

# 滑坡诱发农村山区砖混结构变形及演化规律研究

谢强<sup>1,2</sup>, 李雨桐<sup>1</sup>, 徐先宇<sup>1</sup>, 孙伟宸<sup>1</sup>, 陈昱成<sup>1</sup>, 班宇鑫<sup>3</sup>, 傅翔<sup>4</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心(重庆), 重庆 400045;  
3. 重庆科技大学 建筑工程学院, 重庆 401331; 4. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

**摘要:** 作为西南山区最为频发的地质灾害之一, 滑坡对山区中大量存在的砖混房屋造成严重影响, 尤其农村山区中受灾最为严重, 给人民群众生产生活造成巨大安全隐患. 研究滑坡引起的上部砖混结构变形特征, 对科学指导房屋设计防护及灾后监测点布置具有重要现实意义. 本文以酉阳高园子滑坡为例, 通过现场调查和裂缝参数拟合研究了滑坡区砖混结构变形破坏特征. 同时基于 PFC3D, 构建了有限体积-离散元(Finite Volume Method-Discrete Element Method, FVM-DEM)滑坡-房屋单向耦合模型, 模拟并分析了在不同工况下滑坡动态发育过程, 进一步揭示了房屋裂缝产生及演化过程. 结果表明: 相比于普通无柱砖混结构, 底框结构抵抗滑坡诱发变形破坏的能力更强, 并且处于前后缘段的房屋相对中段房屋更易出现损伤破坏; 房屋的长宽比不宜过小, 布置房屋长边走向平行斜坡走向有利于减少滑坡对房屋造成的破坏. 本文总结了在滑坡作用下, 上部砖混结构的变形特征和裂缝开展规律, 可为农村山区砖混结构设计和布置提供参考.

**关键词:** 滑坡; 砖混结构; 裂缝开展; PFC3D; FVM-DEM

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)02-0166-10

## Study on the deformation and evolution law of brick-concrete structures in rural mountainous areas induced by landslides

XIE Qiang<sup>1,2</sup>, LI Yutong<sup>1</sup>, XU Xianyu<sup>1</sup>, SUN Weichen<sup>1</sup>, CHEN Yucheng<sup>1</sup>, BAN Yuxin<sup>3</sup>, FU Xiang<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. National Joint Engineering Research Center of Geohazards

Prevention in the Reservoir Areas (Chongqing), Chongqing 400045, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science & Technology,

Chongqing 401331, China; 4. School of River and Ocean, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** As one of the most frequent geological hazards in the southwestern mountainous areas, landslides have a serious impact on quantities of brick-concrete structures in the mountainous areas, posing huge safety hazards to the production and daily life of the people. Therefore, it is of great practical significance to study the deformation characteristics of the upper brick-concrete structure caused by landslides for scientific guidance of housing design protection and post-disaster monitoring point layout. Taking Gaoyuanzi landslide in Youyang as an example, the deformation and failure characteristics of brick-concrete structures in the landslide area were studied through on-site investigation and crack parameter fitting. At the same time, based on PFC3D, a Finite Volume Method-Discrete Element Method (FVM-DEM) landslide house unidirectional coupling model was constructed to simulate and analyze the dynamic development process of landslides under different working conditions, further revealing the generation and evolution process of house cracks. The results show that compared to ordinary non column brick-concrete structures, the bottom frame structure has a stronger ability to resist deformation and failure caused by landslides, and houses located in the front and rear edge sections are more prone to damage and failure than those in the middle. The length-width ratio of the house should not be too small, and the long side of the house is parallel to the slope to help reduce the damage caused by the landslide to the house. This paper summarizes the deformation

收稿日期: 2022-11-04

修回日期: 2024-05-28

基金项目: 重庆市规划与自然资源局科技项目(DK2021Z05null01C); 重庆市地质灾害防治中心科技项目(KJ2021050)

第一作者: 谢强(1975—), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 主要从事地质灾害防治方面的研究工作. E-mail: xieqiang2000@163.com

通信作者: 班宇鑫(1989—), 女, 博士, 副教授. 硕士生导师. 主要从事地质灾害防治方面的研究. E-mail: banyuxin@163.com

characteristics and crack development law of the upper brick-concrete structure under the action of landslide, which can provide reference for the design and arrangement of rural brick-concrete structure.

**Key words:** landslides; brick-concrete structure; crack development; PFC3D; FVM-DEM

滑坡作为频发的地质灾害之一, 不仅是可持续发展经济的重要制约, 也是亟需解决的工程地质问题<sup>[1-4]</sup>. 在野外地质测绘过程中, 地表以及建筑物的变形是分析滑坡基本特征及稳定性宏观分析的重要判据. 然而在实际运用时, 大部分滑坡灾害研究以滑坡位移和地裂缝特征分析为主, 缺少对建筑物裂缝特征的深入研究, 使得滑坡防治因承灾体的研究不足而迟迟不能形成完整防治体系<sup>[5-6]</sup>. 对比地表裂缝, 建筑物裂缝有着裂缝长期可见性以及监测便利性的显著优势, 不会随雨水等干扰条件轻易改变, 同时居民会自主地对裂缝的出现与发展进行长期实时关注, 可为滑坡的监测预警提供了良好的基础.

农村山区作为滑坡频发的受灾区, 砖混结构凭借造价低、修筑方便等优点在现在以及未来很长一段时间都会是农居房屋的主流之一<sup>[7]</sup>. 在对重庆酉阳万木滑坡的调查中, 砖混房屋为最主要的房屋形式, 占比超 60%, 典型的变形形式为裂缝等. 滑坡作用下房屋变形破坏规律研究是滑坡房屋易损性研究的基础, 是大比例尺滑坡风险研究的核心<sup>[8]</sup>. 吴越等<sup>[9]</sup>、Peduto 等<sup>[10]</sup>、Aditi 等<sup>[11]</sup>学者进行了定性或半定量的灾害调查或是物理脆弱性分析. Papathoma 等<sup>[12]</sup>主张以结构类型、楼层数目、有无维护、有无预警以及临坡侧是否有窗等 5 个指标评价滑坡致灾下建筑物的抗灾能力. Singh 等<sup>[13]</sup>选取了建筑物结构类型、施工质量、维护状态等自身参数以及建筑物相对滑坡位置作为建筑物抗灾能力评价参考指标. 曾韬睿等<sup>[14]</sup>提出了基于 InSAR 技术的滑坡灾害强度经验曲线和基于 ABAQUS 二次开发的滑坡空间位移预测相结合的建筑物易损性定量评价方法, 综合选取包含建筑材料等 8 个指标. 这些研究中忽略了建筑物裂缝发育形态及动态发展过程, 将会降低分析的可靠性.

目前针对滑坡灾变机理、稳定性评价、监测预报等研究较多<sup>[15-20]</sup>, 但涉及滑坡作用影响结构变形及演化规律研究较少. 郭果等<sup>[21]</sup>开展了贵州威宁滑坡区房屋裂缝调查工作, 对裂缝成因进行划分, 提出根据裂缝优势走向来判断滑坡主滑方向. 吴越等<sup>[22]</sup>通过数值模拟建立了两种房屋易损性评估模型, 分别用以评估受灾体的破坏程度和破坏概率. 廖孟光<sup>[23]</sup>实地勘察了平原矿区村庄房屋 1 504 户, 详细总结分析了矿区房屋的损伤状况

以及损伤原因, 并将墙裂缝归纳为 4 种: 竖向裂缝、斜裂缝、水平裂缝以及墙体破损. Kumar 等<sup>[24]</sup>利用有限元软件分析了降雨强度改变引发的滑坡对砌体结构的影响, 通过对建筑物进行动态冲击, 分析了滑坡碎片对砌体结构的影响以及砌体结构在冲击载荷下的性能. Liu 等<sup>[25]</sup>建立考虑复杂流固耦合模型(FPSI)的泥石流冲击力预算模型, 模拟出了在泥石流或者山体滑坡过程中, 流体—颗粒—结构以及流体—结构之间地相互作用. 陈兴<sup>[26]</sup>基于离散元算法对滑坡冲击坡底房屋的过程进行了模拟, 结果表明砌体房屋受冲击面的变形破坏特征相近, 整体呈现出随高度增大而减弱的趋势. 余玉婷等<sup>[27]</sup>采用室内缩尺试验对滑坡引起建筑物基础破坏形式进行研究, 试验结果表明, 房屋基础破坏程度随房屋与主滑方向夹角增大而增大. 韩幽铭等<sup>[28]</sup>利用模型试验与数值模拟分析张拉变形区房屋墙体裂缝的扩展规律和应变分布规律. Luo 等<sup>[29]</sup>以深圳一滑坡为原型, 研究了建筑群对滑坡位移的影响以及耗能的机制. 目前研究多对滑坡作用进行一定的简化, 如仅考虑滑坡为水平作用, 忽略滑坡带来的地表沉降或是只考虑滑坡体对房屋的冲击作用而忽略土体与房屋的相互变形, 这些假定均会影响分析结果的准确性. 既有成果为研究滑坡运动过程对上部结构的影响规律奠定了基础, 但在结构本身的布置形式和设计方案方面尚缺乏讨论, 尤其是对砖混结构的变形特征研究较为有限. 因此, 总结滑坡引起的农村山区砖混结构房屋变形特征规律具有较大的研究意义和价值.

本文以重庆市酉阳县万木镇高园子—新田沟滑坡及滑坡区砖混结构为研究对象, 采用现场调查和 Particle Flow Code(PFC)数值模拟相结合的方法, 对房屋变形破坏特征规律进行了研究. 通过实地调查滑坡区 151 座砖混房屋, 收集 28 座损伤房屋基本信息及 110 余条裂缝开展产状, 总结影响房屋破坏程度的因素, 并对调查收集的数据进行拟合, 提出关于房屋布置角度和长宽比设计的建议. 通过 PFC 模拟房屋裂缝的开展过程, 将模拟结果与现场调查结果相对照, 进一步揭示由滑坡引起的农村砖混房屋变形特征规律, 为农村砖混房屋设计、灾后监测点布置提供参考和借鉴.

# 1 滑坡一房屋现场调查分析

## 1.1 空间位置与房屋结构类型

重庆市酉阳县万木镇高园子一新田沟滑坡为典型的土质推移式滑坡, 滑坡区变形迹象多、变形范围广泛、同时建筑物分布较为均匀并且各建筑物的结构类型相似度高, 为研究变形规律提供了可行性. 滑坡区损伤房屋具体分布情况如图1所示. 滑坡平面左侧以冲沟为界, 右侧以地形转折处为界, 后缘根据地形陡缓交界及现状地表变形确定, 前缘以地形陡缓交界处为界, 滑坡体横宽约540 m, 纵长约338~450 m, 面积约 $2.13 \times 10^5 \text{ m}^2$ . 滑坡区域为顺向坡地带, 因纵向冲沟切割形成四沟夹三脊, 冲沟总体呈上、下游切割较浅, 中部切割较深的特点, 冲沟下游沟内多见基岩出露, 且以滑坡区内发育的2条冲沟为界, 3个滑坡区域剪出条件存在较大差异, 故将滑坡分为I区、II区、III区.

调查区内房屋以砖混结构为主, 分为无柱砖混结构及底框砖混结构两类. 房屋面积一般为 $120 \text{ m}^2$ 左右, 长宽比通常在1~2.5之间, 不超过3层, 层高约3~3.7 m; 多采用岩土地基、不设柱的空心砖墙, 现浇梁板建造而成. 依据滑坡区道路、高程、地表及房屋破坏情况将滑坡分为前缘段、中段及后缘段, 在图1中以红线标出, 损伤房屋以绿色图块示意. 从上图可以看出, 损伤房屋集中分布在I区后缘、III区东北部以及滑坡前缘, 滑坡正中段房屋损伤较少. 无柱砖混结构及底框砖混结构分别记录为“砖”和“框”, 汉字后的数字表示房屋层数. 例如, “砖3”表示该变形建筑为3层的无柱砖混房屋. 将滑坡各位置处房屋损伤破坏数量与其总数量的比值定义为房屋破坏率. 如图1所

示, “砖1”包括: F2、F5、F10、F11、F14、F16、F18、F21、F23、F27、F28以及已拆除的1座房屋; “砖2”包括: F1、F6、F8、F9、F19、F22以及已拆除的2座房屋; “框2”包括: F3、F4、F7、F12、F13、F15、F17、F20、F24、F25、F26.



图1 损伤房屋分布

Fig. 1 Distribution of damaged houses

如表1所示, 只有“砖1”、“砖2”、“框2”出现了墙裂缝, 这些建筑也是该滑坡区的主要建筑类型. 而“砖3”、“框3”没有出现墙裂缝, 分析原因可能是该滑坡区3层房屋数量较少. 无柱砖混结构破坏数量为21座, 破坏率23.9%, 而底框砖混结构损伤数量仅有10座, 破坏率15.9%. 其中一层无柱砖混结构损伤数量最多. 滑坡后缘段与中段出现损伤的房屋数量最多, 前缘段较少. 可见, 房屋破坏数量受到房屋自身结构类型和空间分布的明显影响.

表1 不同空间位置各类型房屋破坏数量及破坏率

Tab. 1 Damage quantity and damage rate of various types of houses in different spatial locations

房屋类型	后缘段			中段			前缘段			总计		
	数量	破坏数量	破坏率/%	数量	破坏数量	破坏率/%	数量	破坏数量	破坏率/%	数量	破坏数量	破坏率/%
砖1	8	5	62.5	38	6	15.8	8	2	25.0	54	13	24.1
砖2	8	6	75.0	20	0	0.0	4	2	50.0	32	8	25.0
砖3	0	0	0.0	2	0	0.0	0	0	0.0	2	0	0
框2	19	2	10.5	31	7	22.6	5	1	20.0	55	10	18.2
框3	5	0	0.0	3	0	0.0	0	0	0.0	8	0	0
总计	40	13	32.5	94	13	13.8	17	5	29.4	151	31	20.5

滑坡后缘段和前缘段房屋破坏率高于中段房屋, 即前后缘段在滑坡中相对中段更易出现损伤破坏. 同时无柱砖混结构破坏率要明显高于底框结构, 说明无柱砖混结构在滑坡中相对底框结构更易出现损伤破坏. 另外不同结构类型的房屋破坏率在空间分布上有显著差异, 无柱结构在后缘段破坏率明显要高于前缘段和中段, 而底框结构破坏率则呈现出完全相反的特征, 即前缘段和中段破坏率明显高于后缘段.

采用墙面开裂面积对房屋的破坏程度进行定量评价, 定义为房屋所有墙裂缝长宽乘积之和的数值, 即

$$A_f = \sum_{i=1}^n L_i H_i \quad (1)$$

式中:  $i$  代表第  $i$  条裂缝;  $n$  代表墙裂缝总数;  $L_i$  和  $H_i$  分别为该裂缝的(长/cm)和(宽/mm).

结果如图 2 所示, 可见底框结构的破坏程度远远低于无柱砖混结构, 前缘段的破坏程度最低, 中段和后缘段的破坏程度较为接近. 一层墙承重砖混结构和底框结构有类似规律. 二层无柱砖混结构在空间分布上则有所不同, 中段和前缘段的破坏程度小, 后缘段破坏程度远大于中前段. 可见, 滑坡后缘段为该滑坡区的严重受灾区, 相比于无柱砖混结构, 底框结构房屋抵抗滑坡诱发变形破坏的能力更强.

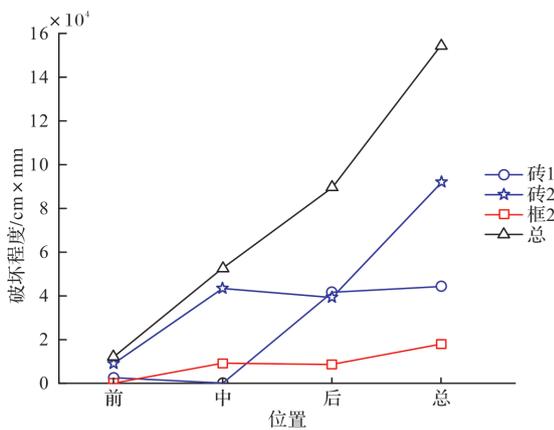


图 2 不同空间位置各类型房屋破坏程度

Fig. 2 Damage degree of various types of houses in different spatial locations

### 1.2 房屋布置角度与长宽比

以破坏程度最高的一层砖混房屋为例, 见图 3, 研究房屋布置角度对房屋破坏程度的影响. 以房屋垂直主滑方向投影长度为  $x$ , 房屋平行主滑方向投影长度为  $y$ , 房屋破坏程度为  $z$ , 利用 Matlab 拟合预期房屋破坏程度  $z^*$ , 拟合所用数据及拟合结果如表 2 所示.

$$z^* = 53.23x + 705.7y - 3\ 339 \quad (2)$$

假定房屋平面投影为矩形, 面积为  $s(\text{m}^2)$ , 房屋宽比  $k(k \geq 1)$ , 房屋长边走向与滑坡主滑方向夹角  $\alpha^\circ$ , 改写式(2)可得

$$z^* = a \sin(\alpha + \beta) - 3\ 339, \alpha, \beta \in [0, 90^\circ] \quad (3)$$

式中:

$$a = \sqrt{\frac{s}{500\ 846(k + k^{-1}) + 150\ 258}}, k \geq 1 \quad (4)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{53.25k^{0.5} + 705.7k^{-0.5}}{a}\right), k \geq 1 \quad (5)$$



(a) 前缘段房屋裂缝(F20) (b) 后缘段房屋裂缝(F6)

图 3 裂缝现场照片

Fig. 3 Scene photos of fractures

表 2 房屋破坏程度拟合数据

Tab. 2 Fitting data of housing damage degree

房屋编号	$x$	$y$	$z$	$z^*$
F21	2.94	9.44	4 003	4 012
F28	16.68	10.98	5 328.5	5 297
F10	14.03	13.93	7 197	7 238
F14	8.67	17.19	9 270	9 049

由(4)、(5)式可以得到  $\beta \geq 45^\circ$ , 并随  $k$  递增,  $z^*$  在  $\alpha = 90^\circ$  时有最小值, 在  $\alpha = (90^\circ - \beta)$  时有最大值. 当  $k$  为定值时,  $z^*$  随  $\alpha$  变化, 在  $[0, 90^\circ - \beta]$  内递增, 在  $(90^\circ - \beta, 90^\circ]$  内递减; 当  $\alpha = 90^\circ$  时,  $z^*$  随  $k$  增大而减速减小. 表明房屋的破坏程度在房屋长边走向与滑坡主滑方向夹角  $\alpha = 90^\circ$  时最小, 并在一定角度内随夹角  $\alpha$  的减小而增大, 于  $\alpha = (90^\circ - \beta)$  时达到峰值后减小; 破坏程度的最小值随房屋长宽比增大而减速减小. 由于滑坡多以坡向为主滑方向, 布置房屋时长边走向宜基本平行斜坡走向, 设计房屋的长宽比不宜过小, 以减少滑坡对房屋造成的破坏. 同时在灾后滑坡特征识别时可以通过房屋破坏程度与朝向的大概关系确定滑坡主滑方向.

## 2 滑坡-房屋三维数值模拟分析

### 2.1 滑坡运动过程分析

以重庆酉阳高园子滑坡为原型,在 PFC3D 中借助 Zone 单元以有限体积法构建滑坡三维网格模型;根据现场典型砖混房屋,利用 Block 单元建立房屋的砌体、过梁、圈梁、梁板基础等,而其中的砂浆以接触的形式以线性平行粘结模型建立,组合以离散元方法构建砖混房屋三维模型。线性平行粘结模型可以认为是两个界面的结合:一个是承载力的无限小尺寸的有摩擦阻界面,它不能抵抗相对转动,利用莫尔-库仑强度理论来调节滑动;另一个是承载力和力矩的有限大尺寸的线弹性粘结界面,它持续工作,直到粘结内的最大法向应力或剪应力超过强度极限,粘结断裂,断裂后无法恢复。正因如此线性平行粘结模型可以很好地模拟砂浆。模型如图 4 所示。

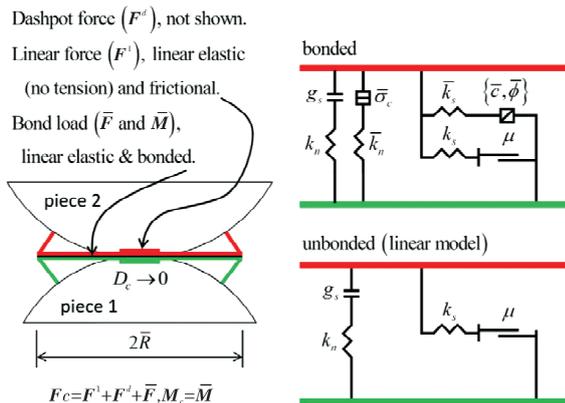


图 4 线性平行粘结模型力学模型

Fig. 4 Mechanical model of linear parallel bond model

最后将房屋模型置于滑坡强变形区,利用强度折减法模拟滑坡变形发育的动态全过程,以此观察分析滑坡作用下滑坡-房屋的变形规律及机理。根据勘察资料,建立 1:1 模型如图 5 所示。

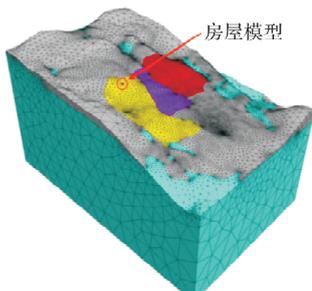


图 5 滑坡-房屋几何模型

Fig. 5 Geometric model of landslide-house

模型中土体细观参数和砌体细观参数分别如

表 3 和表 4 所示。滑坡变形发育全过程的位移演化过程如图 6 所示。

表 3 土体参数

Tab. 3 Soil parameters

	滑床	覆土	折减后滑体土
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 500	1 950	1 950
杨氏模量/Pa	$1 \times 10^{10}$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
泊松比	0.27	0.3	0.3
抗拉强度/Pa	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^3$	$1 \times 10^3$
粘聚力/Pa	$2.4 \times 10^6$	$2 \times 10^4$	$1 \times 10^4$
内摩擦角/ $^\circ$	30	25	13

表 4 砌体参数

Tab. 4 Masonry parameters

参数名称	数值	参数名称	数值
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	600	摩擦系数	0.7
阻尼	0.7	刚度比	1.0
弹性模量/Pa	$1 \times 10^9$	法向临界阻尼比	0.2
粘聚力/Pa	$0.43 \times 10^6$	切向临界阻尼比	0.2
抗拉强度/Pa	$0.43 \times 10^6$	内摩擦角/ $^\circ$	30

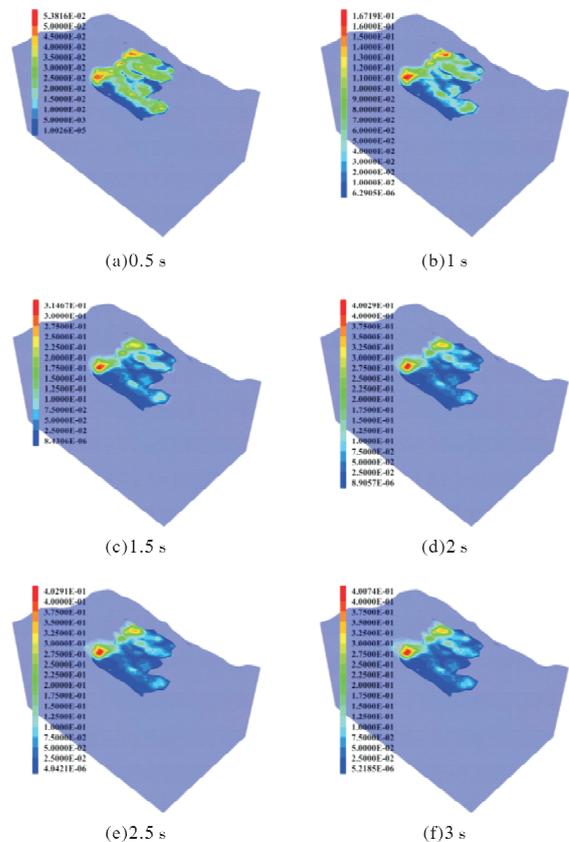


图 6 滑坡位移分布

Fig. 6 Direction of landslide displacement

如图 7 所示,滑坡 I 区 II 区后缘、III 区中段及滑坡前缘段位移方向与主滑方向基本平行,在

各区滑坡交界处滑坡方向向交界线处倾斜, III 区后缘位移方向较为复杂, 整体表现为向左倾斜, 数值模拟滑坡方向与现场监测点位移方向基本吻合, 对该模型的正确性进行了验证. 同时滑坡位移分布较大区域对现场房屋破坏程度也较大.

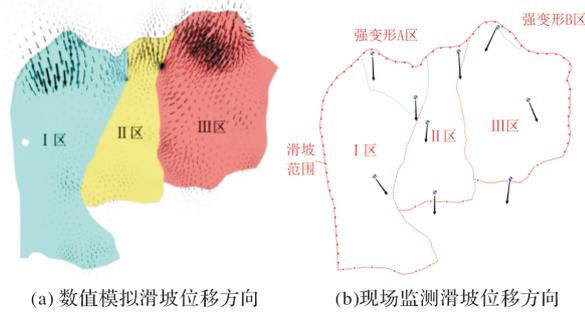


图 7 滑坡位移方向

Fig. 7 The direction of landslide displacement

### 2.2 空间位置分析

对西阳万木滑坡房屋破坏影响因素分析结果可以发现, 处于不同空间位置不同类型房屋的破坏率以及破坏程度有较明显差别. 这一现象是由不同空间位置滑坡变形特征不同引起的. 因此, 为了更加清晰直观地表征不同位置滑坡土体的变形运动特征, 利用 PFC 在滑坡的后缘、中段、前缘分别设置 3 个监测点, 其具体布置如图 8 所示.

对各点位移和速度进行实时监测, 监测结果如图 9、10 所示. 滑坡前缘、中段、后缘的各监测点土体位移均表现出相同特征: 位移随时间地增加先加速增加, 之后增速逐渐放缓, 最后经历一定时间缓慢回弹, 位移略减小后基本保持不变, 直至平衡. 滑坡后缘位移为 0.22~0.34 m, 中段为 0.045~0.075 m, 前缘位移为 0.027~0.047 m. 后缘平均位移远远超过前缘和中段平均位移, 且前缘、中段、后缘的位移到达峰值的时间逐渐靠后.

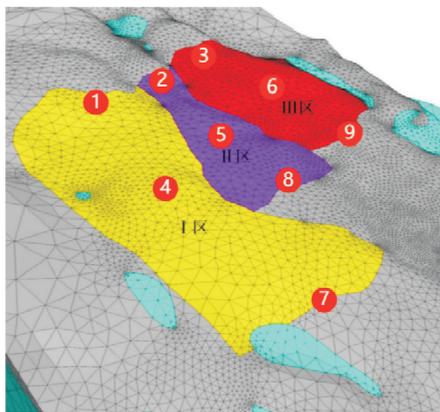
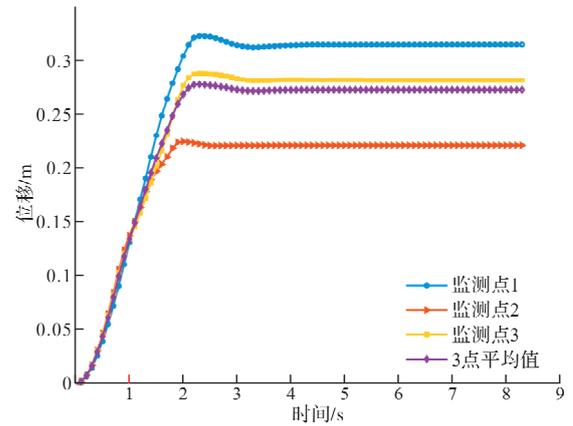
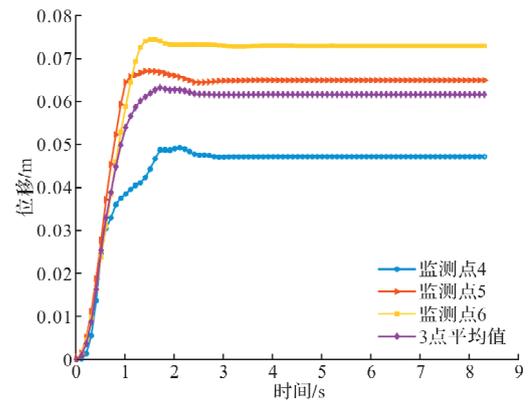


图 8 滑坡特征监测点位置

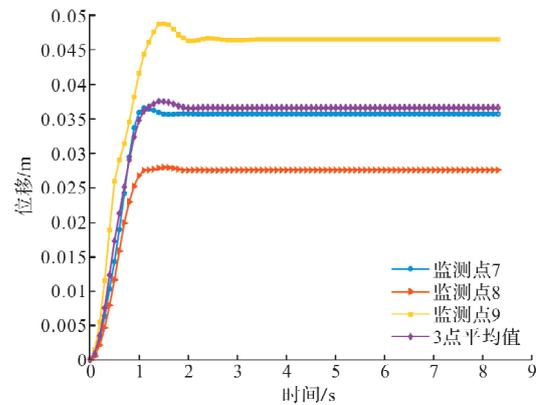
Fig. 8 Location of landslide characteristic monitoring points



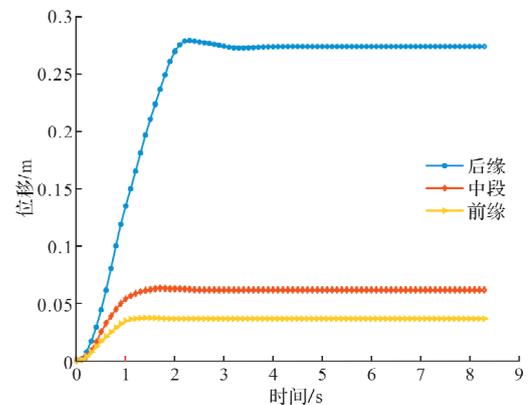
(a) 后缘位移



(b) 中段位移



(c) 前缘位移



(d) 平均位移

图 9 监测点位移

Fig. 9 Monitoring points displacement

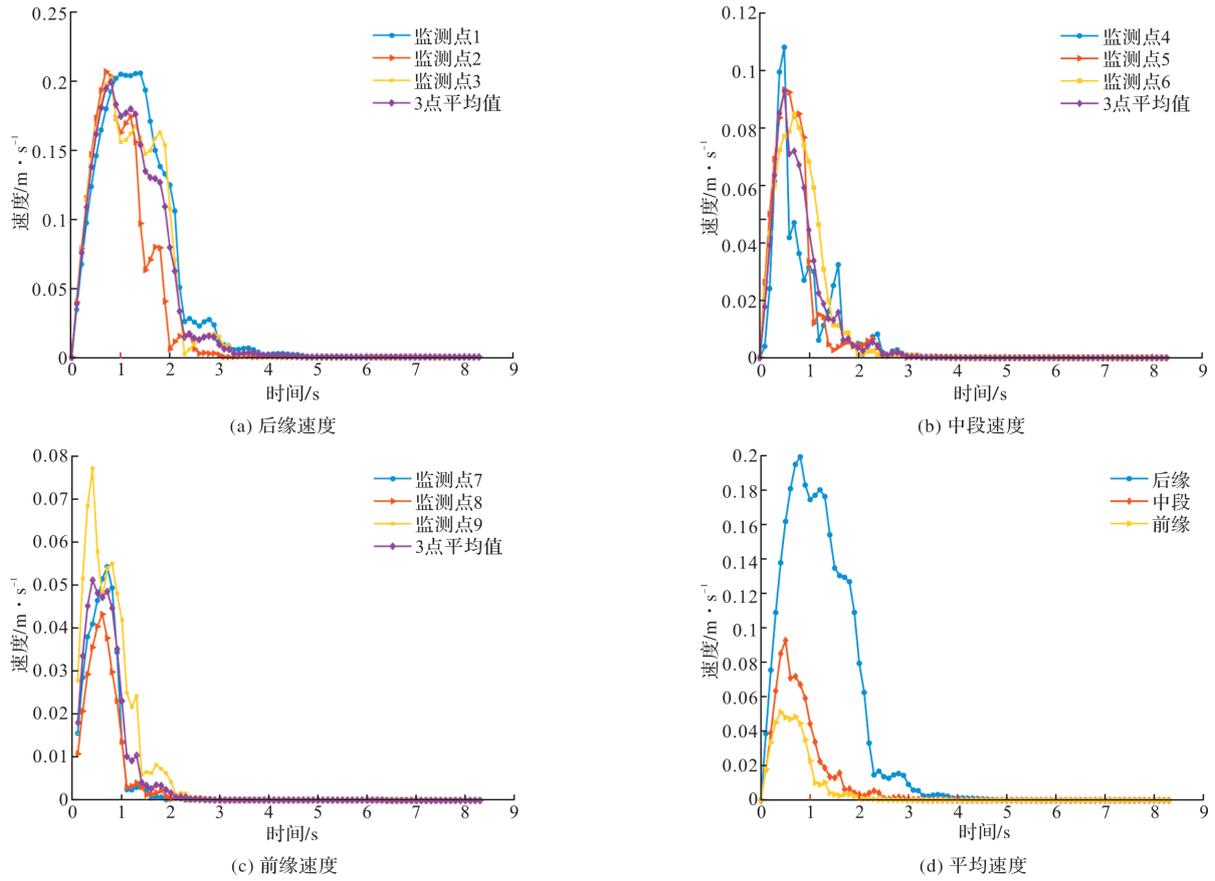


图 10 监测点速度

Fig. 10 Monitoring points velocity

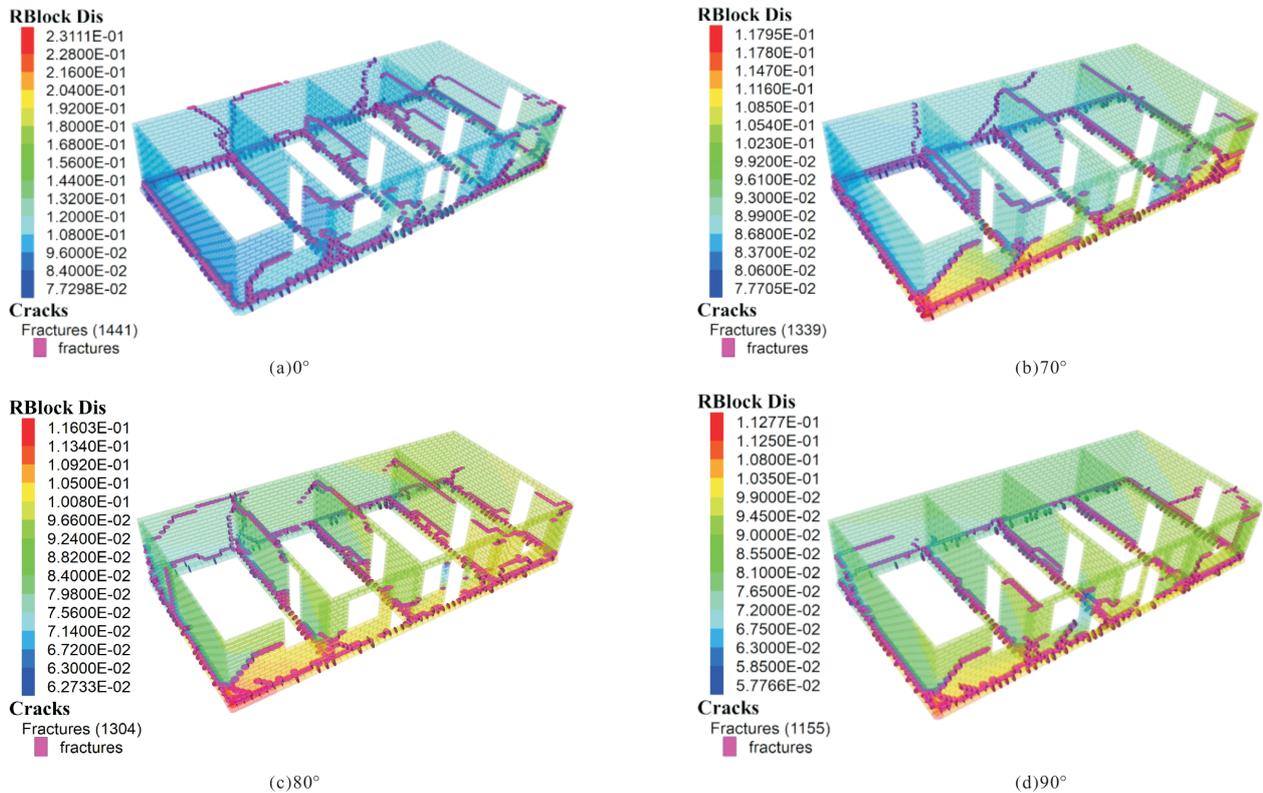


图 11 房屋裂缝开展情况

Fig. 11 Development of house cracks

滑坡前缘、中段、后缘的各监测点土体变形速度同样表现出相似特征: 滑坡速度随时间先匀速增加, 至最大速度后匀速减小, 且减小速度与先前增加速度相仿, 后减小至约最大位移 1/10 时缓慢减小至零. 滑坡后缘速度峰值约 0.205 m/s, 中段速度峰值约 0.085~0.11 m/s, 前缘速度峰值约 0.043~0.077 m/s. 从各监测点平均速度可以看到, 三者曲线变化趋势极为相似, 基本上每个时间点都有后缘速度>中段速度>前缘速度的规律, 同时前缘、中段、后缘的位移到达峰值的时间逐渐靠后. 这与现场房屋破坏程度后缘>中段>前缘的规律是一致的.

### 2.3 房屋布置角度分析

由于农村山区房屋通常采用房屋长边近于平行坡走向修建, 设置房屋长边与滑坡主滑方向 70、80、90°, 并加入 0° 作为对比, 合计 4 种工况, 如图 11 所示.

从各工况裂缝开展过程可以发现, 裂缝首先于纵横墙连接处出现, 并最终集中于门窗边、纵横墙节点处以及墙上下端. 同时, 房屋端部裂缝开展程度明显要大于中部, 这与现场调查情况相符合. 由于 PFC 建立块体为刚性, 不能产生断裂, 数值模拟在纵横墙节点处形成稍显杂乱的短裂缝, 与现场调查结果有一定出入. 在现场调查中此处多会由于砖块的断裂形成一条趋向于竖向的裂缝. 同样的原因使得数值模拟结果中难以产生竖向的贯穿裂缝. 四种工况下 70、80、90° 的裂缝开展较为相似, 尤其是房屋前部裂缝开展形式基本一致, 区别点主要出现于横墙水平裂缝和后纵墙裂缝上, 90° 开展裂缝数量明显更少. 在裂缝开展长度上, 90° 最小, 其次是 70° 和 80°, 0° 开展最大, 0° 时不仅主要裂缝发育长度大, 还出现不少短裂缝. 在位移上呈现整体前大后小的特征, 并且随着角度增大前部位移逐渐减小. 同时在断裂键数量上呈现 0° > 70° > 80° > 90° 的特征. 房屋在在位移上呈现整体前大后小的特征, 并且随着角度增大前部位移逐渐减小.

如图 12 所示, 各工况下房屋在前端均发生了不同程度的错动, 且以左侧转角点出位移最大, 使下盘向前形成错动. 结合图 8 可知, 0° 错动范围最大, 其次是 70°, 80° 与 90° 出现错动的范围基本一致, 选取位移最大的脚点处裂缝宽度进行监测.

如图 13 所示, 裂缝宽度变化时间曲线与图 8 滑坡位移变化时间曲线形式类似. 在出现裂缝后, 裂缝竖向宽度先随时间匀速增加, 约 2 s 时 0° 对应

裂缝竖向宽度到达峰值, 之后保持不变, 在 2.3 s 左右 70、80、90° 裂缝竖向宽度达到峰值并经过约 0.7 s 的小幅回缩后基本保持不变. 对比四种工况可知裂缝竖向宽度 0° > 70° ≈ 80° > 90°. 而裂缝水平宽度先加速增大, 后出现小幅度振荡, 最后趋于稳定. 四条曲线变化形态类似, 裂缝水平宽度值上表现为 70° ≈ 80° > 90° > 0°, 但裂缝水平宽度值远小于裂缝的竖向宽度值. 综合裂缝的宽度值和水平宽度及错动范围可知、因此可知错动的开展程度上有: 0° > 70° > 80° > 90° 的规律. 综合裂缝的发育程度和错动的开展程度, 即房屋的损伤破坏程度, 均有 0° > 70° > 80° > 90° 的规律. 这与现场调查分析的结论一致.

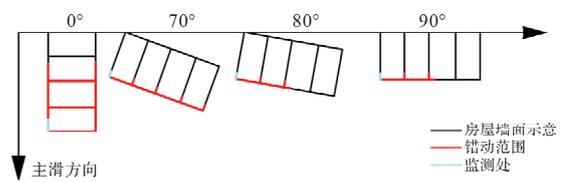


图 12 房屋错动范围

Fig. 12 Scope of house dislocation

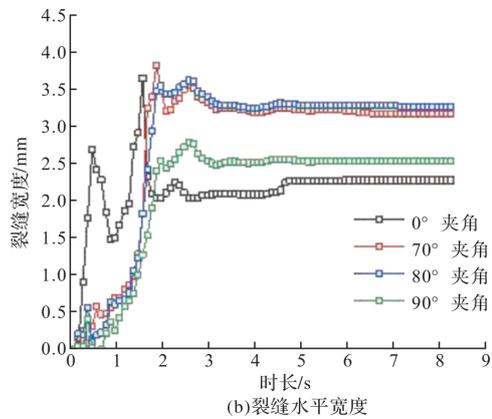
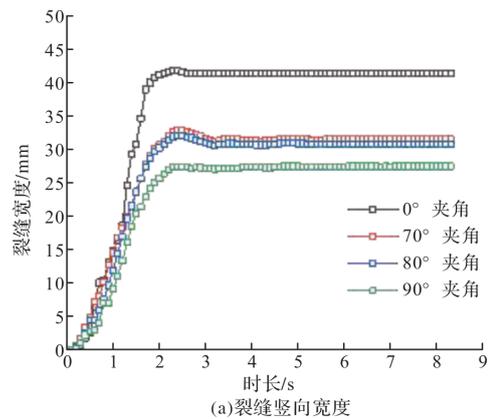


图 13 房屋错动裂缝宽度

Fig. 13 Width of dislocation cracks

## 3 结论

以重庆市酉阳县万木滑坡为研究对象, 通过

实地调查分析了滑坡区房屋变形破坏特征规律,基于PFC建立了滑坡-房屋三维数值模型,模拟并分析了滑坡发育动态过程以及房屋空间位置和布置角度对变形特征的影响,主要结论如下:

(1)砖混房屋裂缝开展受到房屋结构类型、长宽比的影响:相比于无柱砖混房屋,底框砖混房屋抵抗滑坡诱发变形破坏的能力更强.在以房屋横轴近似平行坡向、面积相似的前提下,长宽比大的砖混房屋受滑坡影响的变形破坏程度更低;

(2)同时砖混房屋裂缝开展受空间位置、布置角度因素的影响:处于前后缘段的房屋相对中段房屋更易出现损伤破坏,但破坏程度上后缘段最大、中段其次、前缘最小,这与数值模拟中的滑坡位移速度的大小是相匹配的;在以房屋横轴近似平行坡向的情况下,布置房屋横轴与坡向夹角越小,越有利于降低滑坡对房屋的影响,而布置房屋横轴垂直于坡向对抵御滑坡诱发的变形是不利的;

(3)房屋端部裂缝开展程度明显要大于中部.数值模拟揭示了房屋裂缝开展发育的过程:裂缝首先于纵横墙连接处出现,并最终集中出现于门窗边、纵横墙节点处以及墙上下端.

## 参考文献 References

- [1] 蒲娉璠. 重庆市滑坡灾害时空分布特征与易发性评价研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.  
PAN Pingfan. Analysis of temporal and spatial characteristics of landslide disaster and landslide susceptibility assessment in Chongqing[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.
- [2] 刘运泽, 洪勇, 李柏霄. 隧道洞口古滑坡堆积体边坡综合加固治理技术研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(3): 351-358.  
LIU Yunze, HONG Yong, LI Boxiao. Study on the comprehensive reinforcement and control technology of the ancient landslide accumulation body slope of tunnel [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(3): 351-358.
- [3] XU D, PENG L, LIU S, et al. Influences of risk perception and sense of place on landslide disaster preparedness in south-western China [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2018, 9(2):167-180.
- [4] LI G, LI Y, YAO H, et al. The influence of land urbanization on landslides: An empirical estimation based on Chinese provincial panel data[J]. Science of the Total Environment, 2017, 595:681-690.
- [5] FLORKOWSKA L, BRYT-NITARSKA I, KIEWICZ GAWA R, et al. Monitoring and assessing the dynamics of building deformation changes in landslide areas [J]. Buildings, 2019, 10(1):3-3.
- [6] 陈琴. 慢速滑坡地表变形影响下砌体结构破坏响应及易损性模型研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2022.  
CHEN Qin. Study on failure behavior and vulnerability of masonry structure caused by ground cracks on slow-moving landslides[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2022.
- [7] 田得元. 农村建筑区域特点及典型结构地震易损性分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2021.  
TIAN Deyuan. Analysis of rural residential regional characteristics and seismic vulnerability of typical structures [D]. Harbin: The Institute of Engineering Mechanics China Earthquake Administration, 2021.
- [8] 覃瀚萱, 桂蕾, 余玉婷, 等. 基于滑坡灾害预警分级的应急处置措施[J]. 地质科技通报, 2021, 40(4):187-195.  
QIN Hanxuan, GUI Lei, YU Yuting, et al. Emergency disposal measures based on landslide hazard warning classification[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(4): 187-195.
- [9] 吴越, 向灵均, 吴同情, 等. 基于受灾体空间概率的滑坡灾害财产风险定量评估[J]. 岩石力学与工程报, 2020, 39(增2): 3464-3474.  
WU Yue, XIANG Lingjun, Wu Tongqing, et al. Quantitative assessment of landslide property risk based on impact probability of element at risk[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2): 3464-3474.
- [10] PEDUTO D, FERLISI S, NICODEMO G, et al. Empirical fragility and vulnerability curves for buildings exposed to slow-moving landslides at medium and large scales[J]. Landslides, 2017, 14(6): 1993-2007.
- [11] ADITI S, KANUNGO S. A modified approach for semi-quantitative estimation of physical vulnerability of buildings exposed to different landslide intensity scenarios [J]. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2019, 13(1): 66-81.
- [12] PAPATHOMA-KOHLER M, NEUHAUSER B, RATZINGER K, et al. Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides[J]. Natural Hazards & Earth System Science, 2007, 7(6): 765-779
- [13] SINGH A, KANUNGO D P, PAL S. Physical vulnerability assessment of buildings exposed to landslides in India[J]. Natural Hazards, 2019, 96(2): 753-790.
- [14] 曾韬睿, 殷坤龙, 桂蕾, 等. 基于滑坡致灾强度预测的建筑物易损性定量评价[J]. 地球科学, 2023, 48(5): 1807-1824.

- ZENG Taorui, YIN Kunlong, GUI Lei, et al. Quantitative vulnerability analysis of buildings based on landslide intensity prediction[J]. *Earth Science*, 2023, 48(5): 1807-1824.
- [15] 陈大伟, 吴志坚, 梁超, 等. 通渭黄土滑坡变形特征及致灾机理分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(1): 24-33.  
CHEN Dawei, WU Zhijian, LIANG Chao, et al. Deformation characteristics and disaster-causing mechanism analysis of Tongwei loess landslide[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(1): 24-33.
- [16] 刘卫南, 谢谟文. 基于点云密度特征的滑坡位移监测方法[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3748-3756.  
LIU Weinan, XIE Mowen. Landslide monitoring based on point cloud density characteristics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3748-3756.
- [17] DELGADO J, GARRIDO J, LENTI L, et al. Unconventional pseudostatic stability analysis of the Diezma landslide (Granada, Spain) based on a high-resolution engineering-geological model[J]. *Engineering Geology*, 2015, 184: 81-95.
- [18] ZHENG H. A three-dimensional rigorous method for stability analysis of landslides[J]. *Engineering Geology*, 2012, 145-146: 30-40.
- [19] 周洪福, 张卓婷, 韦玉婷. 基于滑体自重效应的滑带土强度参数取值方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(5): 1045-1053.  
ZHOU Hongfu, ZHANG Zhuoting, WEI Yuting. Method for determining shear strength parameters of sliding-zone soils considering weight effect of landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(5): 1045-1053.
- [20] 毛刚, 胡月萍, 陈媛. 地质灾害频发山区聚落安全性探索——以横断山系的集镇和村庄为例[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 46(1): 101-108.  
MAO Gang, HU Yueping, CHEN Yuan. The safety of the settlement in mountain area with frequent geological disasters-Examples of villages and towns in the Hengduan Mountains[J]. *J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2014, 46(1): 101-108.
- [21] 郭果, 陈筠, 叶永青. 贵州威宁房屋裂缝与地质灾害的关系探讨[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(1): 79-82.  
GUO Guo, CHEN Jun, YE Yongqing. The relation between house crack and geological disaster in Weining, Guizhou[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(1): 79-82.
- [22] 吴越, 刘东升, 张小飞, 等. 滑坡灾害易损性定量评估模型应用与比较[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(5): 916-921.  
WU Yue, LIU Dongsheng, ZHANG Xiaofei, et al. Application and comparison of quantitative assessment models on landslide vulnerability[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(5): 916-921.
- [23] 廖孟光. 平原矿区采动影响下村庄房屋损坏特征与评价指标研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.  
LIAO Mengguang. Research on damage characteristics and evaluation index of building caused by mining in Plain village[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, (Beijing), 2015.
- [24] KUMAR V S, CHANDRASEKARAN S S. Impact analysis of a building collapse caused by a rainfall-induced landslide in Kerala, India [J]. *Buildings*, 2022, 12(9): 1395.
- [25] LIU C, YU Z, ZHAO S. A coupled SPH-DEM-FEM model for fluid-particle-structure interaction and a case study of Wenjia gully debris flow impact estimation [J]. *Landslides*, 2021, 18: 2403-2425.
- [26] 陈兴. 陕南堆积层滑坡运动特征及致灾强度预测研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.  
CHEN Xing. Prediction study of movement characteristics and impact intensity of accumulation landslide of southern Shanxi[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [27] 余玉婷, 桂蕾, 朱兴华, 等. 滑坡不同作用模式下房屋基础变形特征[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(6): 236-245.  
YU Yuting, GUI Lei, ZHU Xinghua, et al. Deformation characteristics of building foundation under different action mode of landslide[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(6): 236-245.
- [28] 韩幽铭, 桂蕾, 朱兴华, 等. 滑坡张拉变形区砌体房屋变形破坏特征数值模拟[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(3): 55-62.  
HAN Youming, GUI Lei, ZHU Xinghua, et al. Numerical simulation of masonry building deformation and failure characteristics in landslide tension areas [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*. 2023, 42(3): 55-62.
- [29] LUO Y H, SHEN P, ZHANG M L. How does a cluster of buildings affect landslide mobility: a case study of the Shenzhen landslide[J]. *Journal of the International Consortium on Landslides*, 2019, 16(3): 2421-2431.