体与社区建筑群在不同时刻的相互作用流速云图(图 7)。泥石流在黑水沟冲击建筑群的过程中, 流速和冲击力呈现明显的时空变化。初始时刻

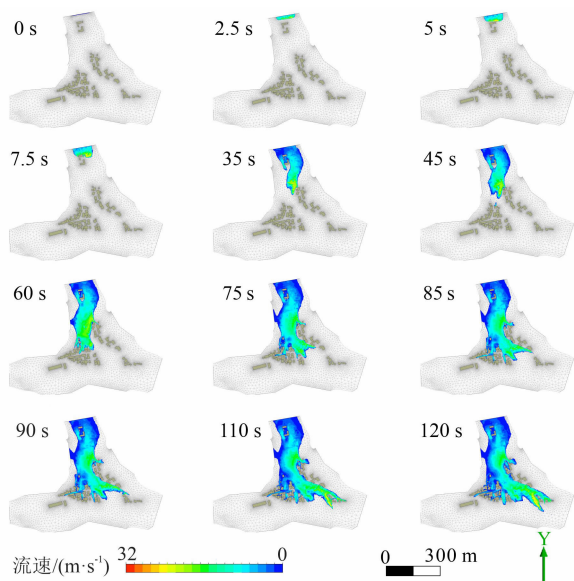


图 7 典型时刻速度云图

Fig. 7 Velocity cloud at typical times

泥石流流速为 $10.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 与前文计算结果 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 相近, 初步验证了模拟结果的可靠性。在木座乡小学处达到最大流速 $14.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在建筑物聚集区, 泥石流流速峰值为 $15.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。冲击过程中, 建筑物受泥石流侧面刮蚀整个过程在 130 s 左右完成。

3.2 泥石流与建筑动力响应

在泥石流对建筑群的冲击过程中, 单体建筑之间存在互相影响, 前排和靠近沟道的建筑出现应力集中现象。建筑壁面压强主要分布在泥石流迎流面区域, 前排建筑直接暴露在泥石流的冲击作用中, 后排建筑受到前排建筑的遮蔽作用。若不考虑前排建筑受泥石流冲击导致的破坏, 则会远远低估后排建筑受到的泥石流冲击作用。

3.2.1 建筑破坏状态下的泥石流流速场

当不考虑建筑失效时, 在 120 s 时泥石流流场线主要集中在沟道和街道的通道位置, 如图 8a、8d 所示。在泥石流爆发时, 沟道流通断面难以承载泥石流的巨大流量, 大量房屋受到泥石流的冲击。根据图 8d 可知, 泥石流在沟道右岸的建筑群中冲出了一条通道, 其中沟道中心流速为 $11.5 \sim 14.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 增加 26.10%。此外, 由于建筑的联级倾覆破坏, 在木座乡场镇建筑群附近被贯穿出一条通道(图 8b、8e), 原本阻塞泥石流运移的建筑群出现了第二个流通通道, 该通道在 65 s 时的流速最高, 达 $15.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

木座乡小学附近(图 8c、8f), 由于前排#1 砖石建筑被摧毁, 而#0 建筑并未损坏, 增加了该处的流通宽度, 使得#3 建筑受泥石流的冲击状态发生了改变。#3 建筑前泥石流流速由 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $1.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 并且在木座小学 4 栋建筑中间通过流线可以明显发现涡流现象变得紊乱。

泥石流破坏建筑后, 观察到沟道处 M 点的建筑群区域 N 点的流速显著增加(图 9)。其中 M 点最大流速提高 $6.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, N 点最大流速增加 $4.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 且两者的流速突变时间提前 10 s。在 90~120 s 的流速稳定阶段, M 点平均流速增加了 46.54%, 而 N 点平均流速增加了 20.97%。

3.2.2 泥石流冲击下的建筑壁面压力

当不考虑大石块的影响时, 建筑被粘性泥石流冲击时主要承受的是泥浆的动压力。在泥石流冲击过程中, 建筑群的壁面应力主要集中在前排建筑迎

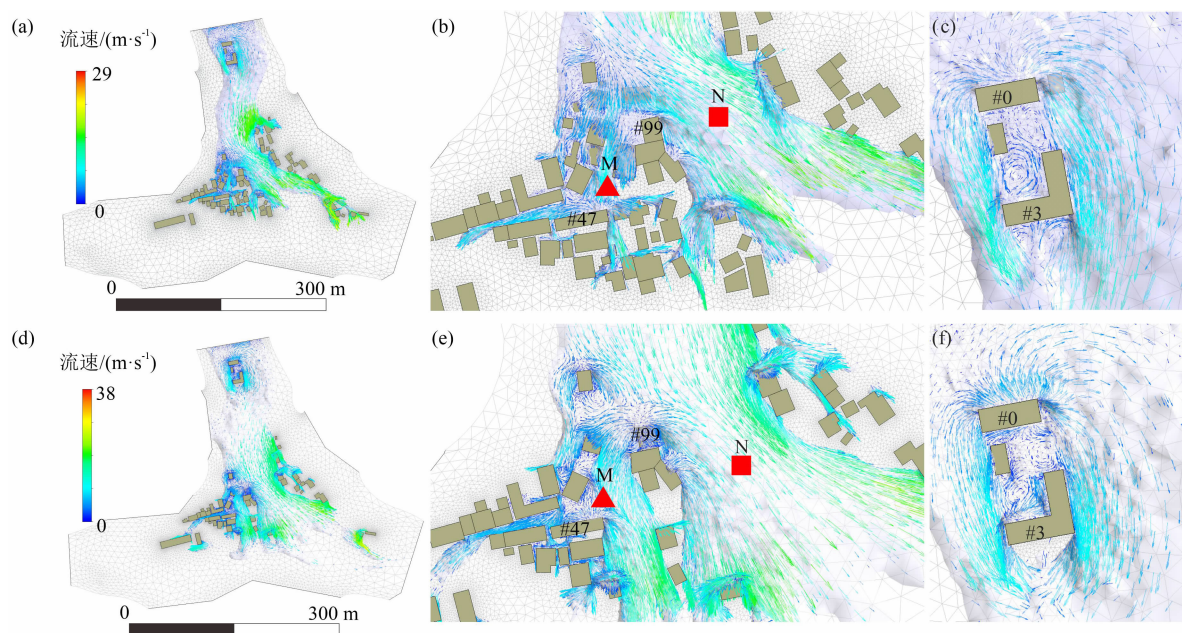


图 8 120 s 时流速场对比图: (a、d) 泥石流流速; (b、e) 木座乡乡镇位置的泥石流流速; (c、f) 木座乡小学位置的泥石流流速

Fig. 8 Comparison of velocity field (120 s): (a, d) velocity of gully outlet;

(b, e) debris flow velocity around Muzuo township community; (c, f) debris flow velocity around Muzuo primary school

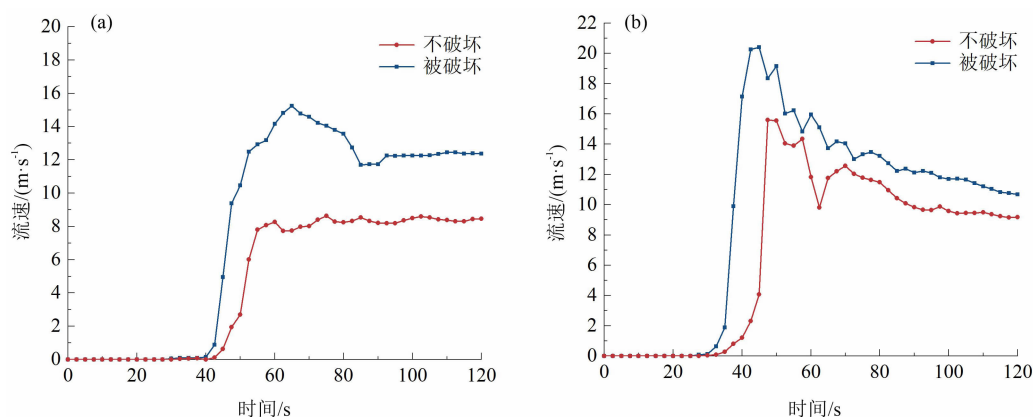


图 9 泥石流流速变化: (a) M 点流速变化; (b) N 点流速变化

Fig. 9 Change of debris flow velocity: (a) point M; (b) point N

流墙壁面,如图 10a、10d 所示。后排建筑由于受到前排的遮蔽作用,其受到泥石流的冲击强度和壁面压力均低于前排建筑。根据图 10b 和图 10e 可知,当建筑不被破坏时,受遮蔽的建筑遭受泥石流冲击的损伤状态远小于前排建筑被破坏时。

泥石流浆体对建筑的冲击主要集中在建筑的迎流面和转角位置,并且受前排建筑的影响较大。在 #0 建筑区域,破坏前主要压强集中于迎流面,而破坏后迎流面监测点的最大压强急剧增加(图 11a)。#3 建筑受到的压力主要集中在 20 ~ 30 和 30 ~ 40 两处墙面,呈显著增加趋势(图 11b)。#47 建筑,在

建筑群逐渐受到泥石流冲击后,位于新通道右岸的压力急剧上升(图 11c)。而 #99 建筑在前排建筑破坏后,最大压力增幅显著(图 11d)。这些观察结果揭示了泥石流对建筑群不同区域压力的异质性影响,尤其是建筑受损后,压力显著增大,突显了建筑受损对泥石流冲击强度的显著影响。

3.2.3 泥石流冲击力

图 12 为 #47 和 #99 两处建筑前端泥石流冲击力的时程曲线,各个时刻的冲击力均为建筑壁面压强最大值点所对应的数值。在建筑群不被破坏时, #47 建筑为建筑群外侧,该处泥石流冲击力从 42.5 s 至

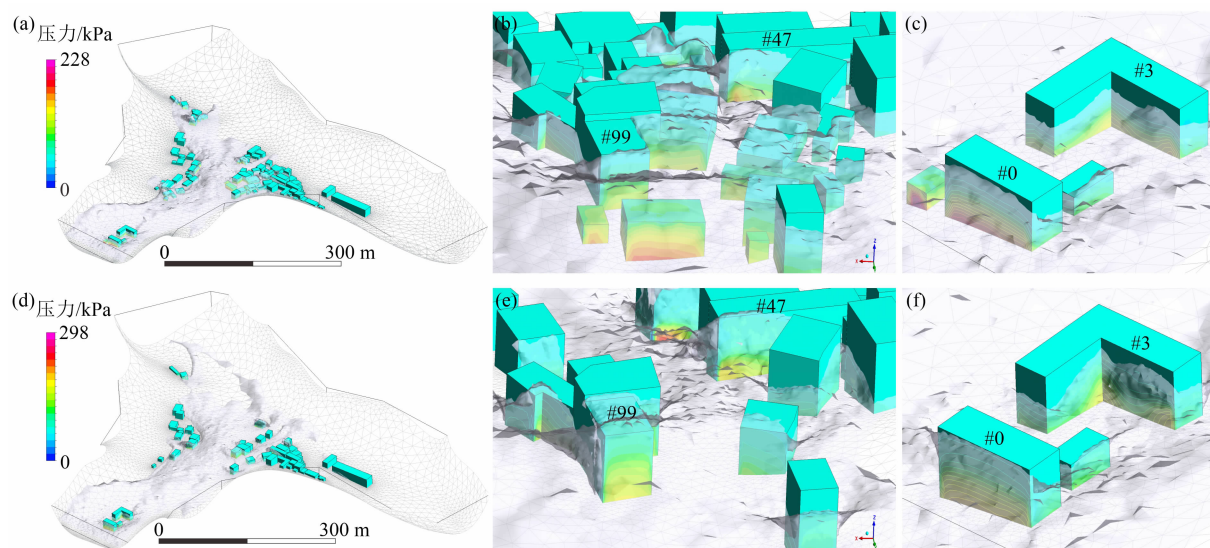


图 10 120 s 时建筑压力云图:

(a、d) 建筑群壁面压强; (b、e) 木座乡乡镇建筑压力云图; (c、f) 木座乡小学建筑压力云图

Fig. 10 Pressure cloud of buildings at 120 seconds: (a, d) pressure exerted on building cluster walls at the gully outlet;

(b, e) pressure cloud of buildings in Muzuo township community; (c, f) pressure cloud of buildings in Muzuo primary school

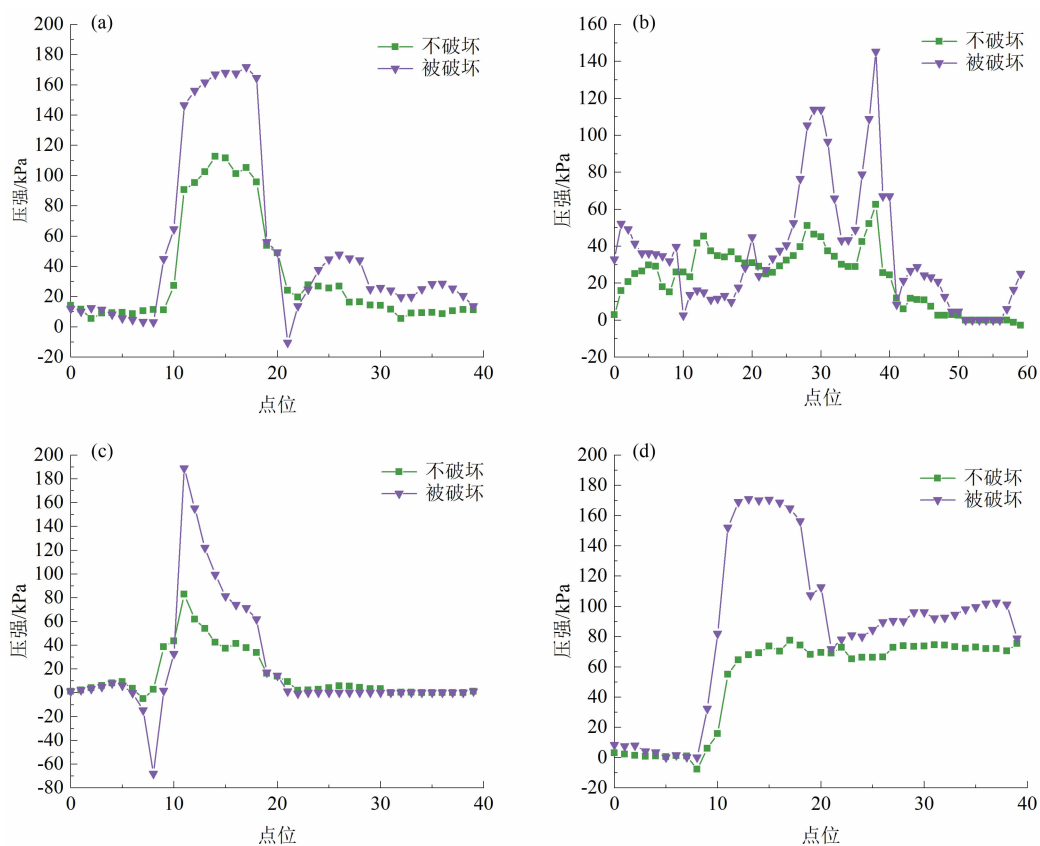


图 11 建筑壁面压强变化:

(a) #0 建筑; (b) #3 建筑; (c) #47 建筑; (d) #99 建筑

Fig. 11 Pressure variation of building walls:

(a) building No. 0; (b) building No. 3; (c) building No. 47; (d) building No. 99

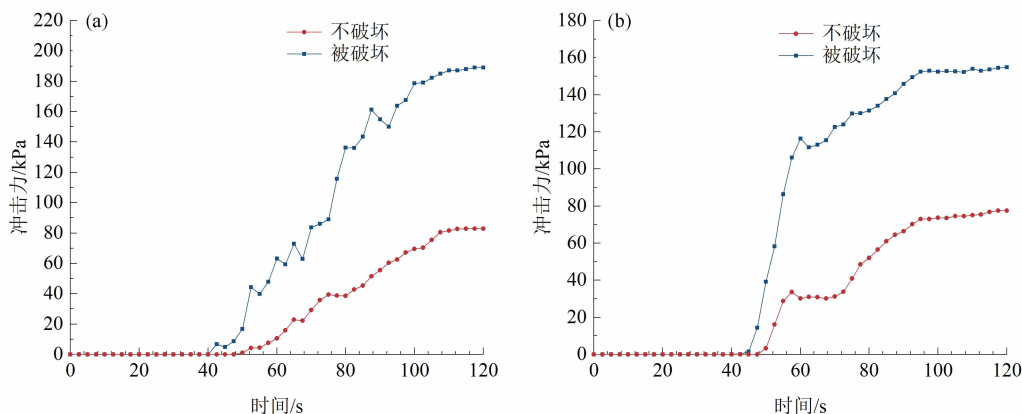


图 12 泥石流冲击力变化时程曲线:(a) #47 建筑前;(b) #99 建筑前

Fig. 12 Time-history curves illustrating debris flow impact force variations:

(a) in front of building No. 47; (b) in front of building No. 99

120 s 逐渐增加,而建筑被破坏时,泥石流冲击时间提前了约 10 s,且泥石流冲击力增加数值明显大于建筑不破坏情况,其增加速率与建筑破坏过程相关,被破坏后比不破坏状态增加了 2.07 倍。#99 建筑为建筑群内部建筑,该处泥石流冲击力主要分为三个阶段,第一阶段为 37.5 ~ 60 s,冲击力急剧增加,对应泥石流不断冲起爬高阶段;第二阶段为 60 ~ 95 s,冲击力缓慢增加,对应泥石流冲起衰弱阶段;第三阶段为 95 ~ 120 s,冲击力趋于稳定,对应泥石流浆体缓慢淤积阶段。

3.3 结果验证

3.3.1 建筑群破坏结果验证

在最终的模拟结果中,有 11 栋房屋与灾后现场调查结果不一致(图 13),其中 5 栋房屋(#1、#19、#37、#39、#60)在计算中呈现出损毁状态,而实际上并未完全被摧毁,通过现场观测推断是建筑主要支撑构件未受到泥石流冲击所致。剩余 6 栋建筑(#21、#22、#23、#24、#93、#97)则是在灾害现场被完全摧毁,但是计算结果却显示其并未被破坏,出现此误差的原因可能是建筑的施工设计和建造年龄导致整体强度发生变化。其余 40 栋被破坏的建筑和 51 栋未被破坏的建筑结果与现场一致,模拟结果较为接近灾后现场调查。

3.3.2 泥石流泥位对比

选取位于木座乡场镇主要街道的泥石流垂直截面(A-A')拟合泥石流泥位曲线(图 13),依据泥深结果显示,建筑群存在且不考虑破坏时,图中 A-A' 切面位置的泥位模拟深度低于现场实际观测值。

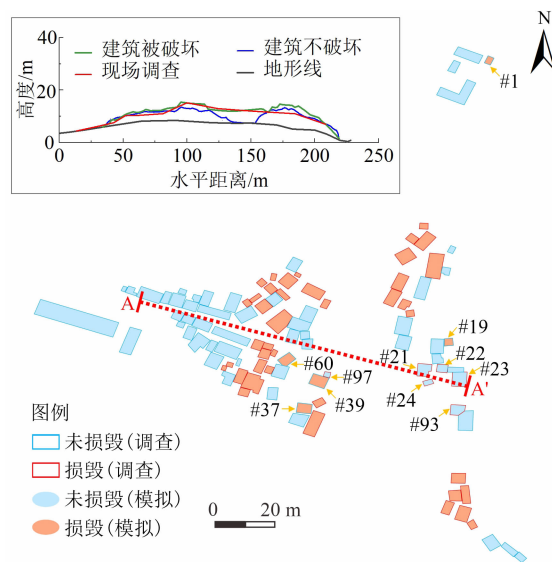


图 13 模拟结果和现场调查验证

Fig. 13 Simulation results and field investigation validation

这种误差是由于建筑的存在阻碍了泥石流在建筑群中的淤积和减缓了冲击过程,而考虑建筑破坏导致的泥位与灾害现场实测曲线契合度较高。因此,考虑建筑逐渐破坏的计算结果更为接近现场调查数据。

4 讨论与结论

4.1 讨论

泥石流对建筑物的冲击过程较为复杂,而泥石流流作用对建筑群的破坏效应研究更是一大挑战。针对建筑群对泥石流等灾害的承灾响应问题,本文研

究了建筑群被泥石流破坏后与破坏前的流场特征和建筑动力响应变化特征,将建筑群损伤破坏模拟计算结果与灾害后的现场调查结果进行比较,结果表明考虑建筑破坏的计算结果更接近真实调查情况,验证了计算结果具有准确性与可靠性。在泥石流运动过程中,泥石流中的大颗粒撞击^[11,14,25]是建筑结构破坏的主要原因,利用宾汉体模型难以体现颗粒撞击过程,降低了泥石流对外层建筑的冲击力,计算结果有失准确性。在未来的研究中应该充分考虑流体和颗粒的共同作用。另外,泥石流形成演化致灾过程较为复杂,虽然已有大量文献对泥石流形成演化过程进行了充分研究,但对建筑区域的致灾过程还有待完善。

本文结合 7·12 黑水沟泥石流灾害事件,重点研究了泥石流对沟口建筑群的致灾过程。建筑的遮蔽作用长期影响山洪泥石流导致建筑受损的评估研究进展^[11,15],本文的研究结果初步揭示了泥石流和山洪演进过程中前排建筑对后排建筑的遮蔽作用规律。此外,在本研究中考虑了泥石流对建筑的破坏过程,对以往将建筑考虑为不被破坏的刚体研究有所改进^[5],丰富了建筑群与泥石流相互作用过程的研究内容。但是与单体建筑的破坏过程相比较^[13-14],本文对于建筑物的强度判定没有考虑建筑具体的结构设计类型、材料强度和空间规模大小,导致建筑的强度失稳阈值还存在较大的不准确。由于本文的研究围绕一次灾害事件展开,还存在应用推广的局限性,在后续研究中需补充不同类型泥石流的流量、流速和流深变化导致的冲击强度和倾覆力矩^[40]变化,以及泥石流对不同结构设计类型的建筑作用的动态过程分析,为山区建筑群布局设计和泥石流易发区灾害风险评估提供更为有效的指导。

4.2 结论

本文分析了考虑建筑群的泥石流运移过程和流场特征,建立了一套评估建筑群对泥石流承灾动力响应的分析方法,主要结论如下。

(1)在黑水沟泥石流事件中,木座乡建筑群对泥石流冲击具有明显的增阻作用,建筑群的存在使得建筑区域泥石流流向分布发生改变,造成泥石流的流动速度降低。考虑建筑群破坏的情况下,黑水沟沟道区域流速增加 20%,建筑群区域流速增大 46%。与灾害后的现场调查结果相比较,考虑建筑破坏的泥石流致灾过程与实际灾害过程更为符合。

(2)建筑群在泥石流流场中的影响导致建筑物拐角之间出现局部压力高度集中的现象,流体呈现出一种复杂的流动形态。另外,建筑群中存在明显的遮蔽效应,前排建筑的破坏使得后排建筑最大增加 1.2 倍的泥石流冲击强度,这导致泥石流灾害的破坏力进一步放大。

(3)建筑群的周边和内部呈现出明显的泥石流冲击特征差异。在建筑群外围,受前排建筑破坏的影响,后排建筑在泥石流冲击发生时提前了 10 s,且泥石流冲击的强度增加速率达到 2.1 倍;在建筑群内部,泥石流冲击的强度经历了冲击力急剧增加—缓慢增加—逐渐稳定的 3 个阶段,这对应着泥石流浆体从冲起到逐渐稳定淤积的过程。

参考文献 (References)

- [1] 谢洪, 钟敦伦, 韦方强, 等. 我国山区城镇泥石流灾害及其成因[J]. 山地学报, 2006, 24(1): 79-87. [XIE Hong, ZHONG Dunlun, WEI Fangqiang, et al. Debris flow hazards and their formation causes in mountain urban area of China [J]. Mountain Research, 2006, 24(1): 79-87] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2006.01.011
- [2] 崔鹏, 韦方强, 谢洪, 等. 中国西部泥石流及其减灾对策[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 142-151. [CUI Peng, WEI Fangqing, XIE Hong, et al. Debris flow and disaster reduction strategies in western China [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 142-151] DOI: 10.3321/j.issn:1001-7410.2003.02.004
- [3] DU Jun, HE Xiaoyan, WANG Zhaoyin, et al. Experimental study of the interaction between building clusters and flash floods [J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(5): 1334-1344. DOI: 10.1007/s11629-014-3170-6
- [4] 曾超. 泥石流作用下建筑物易损性评价方法[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 128-144. [ZENG Chao. Vulnerability assessment of building to debris flow hazard [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 128-144] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2012.11.1211
- [5] GAO L, ZHANG L M, CHEN H X. Two-dimensional simulation of debris flow impact pressures on buildings [J]. Engineering Geology, 2017, 226: 236-244. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.06.012
- [6] AN Huicong, OUYANG Chaojun, WANG Dongpo. A new two-phase flow model based on coupling of the depth-integrated continuum method and discrete element method [J]. Computers and Geosciences, 2021, 146: 104640. DOI: 10.1016/j.cageo.2020.104640
- [7] OUYANG Chaojun, ZHOU Kaiqi, XU Qiang, et al. Dynamic analysis and numerical modeling of the 2015 catastrophic landslide

- of the construction waste landfill at Guangming, Shenzhen, China [J]. *Landslides*, 2017, **14**(2): 705 – 718. DOI: 10.1007/s10346-016-0764-9
- [8] MA Xiaolong, ZHANG Wei, LI Xuan, et al. Evaluating tsunami damage of wood residential buildings in a coastal community considering waterborne debris from buildings [J]. *Engineering Structures*, 2021, **244**: 112761. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112761
- [9] 高秀青. 共生型泥石流对建筑物结构损伤的多尺度分析[J]. *灾害学*, 2020, **35**(4): 13 – 16 + 32. [GAO Xiuqing. Multi-scale analysis of damage caused by symbiotic debris flow to building structure [J]. *Journal of Catastrophology*, 2020, **35**(4): 13 – 16 + 32] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.003
- [10] LUO H Y, FAN R L, WANG H J, et al. Physics of building vulnerability to debris flows, floods and earth flows [J]. *Engineering Geology*, 2020, **271**: 105611. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105611
- [11] 曾超, 贺拿, 宋国虎. 泥石流作用下建筑物易损性评价方法分析与评价[J]. *地球科学进展*, 2012, **27**(11): 1211 – 1220. [ZENG Chao, HE Na, SONG Guohu. Analysis and assessment of methods to assess vulnerability of building in debris flow hazard [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, **27**(11): 1211 – 1220] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2012.11.1211
- [12] ZHANG J, GUO Z X, WANG D, et al. The quantitative estimation of the vulnerability of brick and concrete wall impacted by an experimental boulder [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, **16**(2): 299 – 309. DOI: 10.5194/nhess-16-299-2016
- [13] 狄生奎, 李健, 张得强. 泥石流冲击作用下框架结构的破坏机理[J]. *山地学报*, 2012, **30**(2): 201 – 206. [DI Shengkui, LI Jian, ZHANG Deqiang. Damage mechanism of frame structures impacted by debris flow [J]. *Mountain Research*, 2012, **30**(2): 201 – 206] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2012.02.006
- [14] 李聪, 邹强, 蒋虎, 等. 泥石流作用下夯土建筑灾变响应特征研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, **42**(1): 42 – 50. [LI Cong, ZOU Qiang, JIANG Hu, et al. Disaster response characteristics of rammed earth buildings to debris flow [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, **42**(1): 42 – 50] DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.200201103001
- [15] 司光武, 陈剑刚, 陈晓清, 等. 山洪对村镇建筑破坏方式与建筑防洪加固技术研究现状[J]. *科学技术与工程*, 2021, **21**(23): 9671 – 9681. [SI Guangwu, CHEN Jiangang, CHEN Xiaoqing, et al. Review of the types of rural building damage caused by the flash flood and the flood-resistant strengthening techniques [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, **21**(23): 9671 – 9681] DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.23.003
- [16] DALLOSSO F, MARAMAI A, GRAZIANI L, et al. Applying and validating the PTVA-3 Model at the Aeolian Islands, Italy: Assessment of the vulnerability of buildings to tsunamis [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, **10**(9): 1547 – 1562. DOI: 10.5194/nhess-10-2007-2010
- [17] WIJATMIKO I, MURAKAMI K. Three-dimensional numerical simulation of bore type tsunami propagation and run up on to a dike [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2010, **22**(5): 259 – 264. DOI: 10.1016/S1001-6058(09)60204-3
- [18] YANG Wanli, WEN Zhibin, LI Fuhai, et al. Study on tsunami force mitigation of the rear house protected by the front house [J]. *Ocean Engineering*, 2018, **159**: 268 – 279. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.034
- [19] VITTAL N, KOTHYARI U C, HAGHIGHAT M. Clear water scour around bridge pier group [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994, **120**(11): 1309 – 1318. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:11(1309)
- [20] KHAPLE S, HANMAIAHGARI P R, GAUDIO R, et al. Interference of an upstream pier on local scour at downstream piers [J]. *Acta Geophysica*, 2017, **65**(1): 29 – 46. DOI: 10.1007/s11600-017-0004-2
- [21] KIM H S, ROH M, NABI M. Computational modeling of flow and scour around two cylinders in staggered array [J]. *Water*, 2017, **9**(9): 654. DOI: 10.3390/w9090654
- [22] MALIK R, BALDEV S. Local scour around closely placed bridge piers [J]. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 2018: 396 – 403. DOI: 10.1080/09715010.2018.1559772
- [23] MALIK R, BALDEV S. Interference between pier models and its effects on scour depth [J]. *SN Applied Sciences*, 2020, **68**(2): 68. DOI: 10.1007/s42452-019-1868-3
- [24] 柳金峰, 游勇, 陈兴长. 震后堵溃泥石流的特征及防治对策研究——以四川省平武县唐房沟为例[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, **42**(5): 68 – 75. [LIU Jinfeng, YOU Yong, CHEN Xingchang. The characteristics and countermeasures of dam-breaking debris flow after Wenchuan Earthquake: A case study of the Tangfang Gully in Pingwu county, Sichuan province [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, **42**(5): 68 – 75] DOI: 10.15961/j.jsuese.2010.05.007
- [25] 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]
- [26] DZ/T 0220-2006. 泥石流灾害防治工程勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [DZ/T 0220-2006. Specification of geological investigation for debris flow stabilization [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2006]
- [27] WHIPPLE K X. Open-channel flow of Bingham fluids: Applications in debris-flow research [J]. *Journal of Geology*, 1997, **105**(2): 243 – 262. DOI: 10.1086/515916
- [28] LI Yanggui, WANG Lei, ZHAO Yun, et al. Numerical

- investigation of the flow characteristics of Bingham fluid on a slope with corrected smooth particle hydrodynamics [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**: 1–14. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1060703
- [29] RICKENMANN D, LAIGLE D, MCARDELL B W, et al. Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events [J]. *Computational Geosciences*, 2006, **10**(2): 241–264. DOI: 10.1007/s10596-005-9021-3
- [30] PRIETO J A, JOURNEY M, ACEVEDO A B, et al. Development of structural debris flow fragility curves (debris flow buildings resistance) using momentum flux rate as a hazard parameter [J]. *Engineering Geology*, 2018, **239**: 144–157. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.03.014
- [31] JAKOB M, STEIN D, ULMI M. Vulnerability of buildings to debris flow impact [J]. *Natural Hazards*, 2012, **60**(2): 241–261. DOI: 10.1007/s11069-011-0007-2
- [32] FEMA P-58, Seismic performance assessment of buildings [S]. Alaska, CA, 2014. DOI:10.4231/D3ZW18S8N
- [33] FEMA P-646, MAHONEY M. Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis [S]. Redwood City, CA, 2008
- [34] KANG H S, KIM Y T. Physical vulnerability function of buildings impacted by debris flow [J]. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 2014, **14**(5): 133–143. DOI: 10.9798/KOSHAM.2014.14.5.133
- [35] WEI Fangqiang, HU Kaiheng, LOPEZ J L, et al. Method and its application of the momentum model for debris flow risk zoning [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(6): 594–598. DOI: 10.1360/03tb9126
- [36] HU Kaiheng, CUI Peng, ZHANG Jianqiang. Characteristics of damage to buildings by debris flows on 7 August 2010 in Zhouqu, western China [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, **12**(7): 2209–2217. DOI: 10.5194/nhess-12-2209-2012
- [37] LUO H Y, SHEN P, ZHANG L M. How does a cluster of buildings affect landslide mobility: A case study of the Shenzhen landslide [J]. *Landslides*, 2019, **16**(12): 2421–2431. DOI: 10.1007/s10346-019-01239-y
- [38] LUO H Y, ZHANG L M, WANG H J, et al. Process of building collapse caused by the Po Shan Road landslide in Hong Kong on 18 June 1972 [J]. *Landslides*, 2021, **18**(12): 3769–3780. DOI: 10.1007/s10346-021-01745-y
- [39] ZANCHETTA G, SULPIZIO R, PARESCI M T, et al. Characteristics of May 5–6, 1998 volcanoclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): Relationships to structural damage and hazard zonation [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, **133**(1–4): 377–393. DOI: 10.1016/s0377-0273(03)00409-8
- [40] ZHANG Shuai, ZHANG Limin, LI Xueyou, et al. Physical vulnerability models for assessing building damage by debris flows [J]. *Engineering Geology*, 2018, **247**: 145–158. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.10.017
- [41] 周明慧, 熊海贝, 赵书平, 等. 泥石流冲击力简化计算方法——以舟曲县三眼峪泥石流为例[J]. *山地学报*, 2017, **35**(2): 187–194. [ZHOU Minghui, XIONG Haibei, ZHAO Shuping, et al. Simplified calculation of impact force of debris flow based on the case study of Sanyan Valley debris flow [J]. *Mountain Research*, 2017, **35**(2): 187–194] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000211

Collective Effects of Debris Flow Striking on Structure Clusters Downstream: A Case Study of the Heishui Gully Debris Flow on July 12th in Pingwu County, Sichuan Province, China

YAO Hongkun^{1,2}, ZOU Qiang^{1*}, JIANG Hu^{1,2}, ZHOU Wentao^{1,2}, CHEN Siyu^{1,3}, ZHOU Bin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China)

Abstract: The destructive consequence of debris flow striking on structure clusters are subject to the placement of each structure downstream at gully mouth and their structural types. In the process of debris flows running through structure clusters, it exhibits several observable phenomena, such as flow diversion, amplification effect, and

shielding action, which are resultants of complex fluid-solid coupling mechanism; unfortunately, there was big unknown to the processes and mechanisms of the collective effects of debris flow on grouped structures.

In this study, it introduced an approach to mathematically describing the collective responses of structure clusters under striking of debris flows. It conducted field investigation, indoor experiments, and numerical simulation, then fluid stress field of debris flow was obtained for a proper interpretation of the complex process of structure damages.

(1) There was an amplification effect for debris flow running through grouped structures. Under debris flow attacking, damaging structure clusters led to an increase of 20% in flow velocity in debris flow channel and a 46% increase inside the structures.

(2) There was a flow diverging phenomenon for debris flow running through grouped structures. As debris flow traversing a structure cluster was impeded, it immediately diverged around the block in a circular pattern, leading to a localized pressure concentration at the corners of structures.

(3) There was a noticeable shielding action occurred in structure cluster during debris flow running through grouped structure. Without shelter protection from upstream structures, downstream structures experienced a heavy hit of debris flow at a maximum of 120% increase in impact strength.

(4) There were noticeable differences in responses of a structure cluster to debris flow striking at the positions of its periphery and interior. At the periphery of a structure cluster, affected by upstream structure ruined by debris flow striking, the immediately downstream structure had a 10 seconds earlier time of being attacked by debris flow, with an impact strength of increasing by 2.1 times.

(5) The impact strength of debris flow on a structure cluster could be divided into three stages; rapid increase phase, slow increase phase, and gradual stabilization phase, which corresponded to the process of increasing debris flow depth and slow siltation.

The research provide scientific references for construction layout planning and geo-disaster prevention in debris flow-prone areas of mountain villages.

Key words: structure clusters; the Heishui gully; debris flow; collective effect

(责任编辑 李嵘)