

•滑坡堰塞湖灾害机理与防控•

DOI:10.12454/j.jsuese.202300960



本刊网刊

泥石流推移掩埋建筑物影响规律试验

冯磊^{1,2},宋东日^{1,2*},陈晓清^{1,2},刘佳³,陈倩^{1,2},刘云辉^{1,2}

(1.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,四川成都610299;2.中国科学院大学,北京100049;3.重庆交通大学河海学院,重庆400074)

摘要:大规模泥石流事件中,山区民用建筑物往往被完全摧毁并被推离原来的位置,被困人员也随着建筑物被推移掩埋,导致灾后应急搜救极其困难。为此,针对建筑物在泥石流推移作用下的简化受力情况,本研究分析影响堆积位置的物理特性因素,包括泥石流Froude数、液化程度、建筑物高长比及建筑物与泥石流的高度比和密度比。通过高精度可开展分布式测量的小尺度水槽试验,研究5个物理特性因素对建筑物块体在泥石流堆积区堆积相对位置的影响规律。结果表明:1)随着泥石流体积固相含量的增大,泥石流流动性的减弱使建筑物块体在泥石流堆积区的堆积相对位置更靠近堆积前缘;2)在相同来流条件下,块体形状越扁平,块体越难被推移,被推移后运动距离也越短,堆积相对位置远离堆积前缘;3)对体积固相含量为45%和50%的泥石流进行推移试验,结果表明,建筑物块体密度越小,块体被推移距离越远,堆积相对位置更靠近堆积前缘,而对于体积固相含量为53%的泥石流,密度大的块体的堆积相对位置更靠近堆积前缘。本研究通过水槽试验揭示影响推移作用的因素,分析泥石流推移建筑物的影响规律,对于灾后应急救援定位搜救被困人员或遗体具有指导意义。

关键词:泥石流;推移作用;建筑物;理论分析;水槽试验

中图分类号:P642.23

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2025)04-0029-10

泥石流是固相土体与水混合后在沟道中快速流动的两相流体,具有爆发突然、强度大、破坏力强、范围广的特点^[1]。近年来,人口增长和经济发展导致人类不得不在泥石流易发区活动,不合理的建筑选址及生态环境的破坏,扩大了受泥石流灾害的风险范围。泥石流发生后,快速定位并救援被困在建筑物内的人员或遗体是目前急需解决的关键问题。

泥石流对建筑物的主要危害形式包括动态冲击破坏、静态淤埋和侵蚀^[2-4]。而对于大规模的泥石流,一般山区民用建筑物难以抵抗泥石流巨大的冲击力,位于泥石流通道中的建筑物被冲击损毁乃至推移掩埋几乎是必然,往往被完全摧毁,呈破碎块体的形式被推移出几十米甚至几百米。因此,不需要关注建筑物的受损过程^[2-3,5],而是专注建筑物被破坏后的推移距离与掩埋堆积位置^[6]。首先,建筑物脱离了原来的位置,导致灾后救援难以定位被困人员的位置;其次,泥石流含水量高,被困人员生存时间短,救援时间有限,

极大地增加了救援难度。2015年深圳光明新区发生的滑坡-泥石流事件中,最大流动距离达到1 120 m,堆积厚度为8~20 m,造成33栋建筑物被冲毁掩埋,77人失踪。现场调查显示,建筑物水平推移的距离甚至可达150 m^[6],整个搜救过程持续27 d,仅搜救到1名幸存者^[7]。因此,快速而精准的定位是提高灾后救援效率的关键。

目前,关于泥石流与建筑物相互作用的研究多数关注冲击力问题^[8-11],关于建筑物的运动距离和位置的研究相对较少^[12]。海岸工程中关于水流对块石的推移研究较多^[13-15],但与水流不同的是泥石流是固液两相流体,既有流体的特性,也有土体的特性,其推移块体的物理过程更为复杂^[16]。对重大泥石流推移-掩埋建筑物的物理机制缺乏基本认识,导致重大泥石流灾害应急搜救缺乏针对性,难以在泥石流灾害中准确地确定被困人员的位置,从而导致搜救效率低、搜救工作困难。

收稿日期:2023-11-27 修回日期:2024-04-30 网络出版日期:2024-06-05

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42471193)

作者简介:冯磊(1997—),男,硕士.研究方向:山地灾害防灾减灾工程. E-mail: fenglei21@mails.ucas.ac.cn

*通信作者:宋东日,研究员, E-mail: drsong@imde.ac.cn

首先,通过理论分析提取影响分布位置的主要因素和起主导作用的力;然后,通过水槽试验模拟泥石流推移掩埋建筑物块体的过程,关注堆积后不同尺寸和密度的块体在不同流态泥石流堆积区的分布位置,目标在于明确控制这一复杂物理过程的关键因素,从而帮助救援人员圈定并缩小搜救范围,为泥石流灾害的应急搜救提供指导。

1 理论分析

泥石流推移建筑物的实际情况极为复杂,因此理论分析时对实际情况进行简化。假设:1)处于均一坡度的沟道中;2)形状规则的建筑物块体;3)在均匀稳定泥石流的推移作用下,被推移了一定距离并停止在泥石流堆积区中。

1.1 受力分析

忽略垂直于流动方向上的影响,可简化为2维问题进行分析^[17]。由于钢筋混凝土构成的普通民用建筑物密度大于泥石流密度,因此建筑物在被泥石流推移掩埋的过程中处于沉底状态,受到重力、浮力、拖曳力、土压力、基底支持力和基底摩擦力的共同作用。泥石流中建筑物块体受力分析示意图如图1所示。

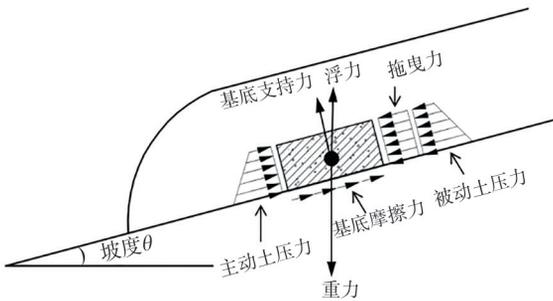


图1 泥石流中建筑物块体受力分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of force analysis of a block

建筑物块体自身重力 G 为:

$$G = \rho_b g B h \quad (1)$$

式中: ρ_b 为建筑物块体的密度; g 为重力加速度; B 为块体在流动方向上的长度; h 为块体的高度,垂直于流动方向上的长度为单位1。

建筑物块体受到的浮力 F_f 可表示为:

$$F_f = \rho_d g B h \quad (2)$$

式中, ρ_d 为泥石流的密度。

基底阻力受浮力和泥石流液化程度的影响,泥石流液化会导致块体基底摩擦力减小^[18]。根据库仑摩擦定律,块体在滑动过程中与基底摩擦力可表示为:

$$F_\mu = (\rho_b - \rho_d) g B h \mu_b \cos \theta (1 - \lambda) \quad (3)$$

式中, μ_b 为建筑物块体与基底的摩擦系数, λ 为泥石流的液化程度。

由于泥石流和块体都在运动,因此拖曳力大小与两者速度差的平方相关,拖曳力^[19]可表示为:

$$F_D = C_d \rho_d (v_d - v_b)^2 h \quad (4)$$

式中, C_d 为拖曳力系数^[20], v_d 和 v_b 分别为泥石流流速和建筑物块体运动速度。

泥石流是固液两相流,既有流体的性质,又有土体的性质,受液化程度的影响,推移过程中的土压力系数可表示为 $(1 - \lambda)k + \lambda$, 土压力 F_k 可表示为^[21]:

$$F_k = \frac{1}{2} ((1 - \lambda)k + \lambda) \rho_d g (2Hh - h^2) \cos \theta \quad (5)$$

式中, k 为土压力系数, H 为泥石流的流动高度。

1.2 无量纲数

通常情况下,泥石流中大块石的运动速度小于泥石流的流速^[12],因此,在推移的过程中,拖曳力和土压力起到驱动作用,基底摩擦力起到阻力作用。由于块体始终处于沉底状态,重力和浮力始终存在,可将重力与浮力合并考虑,并将驱动力和阻力分别与块体重力与浮力耦合项进行比较,得到3个无量纲数 D^* 、 K^* 、 μ^* 。

D^* 为拖曳力与块体重力-浮力耦合项的比值:

$$D^* = \frac{F_D}{G - F_f} = C_d \frac{v_0^2}{gH} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\rho_b}{\rho_d} - 1\right)} \cdot \frac{h}{B} \cdot \frac{H}{h} \quad (6)$$

式中,无量纲数 D^* 由来流 Froude 数 $Fr = \frac{v_0}{\sqrt{gH \cos \theta}}$ 、

块体与泥石流的密度比 ρ_b/ρ_d 、泥石流流动高度与块体高度与比 H/h 及块体的高度和长度的比值 h/B 4 项表征泥石流-建筑物物理特性参数组成。拖曳力采用最大值,即在泥石流与块体刚开始接触时,泥石流流速和块体的速度差最大,之后速度差会不断减小。

K^* 为土压力与块体重力-浮力耦合项的比值:

$$K^* = \frac{F_k}{G - F_f} = \frac{1}{2} (k_p - k_a) (1 - \lambda) \frac{1}{\left(\frac{\rho_b}{\rho_d} - 1\right)} \cdot \frac{h}{B} \left(\frac{2H}{h} - 1\right) \cos \theta \quad (7)$$

式中, k_p 为被动土压力系数, k_a 为主动土压力系数。

在推移过程中,块体尾部受被动土压力的驱动作用,块体头部受主动土压力的阻碍作用(图1),因此土压力作为驱动力是被动土压力与主动土压力的差值。 K^* 由泥石流的液化程度 λ 、块体与泥石流的密度比 ρ_b/ρ_d 、泥石流流动高度与块体高度与比 H/h 及块体的高度和长度比值 h/B 这4项泥石流-建筑物物理特性参数组成。

基底摩擦力与块体重力-浮力耦合项的比值 μ^* 为:

$$\mu^* = \frac{F_\mu}{G - F_f} = \mu_b \cos \theta (1 - \lambda) \quad (8)$$

式中, μ_b 为阻力系数。

块体在运动过程中受到的力可由式(6)~(8)的3个无量纲参数 D^* 、 K^* 、 μ^* 表示, 3个无量纲参数可以展开为9个基本量, 包括4个经验参数 C_d 、 k_a 、 k_p 、 μ_b 和5个表征泥石流-建筑物特性的物理参数 Fr 、 λ 、 h/B 、 ρ_b/ρ_d 、 H/h 。

1.3 块体相对堆积位置的影响因素

以建筑物的初始位置为参考点, 定义建筑物块体在泥石流的推移作用下运动距离 L 、泥石流的堆积长度 S , 两者的比值为建筑物在泥石流堆积区的相对位置, 如图2所示。 L/S 的范围为 $0 \sim 1$, $L/S=0$ 表示建筑物块体没有被推移, $L/S=1$ 表示建筑物块体在堆积区前缘。

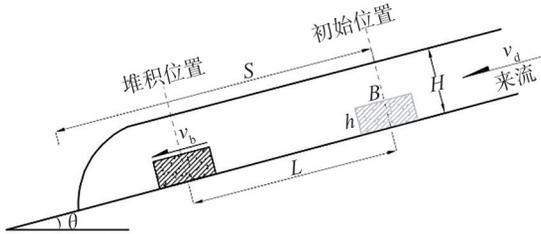


图2 建筑物在泥石流堆积区相对位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of relative position of building block in debris flow deposition

推移过程中建筑物块体受到的力决定了块体运动时的加速度、速度和位移(第1.2节), 块体受到的力可展开为9个基本量, 因此块体在泥石流堆积区的相对位置 L/S 可表示为^[22]:

$$\frac{L}{S} = f\left(Fr, \lambda, \frac{h}{B}, \frac{\rho_b}{\rho_d}, \frac{H}{h}, C_d, k_a, k_p, \mu_b\right) \quad (9)$$

2 模型试验

通过理论分析提取影响相对位置的基本物理量进一步指导试验设计。试验的目的在于研究泥石流和建筑物块体物理特性参数 (Fr 、 λ 、 h/B 、 ρ_b/ρ_d 、 H/h) 对块体在泥石流堆积区位置 L/S 的影响。

2.1 相似性分析

小尺度水槽试验的优点在于对试验变量的精准控制, 但存在尺度效应。为了减小尺度效应, 在主要物理过程保持小尺度水槽试验与真实泥石流的相似^[23-25]。

1) 材料相似

泥石流是固相土体和液相水的混合物, 其密度表示为:

$$\rho_d = C_s(\rho_s - \rho_f) + \rho_f \quad (10)$$

式中, C_s 为固相土体的体积分数, ρ_s 和 ρ_f 分别为泥石流

中固相和液相的密度。

试验模拟的泥石流密度为 $1\ 772.8 \sim 1\ 884.0\ \text{kg/m}^3$, 试验模拟的建筑物密度为 $2\ 400 \sim 4\ 500\ \text{kg/m}^3$, 试验模拟建筑物与泥石流的密度比 ρ_b/ρ_d 为 1.5 和 2.5。模型试验的建筑物密度与真实事件的密度相似, 密度比 ρ_b/ρ_d 相近。

2) 几何相似

几何相似包括模型建筑物长宽高的比与真实建筑物长宽高的比相似, 以及试验与真实事件建筑物高度与泥石流高度的比应保持相似。试验中, 模型建筑物的高长比 h/B 为 $1/6 \sim 1/2$, 试验泥石流高度比与真实建筑物高度与泥石流高度比 H/h 的范围为 $3.2 \sim 5.3$, 此范围覆盖了大多数真实的建筑物高长比及大规模泥石流高度与建筑物高度比的范围, 可认为模型与实际几何相似。

3) 动力相似

泥石流模型试验中为了保证模型与原型流体力学相似, 通常使用无量纲数进行对比^[26]。Froude 数被广泛用来量化泥石流宏观流态^[26-27], 描述流体惯性力与重力的比值为:

$$Fr = \frac{v_d}{\sqrt{gH \cos \theta}} \quad (11)$$

式中, v_d 为流体速度。

试验模拟的泥石流的 Froude 数范围为 $0.08 \sim 3.94$, 与真实泥石流事件范围重合^[16]。

2.2 试验水槽装置

试验装置如图3所示, 水槽分上游和下游两个部分, 上游为泥石流的流通区, 坡度为 25° , 下游为堆积区, 坡度为 5° , 上游长度为 $3.0\ \text{m}$, 下游长度为 $6.0\ \text{m}$, 整个水槽的宽度为 $0.3\ \text{m}$ 。水槽最上游是长为 $1.0\ \text{m}$ 的料斗, 宽度和高度与水槽相同, 料斗闸门的开口高度可设置为任意高度的恒定值, 便于产生深度恒定的稳态流。本试验中, 对于低固相含量的泥石流, 闸门的开口高度设置为 $100\ \text{mm}$, 可以保证泥石流有 $5\ \text{s}$ 左右的稳定流动时间, 而对于高固相含量的泥石流, 由于其流动性较差, 闸门释放方式采用溃坝式。在水槽的底部黏有一层 $0.6\ \text{mm}$ 的玻璃珠, 用来增加底床的粗糙度, 水槽侧壁为厚 $0.01\ \text{m}$ 、高 $0.8\ \text{m}$ 的透明亚克力板, 可直接观察到泥石流推移建筑物块体模型时的流动状态和测量堆积区的流动深度。

块体的初始位置在下游距转角 $0.75\ \text{m}$ 处, 位于基底传感器模块 1 和 2 之间, 与基底传感器模块 1 的距离为 $0.25\ \text{m}$ (图3(b)), 这个位置可以使块体受持续稳态流的冲击, 也方便监测块体周围的流态特征。

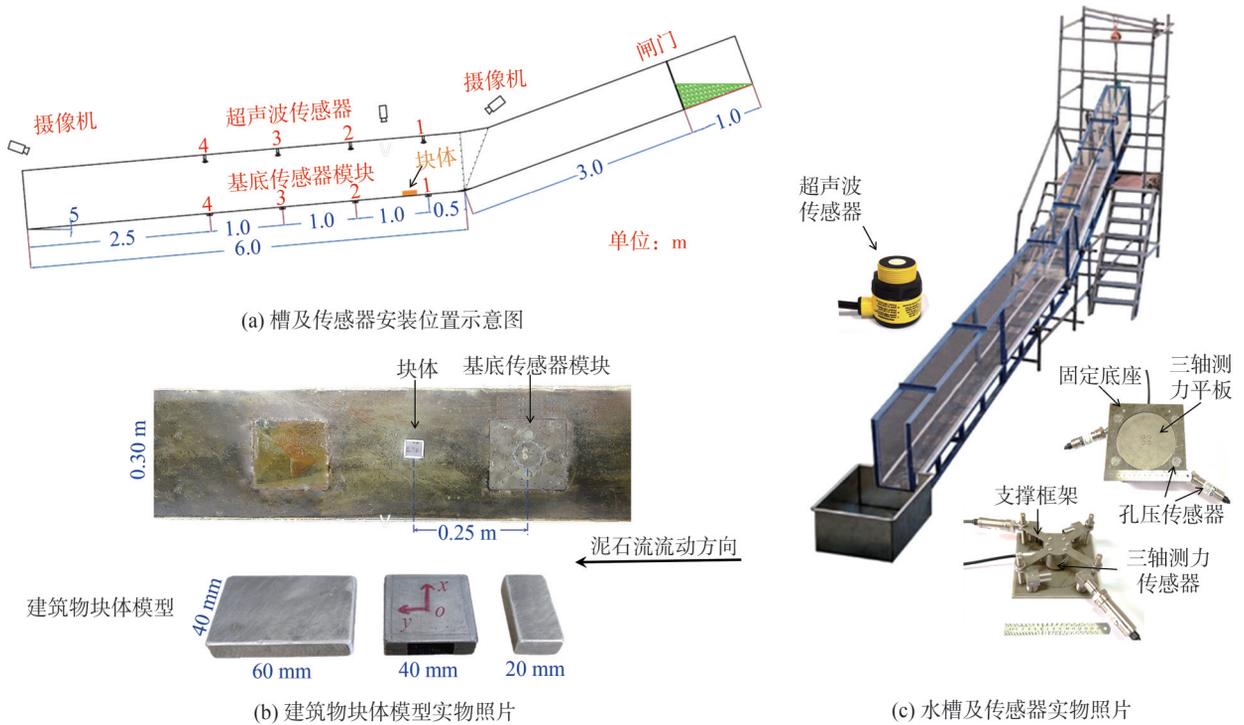


图3 试验水槽装置

Fig. 3 Experimental flume setup

2.3 传感器和设备布置

在水槽底部分布一系列基底传感器模块(图3(a)),每个模块包含三轴测力传感器和孔压传感器(图3(c)),分别测量底部的正应力、剪应力和孔隙水压力。每个基底模块的正上方都对应一个超声波传感器,用于测量对应模块处泥石流的流动深度(图3(a))。数据采集设备能够实现所有传感器信号的同时采集,采集频率设置为500 Hz。在水槽的一侧布置有高速相机,帧率设置为250 fps,用来测量龙头流速及观测块体在泥石流中的运动模式。在水槽顶部安装有3个摄像机,从不同的角度记录整个推移过程。

2.4 试验材料及方案

试验泥石流采用的固相为单一粒径的透明玻璃珠(直径0.6 mm,密度 $2\,540\text{ kg/m}^3$),液相为甘油与水的混合物,黏度为 $0.01\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。真实泥石流的固相浓度为 $40\%\sim 80\%$ ^[28],为了覆盖一定范围的固相浓度且保证泥石流具有一定的流动性,本试验所采用的泥石流固相浓度为 45% 、 50% 和 53% ,通过改变固相浓度,可使泥石流的Froude数 Fr 、液化程度 λ 不同,泥石流的总体积为50 L,密度为 $1\,772.8\sim 1\,884.0\text{ kg/m}^3$ 。

建筑物块体模型的材质为不锈钢,其密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$,将不锈钢实心块体中间镂空得到密度为 $2\,700$ 和 $4\,500\text{ kg/m}^3$ 的块体,块体与泥石流的相对密度为 1.5 、 2.5 。块体的3种尺寸(流动方向 \times 垂直于流动方向 \times 块体高度)分别为 $60\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 、 $40\text{ mm}\times$

$40\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 、 $20\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,垂直于流动方向的尺寸和块体高度保持不变,仅改变流动方向上的尺寸(图3(b)),使建筑物块体模型有不同的高长比 h/B 。通过变化泥石流固相含量、块体密度和尺寸,共开展18组试验,试验方案如表1所示。

表1 试验方案

Tab. 1 Test program

编号	固相含量/%	泥石流密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	块体密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	块体尺寸/ ($\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm}$)
45-1.5-20	45	1 773	2 700	20×40×10
45-1.5-40	45	1 773	2 700	40×40×10
45-1.5-60	45	1 773	2 700	60×40×10
45-2.5-20	45	1 773	4 500	20×40×10
45-2.5-40	45	1 773	4 500	40×40×10
45-2.5-60	45	1 773	4 500	60×40×10
50-1.5-20	50	1 839	2 700	20×40×10
50-1.5-40	50	1 839	2 700	40×40×10
50-1.5-60	50	1 839	2 700	60×40×10
50-2.5-20	50	1 839	4 500	20×40×10
50-2.5-40	50	1 839	4 500	40×40×10
50-2.5-60	50	1 839	4 500	60×40×10
53-1.5-20	53	1 884	2 700	20×40×10
53-1.5-40	53	1 884	2 700	40×40×10
53-1.5-60	53	1 884	2 700	60×40×10
53-2.5-20	53	1 884	4 500	20×40×10
53-2.5-40	53	1 884	4 500	40×40×10
53-2.5-60	53	1 884	4 500	60×40×10

注:编号45-1.5-20表示泥石流固相浓度为 45% 、块体与泥石流的相对密度为 1.5 、块体流动方向的尺寸为 20 mm ,下同。

3 试验结果分析

试验方案中预设泥石流固相含量、建筑物块体的密度和尺寸,即相对密度 ρ_b/ρ_d 、高长比 h/B 已知。因此试验测量的主要指标有泥石流的流速、流深、液化程度 λ ,并以此推算 Froude 数 Fr 和相对高度 H/h ,

从而可以分析 5 个表征泥石流-建筑物特性的物理参数 $Fr, \lambda, h/B, \rho_b/\rho_d, H/h$ 与建筑物在泥石流堆积区相对位置 L/S 的关系,表 2 为所有试验的结果。为表示泥石流接触块体时的流态 (Froude 数和液化程度),选取监测点 1 的测量值作为每次试验结果的代

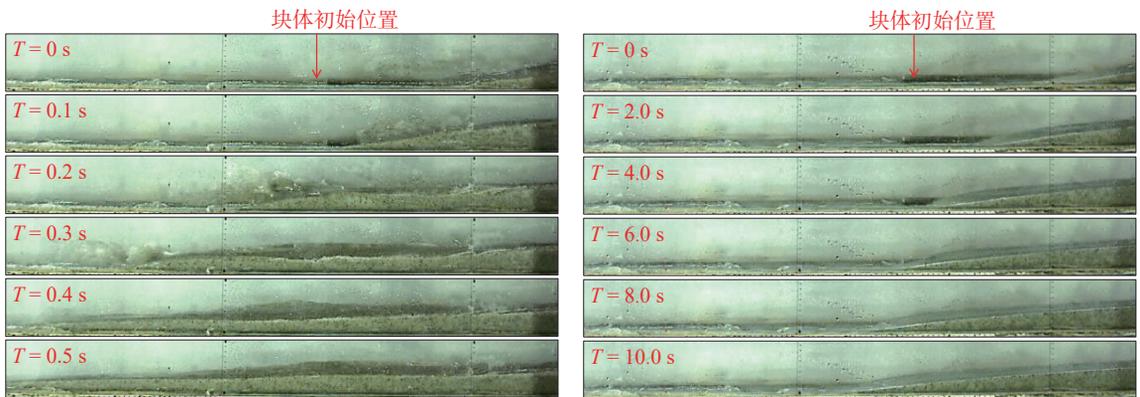
表 2 试验结果统计
Tab. 2 Test results

编号	流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	流深/ m	Froude 数 Fr	液化程度 λ	相对密度 ρ_b/ρ_d	高长比 $h \cdot B^{-1}$	高度比 $H \cdot h^{-1}$	块体相对位置 $L \cdot S^{-1}$
45-1.5-20	1.560	0.032	2.784	0.730	1.500	1/2	3.200	0.640
45-1.5-40	1.980	0.036	3.332	0.850	1.500	1/4	3.600	0.530
45-1.5-60	1.950	0.035	3.328	0.790	1.500	1/6	3.500	0.430
45-2.5-20	2.080	0.035	3.565	0.784	2.500	1/2	3.470	0.182
45-2.5-40	2.080	0.039	3.346	0.734	2.500	1/4	3.938	0.139
45-2.5-60	2.350	0.036	3.935	0.859	2.500	1/6	3.635	0.251
50-1.5-20	1.690	0.053	2.342	0.740	1.500	1/2	5.300	0.570
50-1.5-40	1.290	0.046	1.919	0.720	1.500	1/4	4.600	0.530
50-1.5-60	1.040	0.048	1.518	0.680	1.500	1/6	4.800	0.400
50-2.5-20	1.390	0.050	1.990	0.749	2.500	1/2	4.958	0.470
50-2.5-40	1.090	0.048	1.593	0.653	2.500	1/4	4.764	0.387
50-2.5-60	0.940	0.053	1.308	0.712	2.500	1/6	5.300	0.411
53-1.5-20	0.080	0.050	0.111	0.660	1.500	1/2	5.000	0.680
53-1.5-40	0.060	0.050	0.087	0.660	1.500	1/4	5.000	0.720
53-1.5-60	0.340	0.051	0.478	0.500	1.500	1/6	5.100	0.490
53-2.5-20	0.080	0.048	0.114	0.614	2.500	1/2	4.800	0.870
53-2.5-40	0.070	0.048	0.101	0.613	2.500	1/4	4.800	0.761
53-2.5-60	0.050	0.045	0.080	0.695	2.500	1/6	4.500	0.650

3.1 泥石流流态

通过高速摄像机拍摄到泥石流推移建筑物的过程可以推算出泥石流的龙头流速。图 4 展示了固相含量泥石流为 45% 和 53% 时推移建筑物块体的物理过程,试验架设的高速相机的高度略高于水槽底部,高速相机拍摄照片的角度有一定俯视视角,可以同时看到泥石流的侧面和顶部,相邻序列照片的泥石流龙头位移和时间差

的比值即为龙头流速。对于低固相泥石流,流动性好,流速大,推移过程持续时间短;对于高固相泥石流,流动性差,流速慢,推移过程持续时间长。由于固相含量为 45% 的泥石流流速高,建筑物块体在推移作用下加速运动很明显,而对于固相含量为 53% 的泥石流,以低流速推移块体,块体以缓慢蠕动的方式运动,运动过程中会出现停顿,待后续来流到达后(推挤)才会继续运动。



(a) 45%固相含量泥石流 (45-2.5-60)

(b) 53%固相含量泥石流 (53-2.5-60)

图 4 高速相机拍摄的泥石流推移建筑物块体物理过程

Fig. 4 Process of debris flow displacing building block from high-speed camera

试验传感器测得的数据包括 4 个基底模块的正应力、剪应力、孔隙水压力及顶部超声传感器测得的流动深度 H 。图 5 展示了 3 组固相含量不同(45%、50%、53%)试验的传感器的测量数据,超声波传感器所在位置与基底模块所在位置相对应,其响应时间也保持一致。泥石流到达超声波传感器所在位置时,传感器测量的流动深度会迅速上升,随后流深度趋于稳定值。固相含量

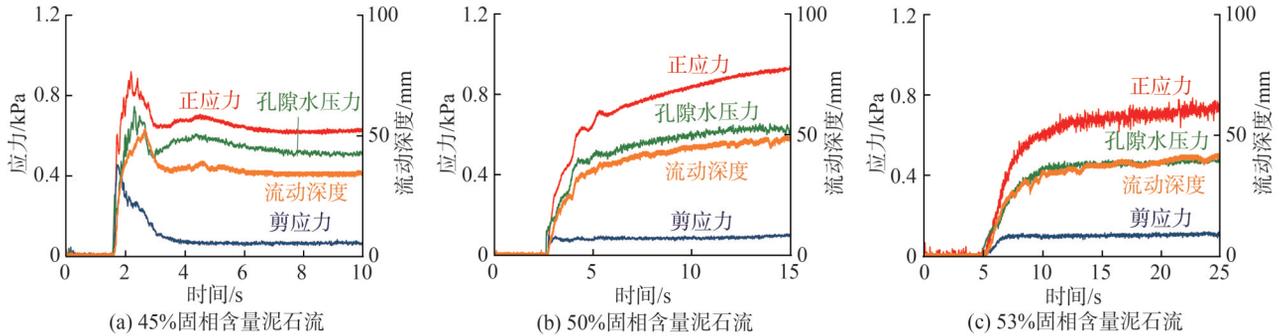


图 5 基底模块 1 处传感器测量结果

Fig. 5 Measured results at basal sensing module 1

固相含量的变化决定了泥石流的流态,包括 Froude 数和液化程度。液化程度最大值为 0.85,最小值为 0.50;Froude 数最大值为 3.94,最小值为 0.08(表 2)。其中,固相含量为 45%、50%、53% 泥石流的液化程度平均值为 0.791、0.709 和 0.624, Froude 数平均值为 3.382、1.782 和 0.162。随着固相含量的增大, Froude 数和液化程度均呈降低趋势,如图 6 所示。

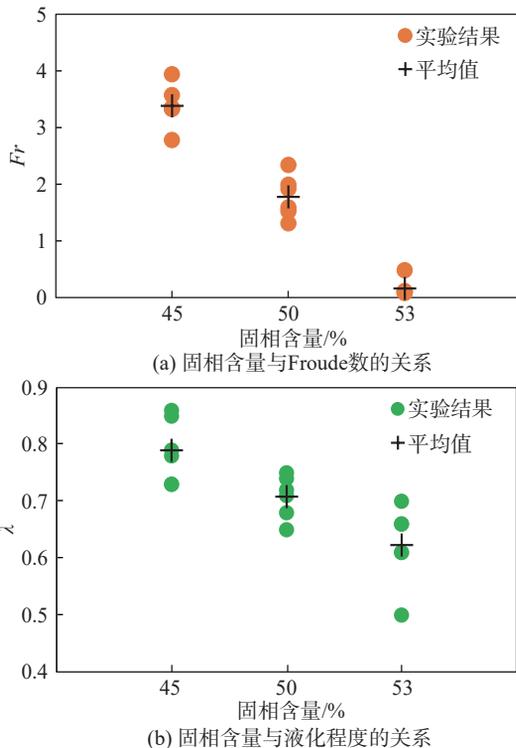


图 6 固相含量与泥石流流态的关系

Fig. 6 Relationship between debris-flow solid concentration and debris-flow regime

的增大会使上升趋势减缓,稳定段流动深度增大。

实测液化程度 λ 为传感器测得的孔隙水压力与正应力的比值^[29-30],试验释放前已将玻璃珠与甘油充分搅拌混合,因此,可取基底模块 1 的液化程度测量值作为该次试验模拟泥石流的液化程度的代表值,测量结果如图 5 所示。同时,选取流动深度曲线的稳定段作为流动深度的代表值(图 5)。

3.2 块体物理特性对相对堆积位置的影响

试验中采用的块体有相同的高度,区别在于流动方向上长度的变化。试验结果表明,对于相同高度的块体,高长比 h/B 越小,块体形状越趋向于扁平状,相对位置 L/S 越小,块体也更难被推移。

在相同泥石流来流的情况下,泥石流对块体的冲击强度相同,因此相对堆积位置主要受到块体尺寸的影响。式(6)表明拖曳力与重力-浮力耦合项的比值 D^* 随着高长比 h/B 的增大而降低,即拖曳力相对于重力-浮力耦合项降低。高长比 h/B 减小一方面反映块体的体积增大导致重力增大,使块体更难被推移;另一方面,对有相同体积的块体,高长比减小 h/B 意味着高度 h 减小或长度 B 增大,块体自身重力不变,而块体受到的拖曳力和土压力也相应减小,使得块体被推移的距离变短。因此建筑物破碎后的块体越扁平,被推移的距离越短,堆积后的相对位置距离前缘越远。

图 7 为块体物理特性对块体在泥石流堆积区相对位置的影响。对于固相含量为 45% 的泥石流进行推移试验,高密度块体在堆积区的相对位置显著小于低密度块体(图 7(a));固相含量为 50% 的泥石流试验中,高密度块体的相对位置略微小于低密度块体(图 7(b));而固相含量为 53% 的泥石流试验中,高密度块体的相对位置反而大于低密度块体(图 7(c))。理论分析与试验结果之间存在差异,根据理论分析(式(6)~(8)),对体积相同的块体,块体密度越大,其拖曳力和土压力与重力-浮力耦合项的比值(无量纲数 D^* 和 K^*)都更小,高密度的块体相较于低密度的块体更难被推移,推移距离更短,相对位置距离堆积前缘更远。

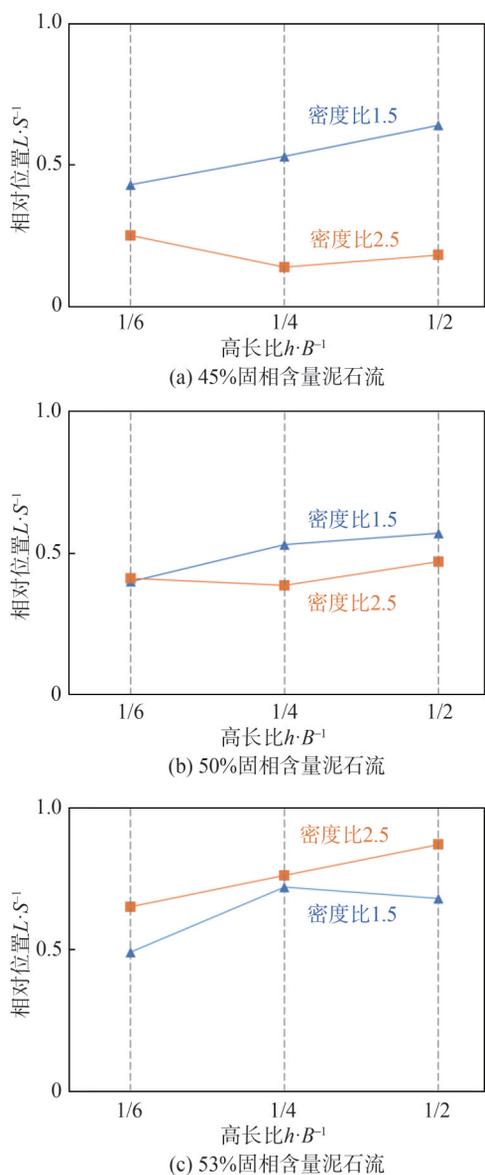


图7 相对堆积位置与块体物理特性的关系

Fig. 7 Relationship between the relative position and the physical properties of block

而固相含量为53%的泥石流试验中,这种差异的原因可能与推移过程中的物理机制有关。低固相含量的泥石流,其 Fr 、 λ 和 v_d 更高,建筑物块体受到的拖曳力相较于土压力更大,在推移块体的过程中拖曳力起主导作用;而在高固相含量泥石流推移建筑物块体试验中,土压力占主导作用。在泥石流推移建筑物块体过程中,起主导作用的力不同,推移过程中的物理机制可能存在差异。通过对试验摄像机拍摄的视频进行分析,发现对固相含量为53%的泥石流进行推移试验,块体的运动不是快速加速减速的过程,而是缓慢蠕动,且运动过程中发生停顿,这可能是造成试验结果与理论分析产生差异的原因。具体影响块体在泥石流推移建筑物块体的物理机制需进一步研究。

3.3 泥石流流态对相对堆积位置的影响

当以泥石流流态为横坐标,相对位置为纵坐标绘制试验结果时,相对堆积位置与流态的关系如图8所示。由图8可以看出,在块体与泥石流密度比为1.5的试验中,3条高长比的曲线斜率都很小,即流态对块体在泥石流堆积区位置的影响不显著;而密度比为2.5的试验中,流态对块体在堆积区的相对位置有显著的影响。

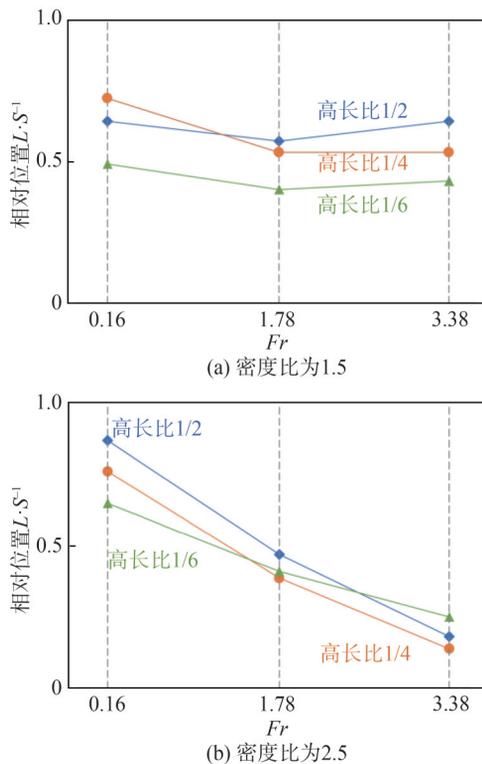


图8 相对堆积位置与流态的关系

Fig. 8 Relation between relative position and debris-flow regime

低密度的块体(1.5)相较于高密度的块体(2.5)更容易被推移。由图8(a)可知,密度比为1.5的块体,其密度与泥石流中的固相密度接近,在被推移的过程中可能会成为泥石流固相的一部分并随着泥石流一同运动,因此无论泥石流的流动性如何,低密度的同种尺寸的建筑物块体在泥石流堆积相对位置变化范围很小。

试验中 Fr 的变化仅通过改变泥石流的固相含量实现,固相含量越低, Fr 越大,泥石流的流动性越强,堆积长度也越长。密度比为2.5的建筑物块体较难被推移,泥石流会在块体周围形成绕流,泥石流流动性越强,这种绕流现象越明显,因此相对位置 L/S 也越远离堆积区前缘。

4 结论

本文对泥石流推移建筑物块体的影响因素进行了研究,通过理论分析提取了5个影响建筑物块体在泥石流堆积区相对位置的物理特性因素(泥石流Froude数、

泥石流液化程度、块体与泥石流密度比、块体与泥石流高度比、块体自身高长比)。通过水槽试验研究了建筑物块体在泥石流堆积区的相对位置与 5 个泥石流和建筑物的物理特性因素的关系,主要结论如下:

1) 泥石流固相含量的改变会影响泥石流的流态,固相含量越大,泥石流流动性越弱。泥石流流动性的减弱会使建筑物块体在泥石流堆积区的位置靠近堆积前缘。流态对相对位置的影响主要体现在高密度块体的推移试验中,而低密度块体中流态对相对位置的影响不明显。根据理论模型中建筑物块体的受力分析,高密度块体自身重力和基底摩擦力大,因此较难被推移,堆积相对位置受泥石流流动性的影响显著,流动性越强,堆积位置距离堆积前缘越远;而低密度块体自身重力和基底摩擦力较小,更容易被泥石流推移,且块体密度与泥石流中固相颗粒的密度相近,被泥石流携带的建筑物块体会成为泥石流固相的一部分,因此泥石流流态对低密度块体的相对位置的影响不显著。

2) 块体的密度和尺寸是影响相对位置的主要因素。对于同种密度的块体,块体在流动方向上尺寸越大,形状越扁平,越难被推移。在固相含量为 45% 和 50% 的泥石流中,高密度块体相对于低密度块体更难被推移,推移堆积后的相对位置也相对较小。而在固相含量为 53% 的泥石流推移试验中,高密度块体推移距离远,在堆积区的相对位置更靠近堆积前缘。这与不同固相含量的泥石流推移建筑物块体的主导作用力、物理机制及块体的具体运动模式有关,需进一步研究。

3) 探明了建筑物块体在泥石流堆积区的相对位置与泥石流流态和建筑物物理特性的关系。试验结果展示了各种物理参数对相对位置影响的定性对比,下一步研究需针对各物理参数对相对位置的影响开展定量分析,从而对建筑物块体在泥石流堆积区的点位进行理论预测。

研究聚焦于被冲毁破坏的建筑物块体在泥石流推移作用下的运动距离和堆积范围,不考虑建筑物的破坏过程。因此,关于试验建筑物模型的设置仅考虑了几何形状和密度,忽略了建筑物的结构基础,与真实情况有一定的差别。本研究的试验结果可为被冲毁破坏的建筑物在泥石流中的运动距离和堆积范围提供参考,但在实际应用中,需综合考虑建筑物的结构基础等因素。

参考文献:

[1] Du Ronghuan, Li Honglian, Tang Bangxing, et al. Research on debris flow for thirty years in China[J]. *Journal of Natu-*

ral Disasters, 1995, 4(1): 64–73. [杜榕桓, 李鸿琰, 唐邦兴, 等. 三十年来的中国泥石流研究[J]. *自然灾害学报*, 1995, 4(1): 64–73.]

- [2] Hu K H, Cui P, Zhang J Q. 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.
- [3] Zeng Chao, Cui Peng, Su Zhiman, et al. Failure modes of reinforced concrete columns of buildings under debris flow impact[J]. *Landslides*, 2015, 12(3): 561–571.
- [4] Li Bixiong, Zhao Kaipeng, Wang Tiantian. Damage form and vulnerability analysis of buildings under debris flow impact[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(3): 484–493. [李碧雄, 赵开鹏, 王甜恬. 西部山区泥石流灾害下建筑物破坏特征与破坏等级划分[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(3): 484–493.]
- [5] Luo H Y, Zhang L L, Zhang L M. Progressive failure of buildings under landslide impact[J]. *Landslides*, 2019, 16(7): 1327–1340.
- [6] 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.
- [7] Qin Jian, You Shuming. Practice and enlightenment of handling the dangerous situation of “December 20” major landslide in Shenzhen[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2018, 39(6): 49–51. [覃建, 由淑明. 深圳“12·20”重大滑坡险情处置实践与启示[J]. *水利水电快报*, 2018, 39(6): 49–51.]
- [8] Chehade R, Chevalier B, Dedecker F, et al. Effect of boulder size on debris flow impact pressure using a CFD–DEM numerical model[J]. *Geosciences*, 2022, 12(5): 188.
- [9] Zhao L, He J W, Yu Z X, et al. Coupled numerical simulation of a flexible barrier impacted by debris flow with boulders in front[J]. *Landslides*, 2020, 17(12): 2723–2736.
- [10] Ng C W W, Bhatta A, Choi C E, et al. Effects of debris flow rheology on overflow and impact dynamics against dual-rigid barriers[J]. *Géotechnique*, 2024, 74(12): 1172–1185.
- [11] Ng C W W, Li Zhi, Poudyal S, et al. Experimental and SPH modeling of debris-flow impact on dual rigid barriers with deflector[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2024, 150(5): 04024023.
- [12] Ng C W W, Liu Haiming, Choi C E, et al. Impact dynamics of boulder-enriched debris flow on a rigid barrier[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147(3): 0002485.
- [13] Nandasena N A K, Tanaka N. Boulder transport by high energy: Numerical model-fitting experimental observations [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 57: 163–179.

- [14] Imamura F, Goto K, Ohkubo S. A numerical model for the transport of a boulder by tsunami[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C1): 2007JC004170.
- [15] Goto K, Chavanich S A, Imamura F, et al. Distribution, origin and transport process of boulders deposited by the 2004 Indian Ocean tsunami at Pakarang Cape, Thailand[J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 202(4): 821–837.
- [16] Costa J E. Physical geomorphology of debris flows[M]. Berlin: Springer, 1984.
- [17] Song Dongri, Chen Xiaoqing, Zhou G G D, et al. Impact dynamics of debris flow against rigid obstacle in laboratory experiments[J]. *Engineering Geology*, 2021, 291: 106211.
- [18] Collins B D, Reid M E. Enhanced landslide mobility by basal liquefaction: The 2014 State Route 530 (Oso), Washington, landslide[J]. *GSA Bulletin*, 2020, 132(3/4): 451–476.
- [19] Vagnon F. Design of active debris flow mitigation measures: A comprehensive analysis of existing impact models[J]. *Landslides*, 2020, 17(2): 313–333.
- [20] Haider A, Levenspiel O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles[J]. *Powder Technology*, 1989, 58(1): 63–70.
- [22] Iverson R M. Scaling and design of landslide and debris flow experiments[J]. *Geomorphology*, 2015, 244: 9–20.
- [23] Wang Xiekang, Fang Duo. Study on laws of debris model similarity[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2000, 32(3): 9–12. [王协康, 方铎. 泥石流模型试验相似律分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2000, 32(3): 9–12.]
- [24] Chai Jing, Wang Zhili, Li Yi, et al. Application analysis of physical model simulation method II[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2014, 34(2): 123–128. [柴敬, 汪志力, 李毅, 等. 物理模型试验方法的应用分析II[J]. *西安科技大学学报*, 2014, 34(2): 123–128.]
- [25] Ni Huayong, Tang Chuan. Advances in the physical simulation experiment on debris flow initiation in China[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 606–613. [倪化勇, 唐川. 中国泥石流起动物理模拟试验研究进展[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 606–613.]
- [26] Song Dongri, Zhou Gongdan, CHOI Clarence Edward, et al. Scaling principles of debris flow modeling using geotechnical centrifuge[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(12): 2262–2271. [宋东日, 周公旦, CHOI Clarence Edward, 等. 土工离心机模拟泥石流问题的相似性考虑[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(12): 2262–2271.]
- [27] Bai Yitong, Song Dongri. Experimental study on paving process of debris flow[J]. *Mountain Research*, 2021, 39(3): 346–355. [白艺彤, 宋东日. 泥石流造床运动的试验研究[J]. *山地学报*, 2021, 39(3): 346–355.]
- [28] Iverson R M. The physics of debris flows[J]. *Reviews of Geophysics*, 1997, 35(3): 245–296.
- [29] Oya S, Imaizumi F, Takayama S. Field monitoring of pore water pressure in fully and partly saturated debris flows at Ohya landslide scar, Japan[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2024, 12(1): 67–86.
- [30] Sassa K, Wang Gonghui. Mechanism of landslide-triggered debris flows: Liquefaction phenomena due to the undrained loading of torrent deposits[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007.

Experimental Study on the Influence Patterns of Buildings Displaced and Buried by Debris Flow

FENG Lei^{1,2}, SONG Dongri^{1,2*}, CHEN Xiaoqing^{1,2}, LIU Jia³, CHEN Qian^{1,2}, LIU Yunhui^{1,2}

(1. 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 River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract:

Objective This study clearly determines the physical characteristic factors that govern the displacement and burial of buildings by debris flow, and clarifies the impact patterns of these physical characteristic factors on the deposition positions of buildings in debris flow. Provides specific guidance for post-disaster emergency rescue positioning of trapped individuals in debris flow depositions.

Methods Firstly, the force analysis of buildings buried by debris flow was simplified by assuming 1) they are situated in a channel with a uniform slope, 2) they are regular-shaped building blocks, and 3) they are displaced by a certain distance and halted in the debris-flow deposition under the steady motion of a uniform and stable debris flow. Based on these assumptions, the key physical characteristic factors influencing the forces acting on the building blocks were extracted: Froude number, degree of liquefaction, density ratio between the block and the debris flow, height ratio between the block and the debris flow, and the aspect ratio of the block itself. Secondly, small-scale flume experiments were conducted with high precision and distributed measurement capabilities. The experimental sensors included ultrasonic sensors, three-axis force sensors, and pore water pressure sensors, along with high-speed cameras for observing the displacement process. These experiments enabled the measurement of normal stress, shear stress, pore water pressure, debris flow depth, and velocity. Finally, the impact patterns of factors characterizing the physical characteristics of debris flow-building interactions on the relative deposition positions of building blocks in the debris flow accumulation area

were studied based on experimental measurement results.

Results and Discussions 1) Changes in the solid concentration of debris flow affected its flow regime; higher solid concentration weakened the flow mobility of the debris flow. The reduction in flow mobility led to building blocks being positioned closer to the deposition front in the debris-flow deposition. The influence of the flow regime on relative position primarily manifested in experiments involving high-density blocks, while its effect was less pronounced in experiments involving low-density blocks. Based on the theoretical force analysis of building blocks, high-density blocks exhibited greater self-weight and basal friction, making them more difficult to be displaced. Thus, their deposition positions were significantly influenced by the flow mobility of the debris flow. In contrast, low-density blocks exhibited lower self-weight and basal friction, making them more easily displaced by the debris flow. In addition, their density was similar to that of the solid-phase particles in the debris flow, causing these building blocks to become part of the solid phase of the debris flow. Therefore, the influence of the flow regime on the relative position of low-density blocks was less significant. 2) Block density and size were the primary factors affecting relative position. For blocks with the same density, those with larger sizes in the flow direction and flatter shapes were more difficult to be displaced. In debris flows with 45% and 50% solid concentration, high-density blocks were more difficult to displace compared to low-density blocks, resulting in relatively smaller relative positions. However, in debris flow displacement experiments with 53% solid-phase concentration, high-density blocks were displaced farther, positioning relatively closer to the front in the deposition. This behavior was related to the dominant forces, physical mechanisms, and specific motion modes of building blocks displaced by debris flows with different solid concentration and required further investigation. 3) The relationship between the relative position of building blocks in the debris flow deposition and both the flow regime of the debris flow and the physical characteristics of the building blocks was elucidated. The experimental results demonstrated a qualitative comparison of the influence of various physical parameters on relative position. Further research was required to quantitatively analyze the impact of each physical parameter on relative position, enabling theoretical prediction of the positions of building blocks in debris flow debris-flow deposition. This study focused on the movement distance and deposition extent of destroyed building blocks under the action of debris flow displacement without considering the process of building destruction. Therefore, the experimental setup considered only the geometric shapes and densities of the building models, neglecting the structural foundations of buildings, which can differ from real conditions. The experimental results of this study can provide a reference for the movement distance and deposition extent of destroyed buildings in debris flows. However, in practical applications, factors such as the structural foundations of buildings must be comprehensively considered.

Conclusion With the increase in solid concentration of debris flow volume, the reduction in flow mobility results in building blocks being deposited nearer to the deposition front. Under identical inflow conditions, flatter block shapes exhibit greater resistance to displacement, resulting in shorter movement distances after displacement and relative positions farther from the deposition front. In experiments with 45% and 50% volume solid concentration, blocks with lower density are displaced farther and positioned relatively closer to the deposition front. In contrast, for debris flows with 53% solid concentration, blocks with higher density tend to position relatively closer to the deposition front. This study, based on flume experiments, identifies the factors influencing the displacement process and examines the impact patterns of debris flow on building displacement. It provides valuable guidance for post-disaster emergency rescue operations, particularly in locating and rescuing trapped individuals.

Key words: debris flow; displacement; building; theoretical analysis; flume experiments

(编辑 周璇)

引用格式: Feng Lei, Song Dongri, Chen Xiaoqing, et al. Experimental study on the influence patterns of buildings displaced and buried by debris flow[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(4): 29–38. [冯磊, 宋东日, 陈晓清, 等. 泥石流推移掩埋建筑物影响规律试验[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(4): 29–38.]