

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240926001

基于构件失效的RC框架结构泥石流灾害 易损性分析*

许戈豪^{1,2}, 李碧雄^{1,2}, 赵开鹏¹, 范松海³, 钟声¹, 卜祥航³, 王志宇¹

(1. 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 2. 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室,
四川 成都 610065; 3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610095)

摘要: 泥石流灾害的房屋易损性可以预测结构在泥石流灾害下的失效概率, 为防灾减灾策略制定提供数据参考。以四层钢筋混凝土框架为研究对象, 采用ABAQUS建模, 基于结构在泥石流作用下的受损特征, 建立了房屋底层局部构件力学模型。通过模拟部分构件失效引起的连续性倒塌, 构建了以构件失效数量、失效位置和毁坏状况表征房屋性能状态的标准, 并结合泥石流淤积作用造成的房屋功能性损失, 形成了框架结构的易损性分级方法。然后, 采用蒙特卡洛模拟方法生成数据集, 对泥石流与房屋的相互作用过程进行误差控制, 构建了一套结构分析、破坏评价到房屋失效概率计算的框架结构易损性分析方法, 结果表明: (1) 相较于单一的浆体冲击, 有块石加入的泥石流冲击大幅降低了构件的失效阈值, 且这一趋势随着流深的增加逐渐加剧; (2) 2根及以上数量的相邻框架柱连续失效即可导致房屋发生严重破坏; (3) 在评估房屋损伤时, 冲击角度的变化使得房屋构件直接遭受的泥石流强度降低, 但同时存在导致更多数量构件受到破坏的概率。

关键词: 泥石流; 框架结构; 构件失效; 易损性分析

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0337-13

Vulnerability Analysis of RC Frame Structures to Debris Flow Hazards Based on Component Failure

XU Gehao^{1,2}, LI Bixiong^{1,2}, ZHAO Kaipeng¹, FAN Songhai³,
ZHONG Sheng¹, BU Xianghang³, WANG Zhiyu¹

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. National Key Laboratory of Intelligent Construction and Health Monitoring for Deep Underground Engineering,
Chengdu 610065, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610095, China)

Abstract: The vulnerability of buildings to debris flow hazards enables the prediction of structural failure probability under debris flow conditions, thereby providing data references for the formulation of disaster prevention and mitigation strategies. Taking a four-story reinforced concrete frame as the research object, ABAQUS modeling was employed. Based on the structural damage characteristics under debris flow, a mechanical model for the local components on the ground floor of the building was established. By simulating the progressive collapse induced by partial component failure, a criterion

* 收稿日期: 2024-09-26; 修回日期: 2024-12-22

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5500-202326527A-3-2-ZN)资助

作者简介: 许戈豪(1999—), 男, 硕士研究生。主要从事防灾减灾研究。E-mail: xgh00108@163.com

通信作者: 李碧雄(1970—), 女, 教授, 博导, 博士。主要从事防灾减灾研究。E-mail: libix@126.com

for characterizing the building performance was established, represented by the number of component failures, failure locations, and damage conditions. This was then combined with the functional losses caused by debris flow deposition to form a vulnerability classification method for frame structures. Subsequently, the Monte Carlo simulation method was used to generate datasets and control errors in the interaction process between debris flow and buildings. A vulnerability analysis method for frame structures encompassing structural analysis, damage evaluation, and failure probability calculation was developed. The results indicated that: (1) compared to the impact of single-phase slurry flow, debris flow containing boulders significantly reduced the failure threshold of components, and this trend intensified with increasing flow depth. (2) The continuous failure of two or more adjacent frame columns could lead to severe building damage. (3) When assessing building damage, changes in the impact angle reduced the intensity of debris flow directly experienced by building components, but also simultaneously increased the probability of more components being damaged.

Keywords: debris flow; frame structure; component failure; vulnerability analysis

0 引言

泥石流是我国西部山区的主要地质灾害,极大地威胁着人类的生命财产安全。仅2019年至2022年间,全国就发生了2 074起泥石流事件^[1]。作为山区多层建筑物的典型结构形式,钢筋混凝土(Reinforced Concrete)框架结构在泥石流灾害中频繁遭到破坏。易损性分析量化了研究对象在自然灾害下的抵抗能力和风险损失^[2-3]。因此,开展泥石流作用下的RC框架结构易损性研究具有重要工程意义。

目前国内外学者主要通过统计灾后数据的方式建立流型灾害(滑坡、洪水、泥石流)强度与房屋损坏的关系,其研究对象大多集中于大面积区域的损失评估^[4-7],较少从单体建筑的物理损伤机制出发来预测房屋的损伤。X. P. Sun等^[8]提出了一种考虑滑坡滑出影响的概率方法,通过对整栋房屋进行侧向推移,得到框架结构在滑坡冲击下发生不同极限状态的超越概率。F. Parisi等^[9]基于房屋的破坏形态,以流速为强度指标,绘制了框架结构在滑坡冲击下的易损性曲线。M. Del Zoppo等^[10]开发了一种针对洪水灾害下的框架结构失效风险计算方法,并以水流深度为强度指标绘制出结构的易损性曲线。陈旭丹等^[11]将整栋建筑视为悬臂构件,以集中力代替泥石流冲击效应的方式模拟框架结构的破坏,基于房屋整体的损伤状态描述给出了结构的易损性分级方法,未考虑局部构件失效引发结构渐进破坏的机理演化。基于此,现有关于泥石流对房屋易损

性的研究极少报道。研究发现^[12],不同于洪水和土流的侧向推力,泥石流作为一种高浓度的固液两相体,在遭遇阻碍时既会产生浆体的动水压力,同时也存在固体颗粒的集中力。H. Y. Luo等^[13]模拟了泥石流冲击下的房屋动态破坏过程,结果表明灾害作用下房屋的正面墙体首先发生破坏,随后出现第一排柱子的局部失效,当底部构件无法承受结构荷载时发生房屋的整体倾覆。在含有大块石的泥石流冲击下,框架结构存在由于底层框架柱部分失效继而引发结构整体失稳的情况^[14]。综上所述,在RC框架结构泥石流灾害易损性分析时,极少研究针对泥石流荷载特点,从构件失效视角计算房屋发生不同程度损伤的失效概率。

本文以常见的四层框架结构为研究对象,以流速^[15]、流深^[16]和块石粒径^[11]作为灾害强度指标,以泥石流作用下构件局部失效为基础,采取静力分析的方法建立泥石流荷载下的局部构件力学模型,通过分析底层承重构件部分失效后造成的房屋连续性倒塌影响,提出划分房屋性能状态的评价指标,并结合泥石流淤积引起的功能损失,构建房屋损伤分级标准。同时,采用蒙特卡洛模拟方法量化泥石流与房屋相互作用的不确定性,建立构件的失效概率曲面和房屋的易损性曲线(或曲面),以期为泥石流作用下的房屋灾损评估提供研究参考。

1 框架结构模型与构件承载能力模型

1.1 RC框架建模

2008年5·12汶川特大地震产生约4亿立方米的

松散物料^[17],震后周边地区泥石流活动显著增加。以汶川地区典型的灾后重建房屋为研究对象,结合当地抗震设防标准,选取了纵向三跨和横向两跨的四层钢筋混凝土框架结构进行分析。房屋抗震设防烈度为8度,设计地震加速度为0.2g,场地类别为II类,设计地震分组为第一组。如图1所示,结构层高3 m,采用HRB400级纵筋、HPB300级箍筋、C30级混凝土浇筑而成。填充墙选用MU15普通烧结砖和M5砌筑砂浆砌筑。房屋底端采取固定约束,不考虑桩—土—结构的影响。结构除承受自重外,每层还受到1.6 kN/m²的恒荷载和2.0 kN/m²的活荷载。

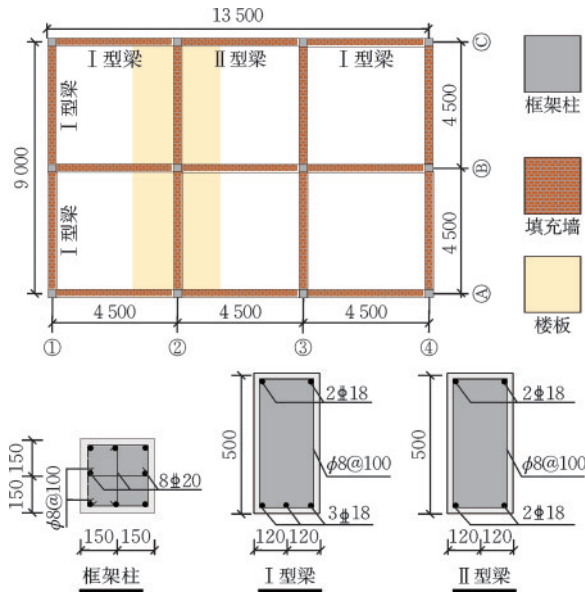


图1 房屋平面布置及构件

Fig.1 Floor plan and component details of building

使用ABAQUS软件模拟构件破坏的全过程,梁、板、柱构件选用C3D8实体单元、钢筋选用T3D2桁架单元。混凝土本构采用塑性损伤模型^[18]、钢筋采用双折线理想弹塑性本构。

1.2 局部构件承载力简化模型

1.2.1 构件简化模型

底层填充墙和框架柱是泥石流灾害中的主要受损构件,受损形式有外围墙体的面外破坏^[19]、框架柱的弯曲、剪切失效^[20]等。以图1中框架结构的底层构件为研究对象,建立图2所示的局部构件简化模型:将填充墙视为单位宽度固接于地基上的悬臂梁;定义框架柱为底端固定,顶端的位移和转角受到式(1)所示线性约束的弹簧铰构件。

$$Q = K\omega = \alpha \frac{EI}{H^3} \omega, M = G\theta = \beta \frac{EI}{H} \theta \quad (1)$$

式中, M 、 Q 、 θ 、 ω 分别为约束截面的弯矩、剪力、转角和位移; α 、 β 分别为位移、转动刚度系数; EI 为构件截面抗弯刚度; H 为构件净高。

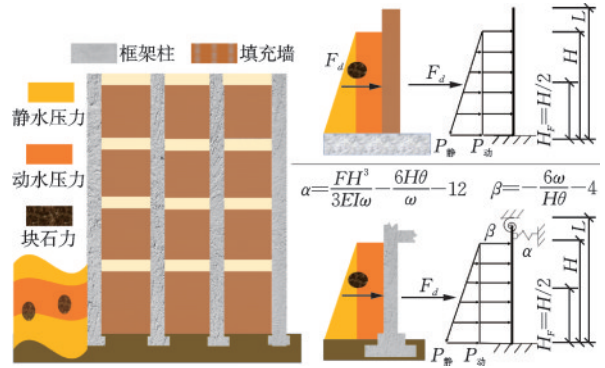


图2 局部构件力学模型示意

Fig.2 Schematic diagram of mechanical models of local components

弹簧铰系数 α 、 β 与房屋的结构布置相关,基于设计的房屋模型,采用单位荷载法,使用ABAQUS软件计算得到表1中的底层框架柱弹簧铰刚度系数,可以看出:相较于房屋边柱,角柱的刚度较小、约束能力更弱,意味着在遭遇相同强度冲击时后者更容易失效。

表1 1 000 N冲击下的底层框架柱系数 α 、 β 取值

Table 1 Values of bottom frame column coefficients α and β under impact force of 1 000 N

框架柱类型	位移/mm	转角	$EI/(N \cdot mm^2)$	H/mm	α	β
角柱	1.77E-02	6.58E-06	2.23E+13	2 500	33	2.4
边柱	1.09E-02	4.25E-06	2.23E+13	2 500	58	2.2

1.2.2 泥石流冲击效应计算

淤积和冲击是泥石流破坏房屋的主要形式^[11],将泥石流对房屋的冲击效应划分为浆体冲击和块石冲击两类。选取流速、流深表征泥石流的浆体冲击强度,并以流深的1/2^[21]处作为块石冲击的作用点。假定两者分别以分布力和集中力的形式对构件施加侧向推力^[9]。

(1) 浆体压力

静水压力沿水流深度服从三角形分布。动水压力基于缩尺流体冲击试验^[22]推导的公式(2)^[23]计算,该式不仅可以考虑流速、流深对浆体冲击力的

影响,还可以弥补传统泥石流流动水压力公式^[24]中弗劳德数过大时的局限性。当泥石流流向与构件存在夹角 α 时,需对浆体流速沿构件迎流面的法向进行分解以表征动水压力冲击强度。

$$P_{\text{动}} = \left(\alpha \left(\frac{V}{\sqrt{gh}} \right)^b + c \right) \rho V^2 \sin \alpha^2 \quad (2)$$

式中, $P_{\text{动}}$ 为浆体动压力; v 为流速; h 为流深; a 、 b 、 c 为弗劳德数系数,与流体密度、流速大小以及撞击位置有关,经试验计算而得。

(2) 块石冲击压力

块石冲击力的计算依赖于试验和观测的数据,其值与构件的支承条件有关^[25]。《泥石流防治工程设计规范(试行)》^[26]基于构件的变形协调方程和能量守恒定律,给出了式(3)所示的悬臂构件块石冲击力公式。该式适用于本文的填充墙模型,式中的块石速度采用胡桂胜等^[25]基于舟曲泥石流调研建立的公式(4)计算,块石质量选取公式(5)量化^[27]。

$$F_d = \sqrt{\frac{48EI V_s^2 M}{gL^3}} \quad (3)$$

式中, EI 为柱子的抗弯刚度; V_s 为块石速度; M 为块石质量; L 为柱子高度。

$$V_s = u \sqrt{D_{\text{max}}} \quad (4)$$

式中, u 为摩擦系数; D_{max} 为最大块石粒径。

$$M = \frac{\pi D_{\text{max}}^3 \rho_s}{6} \quad (5)$$

式中, ρ_s 为块石密度。

同样地,基于动能定理,利用表1的框架柱柱端约束参数,得到底层角柱和边柱块石冲击力公式,如式(6)、(7)所示。

$$\text{边柱: } F_d = \sqrt{\frac{202\ 751 EIM V_s^2}{3\ 133 H^3}} \quad (6)$$

$$\text{角柱: } F_d = \sqrt{\frac{83\ 456 EIM V_s^2}{1\ 299 H^3}} \quad (7)$$

1.2.3 构件失效判别

基于上述强度表征,泥石流的冲击效应可被简化为一系列作用于垂直受弯构件上的水平力。依据工程规范^[28]要求,以泥石流作用于杆件截面的最大弯矩 M_{max} 和剪力 V_{max} 作为作用效应 S ,以构件截面的抗弯承载能力 M_u 和抗剪承载能力 V_u 作为构件承载力 R ,当泥石流作用效应超过构件承载力时($S > R$),判定为构件失效。

2 框架结构性能状态定义

定义房屋发生破坏时的不同性能状态,是进行泥石流房屋易损性评估的关键。过往研究表明,流型灾害主要破坏房屋的底层构件,而框架柱的失效则是导致房屋发生连续性倒塌的直接原因^[20],考虑到迎流面构件通常先于其他构件失效^[29],因此本文使用拆除构件法^[30],从外围依次拆除图1中框架结构的底层角柱和边柱,模拟不同流向泥石流冲击导致不同位置底层构件失效后的结构损伤状况,给出房屋的损伤分级标准。

为提升计算效率,针对不同的分析目的采用了两种不同的有限元模型。为了探明部分框架柱失效后底层框架梁柱塑性铰的出现机制,模型I采用将底层框架梁柱的钢筋、混凝土划分为不同单元的精确建模方式,上部三层则简化为荷载作用于底层框架上。模型II则建立四层框架的有限元模型,以研究部分柱失效后对其他柱轴力的影响和结构的变形情况,并基于轴力的大小来评定柱子的损伤程度,为了保证计算的收敛,假设钢筋均匀地平摊在每个单元内,即视为匀质整体式材料^[31]。此外,考虑到填充墙在框架结构中主要起隔断和封闭的作用^[8],本节中以均布力的形式代替其产生的影响。

2.1 拆除方式

采用Abaqus显式分析模块对结构底层的框架柱进行拆除。拆除步骤:(1)计算建筑结构在外部荷载作用下的底层构件内力;(2)采用等效静力 F 代替拆除柱子对上部结构的竖向支撑作用;(3)当结构在外荷作用下达到新的平衡状态后,将支撑力 F 在较短时间内降低为0,本文设为500 ms。

2.2 构件损伤定义

底层构件失效会导致结构整体的传力路径发生改变,房屋的梁、板、柱会陆续出现混凝土脱落、钢筋屈服、构件和结构的大范围变形。在ABAQUS中,通过混凝土拉伸损伤和压缩损伤的效果图,可以直接观察到拉伸裂缝和压缩裂缝的位置和发育程度;结合钢筋笼的应力应变数据,即可判别梁柱端塑性铰的形成。本文中满足以下条件之一即判定构件发生损伤。

(1) 混凝土压应变大于0.003 3,拉应变大于0.000 1;

- (2) 混凝土损伤因子大于 $0.2^{[18]}$;
- (3) 钢筋拉应变超过0.01。

此外,考虑到结构在正常使用时发生较大变形会引起人视觉和心理上的不适,规定梁、板的最大挠度不超过 $L_0/250$ (L_0 为构件计算跨度),对应柱顶最大位移小于 $36\text{ mm}^{[32]}$ 。

2.3 结构承载能力极限状态

以拆除柱子所在的轴网标号命名房屋的受损工况,图3为拆除编号1A1B两根相邻边柱和角柱后的房屋破坏云图。表2显示了16组不同位置、不同数量柱子失效后的房屋损伤结果。

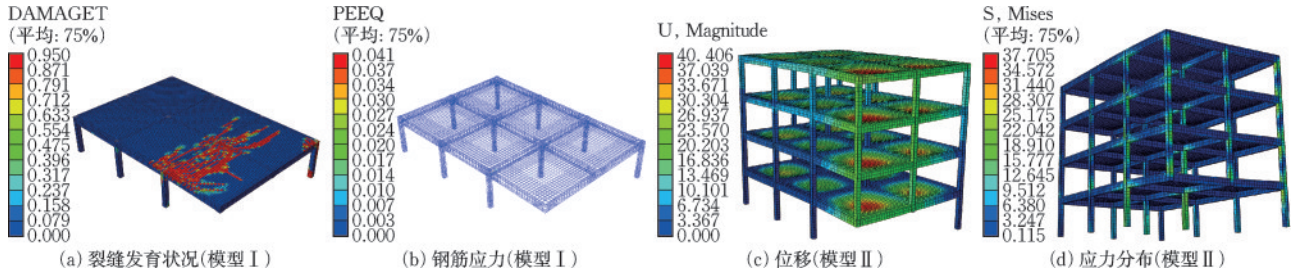


图3 底层框架柱失效引发的房屋破坏云图

Fig.3 Damage contour maps of building caused by failure of bottom frame columns

表2 不同框架柱组合失效后的房屋倒塌描述

Table 2 Description of building collapse after failure of different frame column combinations

失效柱数量	失效位置	失效类型	裂缝发育情况	相邻梁端、柱端状况	失效柱顶位移/mm	中柱柱顶位移/mm	受影响区域
1	1A	角柱失效	所在区域和相邻区域梁板存在拉伸裂缝,相邻梁柱保护层存在压缩裂缝	未出现塑性铰	8.43	30.52	1/6
	1B	边柱失效		柱缺失处梁内纵筋产生塑性应变	9.57	22	1/3
	2A				9.20	20.1	1/3
2	1B3A	非相邻边柱失效	两根长跨梁底部出现大量拉伸裂缝,邻近3根角柱出现拉伸、压缩裂缝	角柱端部及长跨梁内钢筋多数屈服	10.84	32.51	2/3
	2A1B				8.76	35.03	2/3
	2A3A	相邻边柱失效	角柱顶部和底部均出现受拉裂缝且顶部混凝土发生压缩损伤	角柱端部钢筋出现塑性应变;横向板筋多数屈服	20	38.91	1/2
	1A2A	相邻角柱边柱失效	各临近区域梁板出现大量拉伸裂缝,相邻柱端混凝土发生大量受压损伤破碎	相邻区域梁端上部纵筋和板上纵筋出现塑性应变,相邻柱端钢筋损伤	23.73	39.28	1/2
1A1B	23.57				40.41	1/2	
3	1A1C4A	非相邻柱子失效	各区域板都存在拉伸裂缝;相邻边柱和角柱端部存在受压损伤	未出现塑性铰,少数板筋进入屈服状态	6.65	30.59	1/2
	1A3A1C				8.06	32.23	2/3
	1A2A4A	相邻柱子失效	相邻梁、柱端出现大量裂缝,混凝土压碎	相邻梁、柱端钢筋拉伸损伤	22.82	39.13	1/2
	1A1B1C				30.35	45.52	1/3
1A2A3A	27.58	47.28	1/3				

从支承房屋建筑的空间构件组成上看,房屋整体的损伤程度与框架柱的失效数量和失效位置密切相关。即便单跟柱子或多根非相邻柱子发生失效,结构底层中柱的柱顶位移也不会超过规范限值 36 mm 。鉴于不同承重构件组合失效对房屋建筑整体的影响有所不同,采用公式(8)衡量不同柱子失效后的房屋受影响区域。与角柱相比,边柱作为连

接两个相邻建筑空间的关键构件,其失效对结构整体稳定性的影响更为显著。单根柱子失效导致的整体变形区域有限,一般不超过 $1/3$,且挠度通常保持在可接受范围内;倒塌柱子数相同时,相邻柱子的连续失效对建筑结构的破坏程度要远超非连续失效,连续失效的柱子不仅会导致失效节点处的混凝土彻底破碎,还可能引起邻近梁、柱的大范围变

形,影响区域一般超过1/2;当三根或更多柱子发生连续失效时,周围的梁柱将会直接屈服、甚至楼板倾覆。

$$I = \frac{a + 2b - c - d}{xy} \quad (8)$$

式中, I 为失效区域与房屋全域的比值; x 为纵跨数; y 为横跨数; a 为失效角柱数; b 为失效中柱数; c 为每对相邻柱的数量; d 为角柱未失效而其相邻一对边柱都失效时的数量。

2.4 性能状态定义

为确保建筑的抗倒塌能力,抗震设计要求框架柱的轴压比小于1.05^[32]。在高强度泥石流的冲击下,框架柱呈现出逐排倒塌的趋势^[13],房屋跨中位置的柱子通常在倒塌过程中最后失效,任何构件的失效均会引起其应力值发生变化。因此,本文采用混凝土抗压强度的设计值和标准值来计算框架柱的抗压承载能力,以房屋中柱轴压比来量化结构的受损程度。当设计值轴压比小于1.05时,认为结构可被修复;若标准值轴压比超过1.05,则认为结构不可修复;介于这两者之间的损伤被定义为难以修复。表3展示了不同柱子失效工况下的房屋修复难易情况。

实际灾害中,泥石流的冲击作用除引发房屋发生结构性破坏外,还会使得外围隔墙等非结构构件

表3 不同框架柱组合失效后的房屋修复难度

Table 3 Difficulty levels of building repair after failure of different frame column combinations

失效柱数量	失效位置	设计值轴压比	标准值轴压比	可修复性
1	1A	0.84	0.60	可修复
	1B	1.02	0.72	可修复
	2A	0.99	0.70	可修复
2	1B3A	1.03	0.74	可修复
	2A1B	1.17	0.83	难修复
	2A3A	1.20	0.85	难修复
	1A2A	1.15	0.82	难修复
	1A1B	1.22	0.87	难修复
3	1A1C4A	0.84	0.60	可修复
	1A3A1C	0.85	0.61	可修复
	1A2A4A	1.13	0.81	难修复
	1A1B1C	1.46	1.04	不可修复
	1A2A3A	1.47	1.04	不可修复

受损,引起泥石流浆体倾入室内,增加建筑物的修复成本^[33]。本文基于团队前期关于潮水淹没民居影响的研究成果^[34],提出以淤积深度作为评估房屋破坏等级的初始指标。在此基础上,结合连续倒塌模拟所得出的损伤修复标准,参考FEMA(2017)^[35]对地震下框架结构损伤的描述方法,从结构损伤和功能损失两个维度,制定了表4中针对泥石流影响下的框架结构损伤分级标准。

表4 泥石流作用下框架结构破坏等级划分

Table 4 Classification of damage levels of frame structures under debris flow

破坏描述	破坏等级				
	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
非结构性破坏	墙体有碰撞和冲刷的痕迹	墙体倒塌数量不过半	墙体倒塌数过半;淤积深度超过1/4层高	墙体基本倒塌完毕;淤积深度超过1/2层高	墙体全部倒塌
结构性破坏	框架梁、柱完好	框架梁、柱未失效	单个或3个以下柱子非连续失效;中柱设计值轴压比未超限	框架柱连续失效,相邻梁端出现塑性铰	中柱标准值轴压比超限;3根以上外围框架柱连续失效,楼板断裂,结构整体呈倾覆状

3 框架结构泥石流易损性分析

3.1 泥石流易损性定义

房屋泥石流易损性分析是指在给定强度的泥石流作用下,结构反应达到或超过某种破坏状态的条件概率^[24]。

$$P(Z) = P\left(I, \frac{D}{D_i} < 1\right) \quad (9)$$

式中, I 为泥石流强度; D 为泥石流冲击下的结构响应; D_i 为预设破坏等级 i 对应的结构失效阈值。

由式(9)可见,结构的泥石流易损性分析包括建筑物的性能状态分析和泥石流反应分析两部分。本文将房屋的损伤状态划分为5个等级,采取表4中的标准判别房屋的性能状态。基于第1节中建立

的力学模型,分别从构件层面和房屋层面量化泥石流作用下的结构响应。

3.2 蒙特卡洛模拟方法

由于灾害认知的局限性以及房屋建造规范、建造年代的差异性,评价同类型房屋在相同泥石流强度冲击遭受的破坏程度时可能会得到不同的结果^[36]。基于可靠度的理念,采用蒙特卡洛模拟方法对给定的房屋设计参数和泥石流物理属性依据各自的概率分布进行随机抽样,产生随机样本值,详细参数见表5和表6,其中浆体压力基于6类不同流变特性的流体使用公式(1)计算得到,压力值在最大值和最小值间服从均匀分布。

利用MATLAB对生成的所有样本重组,使用公式(9)计算泥石流强度与房屋发生不同程度损伤的概率,多次模拟同一泥石流强度对房屋的冲击,并以易损性曲线/曲面的形式输出损伤结果。为保

证计算精度,单个泥石流强度的抽样数为1 000个结构样本,即 $N=1\ 000$ 。

$$P(I) = \int_{Z(x)}^{\infty} f_x(x) d_x \approx \frac{1}{1\ 000} \sum_{n=1}^N Z(x_n) \quad (10)$$

式中, $f_x(x)$ 为房屋设计参数和泥石流物理参数的分布函数; n 为各参数集合 x 生成的样本数。

表5 构件材料强度平均值

Table 5 Average values of material strength of components

材料类别	强度平均值/ MPa	变异 系数	分布形式
C30混凝土 (抗压强度,抗拉强度)	(28,2.8)	0.172	
钢筋抗拉强度 (HRB400,HPB300)	(448,333)	0.06	正态分布
烧结砖抗剪强度	(0.28)	0.2	
烧结砖抗压强度	(4.08)	0.17	
烧结砖弯曲抗拉强度	(0.28)	0.2	

表6 泥石流强度计算参数

Table 6 Parameters for calculating debris flow intensity

变量名称	值(单位)	变异系数	分布形式
泥石流密度 ρ	1 800(kg/m ³)	0.2 ^[37]	对数正态分布
块石密度 ρ_s	2 790~3 070(kg/m ³)	—	均匀分布
块石摩擦系数 u	3.5~4.5 ^[38]	—	正态分布
弗劳德数系数 (a, b, c)	(5.3, -1.5, 0) ^[22] ; (5.3, -1.45, 0) ^[39] ; (5.3, -1.2, 0) ^[40] ; (5.4, -1.4, 0) ^[41] ; (4.2, -1.8, 0.2) ^[41] ; (3.8, -2, 0.8) ^[41]	—	—

3.3 构件失效概率

框架柱与砌体墙的失效强度存在显著差异,在对房屋进行易损性分析前,对建筑的底层框架柱和填充墙单独进行承载能力评估,有助于明确各类构件的承载力临界强度及影响因素,提升易损性分析效率。选取图3结构中的底层框架柱和填充墙,分别计算各自在浆体冲击和浆体块石冲击下的失效

概率。

图4的结果表明,造成填充墙失效的临界浆体流深不足以导致框架柱受损。相比流速,流深对构件的破坏影响要更加显著。伴随流深的增加,填充墙的失效概率从5‰提升到96%,墙体的起始失效流深为0.4 m,完全失效流深为0.8 m。对于框架柱而言,流深超过1 m后,构件才开始发生损伤,即使流深达到1.6 m,在流速较低的情形之下柱子仍然

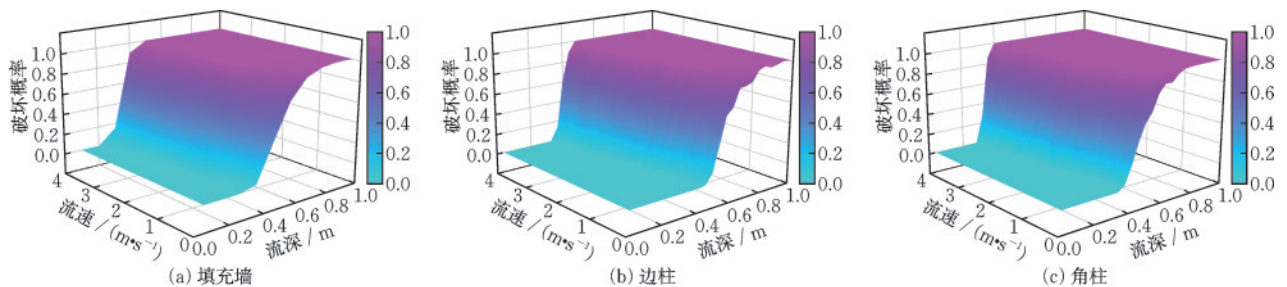


图4 局部构件浆体冲击失效概率

Fig.4 Failure probability of local components under slurry impact

留有10%的生存概率。

图5和6展示了在含有块石的泥石流冲击下的构件失效概率。框架柱承受块石冲击时的峰值粒径约为0.5 m,对于填充墙而言,该值仅为0.3 m。块石冲击显著降低了泥石流作用下的构件失效阈值,且这一效应随着流深的增加而更加明显。以填充

墙为例,当遭受1.4 m/s流速,0.25 m粒径的块石与浆体共同冲击时,其在流深0.3、0.4、0.5 m作用下的构件失效概率分别为35.9%、66.2%、100%,而相同流速下的浆体冲击失效概率仅为5‰。此外,由于不同的端部约束条件,在相同的泥石流强度冲击下,角柱的失效概率要略高于边柱。

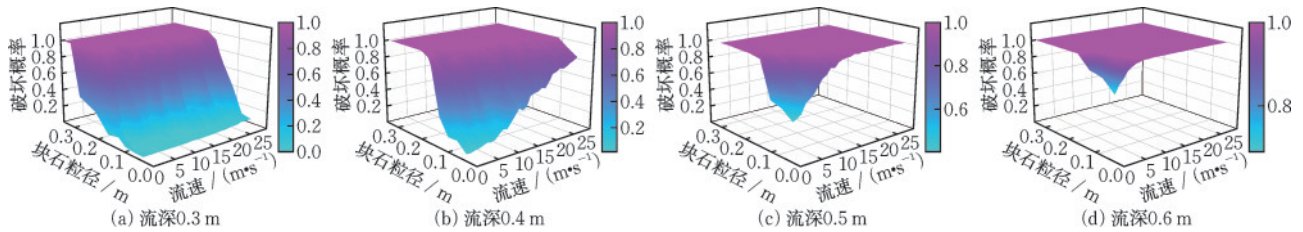


图5 不同流深下块石冲击非承重墙失效概率

Fig.5 Failure probability of stone impact on non-load-bearing wall at different flow depths

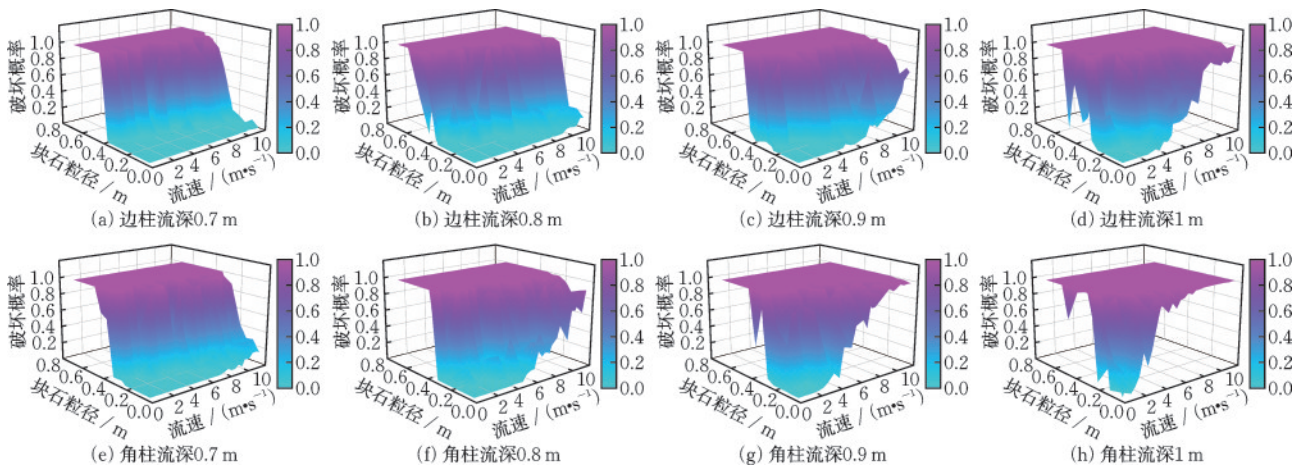


图6 不同流深下块石冲击框架柱失效概率

Fig.6 Failure probability of frame columns under stone impact at different flow depths

3.4 房屋易损性分析

3.4.1 基于构件失效的易损性计算流程

房屋的易损性结果受到构件的失效阈值、所处位置及失效数量影响。从图4可以看出,填充墙和框架柱在浆体冲击下的脆弱性差异较大。同时,对汶川地区房屋的填充墙与框架柱拉结筋布置情况的调研表明,大多数构件的连接无法达到抗震规范的要求。基于此,在实际泥石流荷载作用下,房屋底层墙体的脆弱性较高且失效速度较快,其对框架柱抗变形能力的增强作用有限。故而,在后续分析中不再考虑填充墙与柱子的相互作用^[8]。遵循“墙体与框架柱分别失效,外围墙体优先框架柱失效”的破坏顺序,结合“淤积深度”表征流体进入房屋后对使用功能的影响,将框架结构泥石流易损性计算

流程划分为以下几个步骤:首先,确定泥石流冲击房屋的构件类型,以图7(a)为例,共有8根柱子、7面墙体遭到冲击;随后,以流深、流速和块石粒径作为自变量表征泥石流强度,强度增量分别设置为0.1 m、

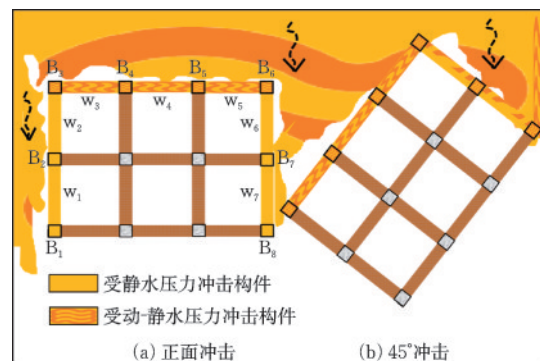


图7 泥石流冲击房屋示意

Fig.7 Schematic diagram of debris flow impact on a building

0.2 m/s 和 0.05 m; 基于第 1 节中泥石流与构件的相互作用力学模型, 分别计算每个构件的承载能力和作用效应, 并将构件失效状态标记为 1, 未失效标记为 0; 而后, 采用蒙特卡洛模拟方法在 Matlab 当中生成的数据集, 对每一泥石流强度的冲击破坏进

行 1 000 次计算, 形成表 7 所示的构件失效矩阵; 最后, 根据表 4 中的结构破坏分级标准得到一定强度灾害下房屋发生不同破坏等级的概率。重复上述步骤, 通过改变灾害强度, 结合式 (9) 绘制房屋的易损性曲面。

表 7 框架结构构件失效矩阵
Table 7 Component failure matrix of frame structures

计算序号	墙			框架柱			墙失效 合计	失效柱分布 (a b c d)	破坏 等级
	W ₂	W ₃	...	B ₂	B ₃	...			
	悬臂	悬臂	...	角柱	边柱	...			
	侧向静力	正面冲击	...	侧向静力	正面冲击	...			
1	0	1	...	0	1	...	—	—	—
2	0	0	...	0	1	...	—	—	—
...	—	—	—
1 000	0	1	...	0	1	...	—	—	—

3.4.2 浆体冲击易损性

房屋的突出部位在泥石流灾害中极易损坏。为探究泥石流与建筑交角对房屋易损性结果的影响, 本文模拟了图 7 所示的正面冲击和 45°冲击两种工况。在遭遇泥石流的正面冲击时, 房屋受到动水压力和静水压力的共同作用。当泥石流从房屋侧向流过时, 仅考虑静水压力的破坏。

从图 8 的模拟结果可以看出, 正面冲击和 45°冲击的房屋易损性曲面在轻微损伤与中等损伤评价上存在明显不同。原因是非承重墙的脆弱性较差, 它在较低的泥石流冲击强度下 (流深 0.4 m) 便达到了轻微损伤的评定标准。相比之下, 框架柱的失效阈值较高 (流深 0.8 m), 损伤较小, 故而两者在依赖

于框架柱失效判定房屋发生更严重破坏的损伤结果上差异显著。为使模拟结果对比更明显, 提取流速为 4 m/s 时两个工况的构件失效概率随流深变化的易损性曲线。从图 9 中可以看出, 与正面冲击工况相比, 45°冲击工况中除了中等破坏等级的曲线左移外, 其余破坏等级的曲线均向右移。原因是房屋朝向的改变使得各构件截面直接承受的泥石流浆体冲击强度变小, 使得达到相应破坏等级所需的流速和流深增大, 故而曲线整体右移。但是, 朝向的改变也让原本承受浆体静压力的部分非承重墙受到了正面的动水压力冲击, 墙体的临界破坏流深下降, 达到了中等破坏等级评定中“超过半数的非承重墙破坏”准则, 故而该条曲线左移。

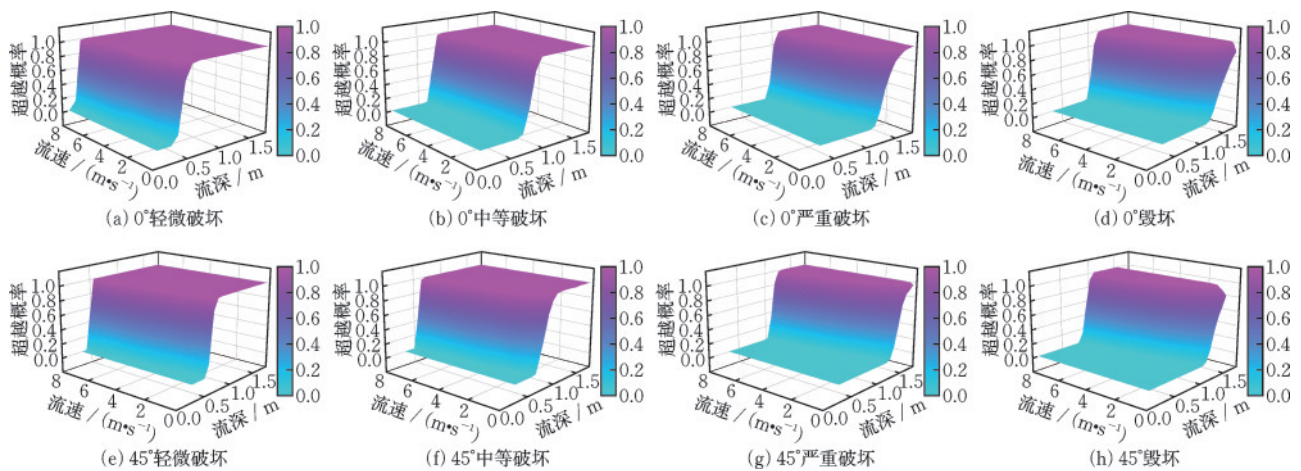


图 8 浆体冲击易损性曲面

Fig.8 Fragility surface under slurry impact

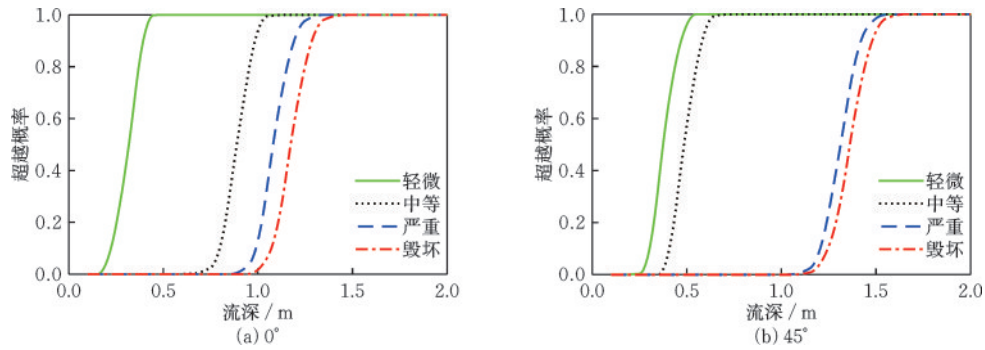


图9 4m/s流速的浆体冲击易损性曲线

Fig.9 Fragility curve under slurry impact at flow velocity of 4 m/s

3.4.3 浆体块石冲击易损性

分别采用填充墙和框架柱在块石冲击下的起始失效流深(0.4 m和0.8 m),模拟块石浆体的垂直冲击。假定每个工况下房屋受损柱子遭受的块石粒径相同,且每个柱子的受冲击时刻同步。

从图10中可以看出,房屋的失效风险伴随块石粒径的增加呈现非线性增长的趋势。当流深为0.4 m时,非承重墙较为脆弱,在较低的泥石流强度作用下,框架结构便发生了轻微破坏。然而,在此低流

深下,浆体冲击和小粒径的块石冲击并不足以破坏框架柱。仅当块石粒径超过0.35、0.4 m和0.5 m时,房屋处于中等破坏、严重破坏和毁坏超越概率才会明显上升。当流深增大至0.8 m时,房屋在流速2.8 m/s、块石粒径0.35 m的泥石流冲击下,其处于轻微、中等、严重、毁坏的超越概率为100%、98.8%、47.9%、16.3%;粒径为0.4 m时,各等级超越概率分别为100%、98.3%、82.3%、55.8%;粒径为0.5 m时,各等级超越概率达到100%、99.6%、97.7%、89.3%。

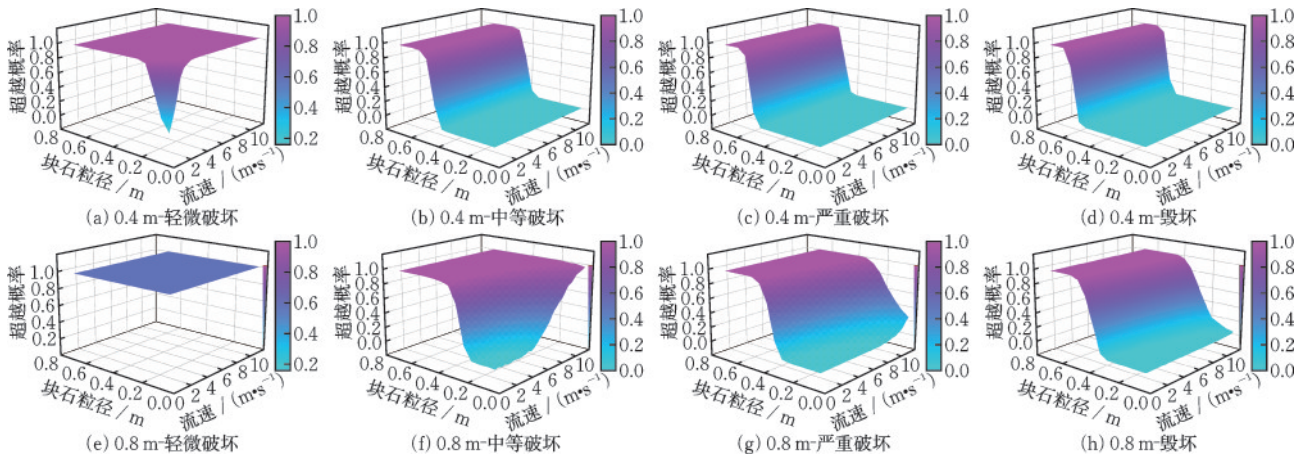


图10 浆体块石冲击易损性曲面/线

Fig.10 Fragility surface/curve under slurry-stone impact

4 模型验证

基于黄勋等^[40,42]经过实际调研和文献搜集的492个泥石流灾害建筑损伤样本数据,采用经验法^[33]和基于构件失效的数值方法评估房屋的易损性。结果表明,两类方法在不同破坏等级的分布趋势上保持一致,验证了本文基于理论分析和数值模拟建立的易损性曲面方法的可靠性,具体对比结果见文献[43]。

5 结语与展望

为掌握泥石流作用下钢筋混凝土框架结构底层构件失效后的房屋倒塌规律,预测房屋在泥石流冲击下的失效概率,本文通过静力分析的方式建立房屋底层局部构件力学模型,采用拆除构件法模拟构件失效引起的结构失稳倒塌,结合蒙特卡洛模拟方法计算了一栋四层框架结构的易损性,探索了一套结构分析、破坏评价到房屋失效概率计算的框架

结构易损性分析方法,从中得出以下结论:

(1) 将泥石流的冲击效应视为作用于房屋底层的侧向推力,可快速计算出构件的失效阈值。浆体冲击下,导致填充墙和框架柱的起始失效流深分别为0.3 m和0.8 m;考虑块石颗粒的影响,构件的失效概率会进一步上升,且这一趋势随着流深的增加而加剧。填充墙难以承受含有大颗粒块石的冲击荷载,而粒径大于0.5 m的块石冲击会导致框架柱完全失效。

(2) 采用拆除构件法模拟泥石流作用下的房屋底层构件失效过程,并以中柱轴压比作为描述房屋性能状态的指标,可合理表征房屋发生结构性破坏的受损程度。单根柱子失效对于整体结构的影响较小;两根及以上相邻的外围底层框架柱发生连续失效,将会引起楼板的大范围垮塌,对房屋造成严重破坏。

(3) 基于拆除构件法的房屋损伤分级标准,采用蒙特卡洛模拟方法量化泥石流与房屋相互作用的不确定性,可获得框架结构的易损性分析结果。易损性结果除受灾害强度的影响外,泥石流浆体的流向依然对其起着关键作用。流向角度的变化改变了构件所遭受的灾害冲击强度(浆体压力类别和大小),同时也会增加更多构件受到损伤破坏的概率。

本研究成果可用于RC框架结构在泥石流灾害下的快速性能评价和失效概率计算,为防灾减灾策略制定提供数据参考。受泥石流流态特征多变性和复杂性的限制,研究在描述浆体对构件的多角度冲击时,只考虑浆体动水压力垂直作用于构件的部分,忽略流体沿构件表面作用的切向摩擦力。同时,基于框架柱与填充墙在泥石流荷载下失效阈值差异较大的特征,未考虑正向冲击下填充墙体对框架柱的纵向传力作用。其次,以每根柱子遭受相同粒径块石冲击为假定计算得到的房屋易损性结果相对保守。因此,后续工作将针对以上三点不足展开,重点探究框架柱与填充墙在泥石流作用下的传力机制和受损模式,以提升易损性分析方法的普适性。

参考文献:

[1] 国家数据. 中国近十年地质灾害发生次数[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0C0D&sj=2023>, 2023.

[2] Douglas J. Physical vulnerability modelling in natural hazard risk assessment [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, 7(2): 283-288.

[3] Fuchs S, Birkmann J, Glade T. Vulnerability assessment in natural hazard and risk analysis: current approaches and future challenges [J]. *Natural Hazards*, 2012, 64(3):1969-1975.

[4] 潘梦宇, 雷雨, 顾海华, 等. 基于建筑易损性分析的泥石流风险评价[J]. *人民长江*, 2024, 55(10): 133-140. Pan M Y, Lei Y, Gu H H, et al. Risk assessment of debris flow based on building vulnerability analysis [J]. *Yangtze River*, 2024, 55(10): 133-140. (in Chinese)

[5] 张祝鸿, 王保云, 孔艳. 基于指标统计的泥石流危险性评价方法综述[J]. *现代计算机*, 2019(9): 47-53. Zhang Z H, Wang B Y, Kong Y. Review of methods based on index statistics for debris flow hazard assessment [J]. *Modern Computer*, 2019(9): 47-53. (in Chinese)

[6] 成蕾, 李碧雄. 基于指标法的建筑物理脆弱性评估研究进展[J]. *震灾防御技术*, 2020, 15(2):260-273. Cheng L, Li B X. Review of physical vulnerability assessment of building based on indicator method [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2020, 15(2): 260-273. (in Chinese)

[7] 丁明涛, 李昱陆, 庞金彪, 等. 泥石流胁迫下建筑物易损性评价: 以汶川县七盘沟为例[J]. *灾害学*, 2020, 35(1): 144-149. Ding M T, Li Y L, Pang J B, et al. Vulnerability assessment of building exposed to debris flow: A case study on qipan gully, Wenchuan County [J]. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(1): 144-149. (in Chinese)

[8] Sun X P, Zeng P, Li T B, et al. Probabilistic framework to evaluate scenario-based building vulnerability under landslide run-out impacts [J]. *Engineering Geology*, 2023, 325:107274.

[9] Parisi F, Sabella G. Flow-type landslide fragility of reinforced concrete framed buildings [J]. *Engineering Structures*, 2017, 131: 28-43.

[10] Del Zoppo M, Di Ludovico M, Prota A. A mechanics-based method towards risk assessment of RC buildings under tsunami and flow-type hazards [J]. *Engineering Structures*, 2022, 264: 114452.

[11] 陈旭丹, 孙新利, 程金星. 泥石流作用下钢筋混凝土框架结构的易损性评估模型[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2016, 27(1): 106-110. Chen X D, Sun X L, Cheng J X. A model for vulnerability assessment for reinforced frame structures against

- debris flow[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 106-110. (in Chinese)
- [12] 胡凯衡, 崔鹏, 田密, 等. 泥石流流体力学模型和数值模拟研究综述[J]. 水利学报, 2012, 43(增2): 79-84.
Hu K H, Cui P, Tian M, et al. A review of the debris flow dynamic models and numerical simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(Sup2): 79-84. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 刘欢, 樊晓一, 姜元俊, 等. 含大石块泥石流冲击作用下框架结构房屋动力响应研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(1): 9-19.
Liu H, Fan X Y, Jiang Y J, et al. Dynamic response of frame structure building under impact of debris flow with large stones[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(1): 9-19. (in Chinese)
- [15] Prieto J A, Journeay 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.
- [16] Luo H Y, Zhang L M, Zhang L L, et al. Vulnerability of buildings to landslides: The state of the art and future needs[J]. Earth-Science Reviews, 2023, 238: 104329.
- [17] Huang R Q, Fan X M. The landslide story[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(5): 325-326.
- [18] 杨飞, 董新勇, 周沈华, 等. ABAQUS混凝土塑性损伤因子计算方法及应用研究[J]. 四川建筑, 2017, 37(6): 173-177.
Yang F, Dong X Y, Zhou S H, et al. Study on calculation method and application of plastic damage factor of ABAQUS concrete[J]. Sichuan Architecture, 2017, 37(6): 173-177. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] Luo H Y, Zhang L L, Zhang L M. Progressive failure of buildings under landslide impact [J]. Landslides, 2019, 16(7): 1327-1340.
- [21] 李培振, 李进, 李唐振昊. 泥石流冲击作用下砌体结构破坏机理研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(7): 1-5, 29.
Li P Z, Li J, Litang Z H. The failure mechanism of masonry structure under debris flow impact[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2017, 45(7): 1-5, 29. (in Chinese)
- [22] Cui P, Zeng C, Lei Y. Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(12): 1644-1655.
- [23] 王友彪. 泥石流对桥墩冲击力研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
Wang Y B. Debris flow impact forces on bridge piers [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [24] Luo H Y, Zhang L M, He J, et al. Reliability-based formulation of building vulnerability to debris flow impacts[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2022(1): 59(1): 40-54.
- [25] 胡桂胜, 陈宁生, 邓明枫, 等. 甘肃舟曲三眼峪沟泥石流粗大颗粒冲击力特征分析[J]. 地球与环境, 2011, 39(4): 478-484.
Hu G S, Chen N S, Deng M F, et al. Analysis of the characteristics of impact force of massive stones of the sanyanyu debris flow gully in Zhouqu, Gansu Province [J]. Earth and Environment, 2011, 39(4): 478-484. (in Chinese)
- [26] 泥石流防治工程设计规范(试行): T/CAGHP 021—2018[S]. 北京: 中国地质大学出版社, 2018.
- [27] 陆渊, 巨能攀, 张万泽, 等. 泥石流大块石对简支梁冲击力修正计算[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(24): 76-81.
Lu Y, Ju N P, Zhang W Z, et al. Correction calculation of large stone impact force of debris flow grille dam [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(24): 76-81. (in Chinese)
- [28] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [29] 赵昊. 泥石流作用下框架结构建筑动力响应与防护对策[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
Zhao H. Dynamic response of frame structure under impact of debris flow and protective countermeasures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [30] 陆新征, 廖文杰, 林楷奇, 等. 我国工程结构防连续倒塌研究: 回顾与展望[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 102-112, 135.
Lu X Z, Liao W J, Lin K Q, et al. Research progress of the progressive collapse prevention of engineering structures in China: A review and prospect[J]. Building Structure, 2019, 49(19): 102-112, 135. (in Chinese)

- [31] 过镇海. 钢筋混凝土原理 3 版[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.
Guo Z H. Principle of reinforced concrete[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [32] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京:中国工业出版社, 2010.
- [33] 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.
Li B X, Zhao K P, Wang T T. Damage form and vulnerability analysis of buildings under debris flow impact [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(3): 484-493. (in Chinese)
- [34] 赵开鹏,李碧雄,吴德民,等. 台风-风暴潮下海南地区砌体房屋物理脆弱性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(2): 330-339.
Zhao K P, Li B X, Wu D M, et al. Analysis of physical vulnerability of masonry houses in Hainan area under typhoon-storm surge[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2): 330-339. (in Chinese)
- [35] Hazus tsunami model technical guidance[R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2017.
- [36] Luo H Y, Zhang L M, Wang H J, et al. Multi-hazard vulnerability of buildings to debris flows [J]. Engineering Geology, 2020, 279: 105859.
- [37] 何思明,吴永,沈均. 泥石流大块石冲击力的简化计算[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 51-56.
He S M, Wu Y, Shen J. Simplified calculation of impact force of massive stone in debris flow[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(5): 51-56. (in Chinese)
- [38] 徐艳红,张万顺,赵琰鑫,等. 泥石流粗大颗粒物运动过程的数值模型[J]. 水利学报, 2012, 43(增 2): 98-104.
Xu Y H, Zhang W S, Zhao Y X, et al. Numerical simulation of large particles moving in debris flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(Sup2): 98-104. (in Chinese)
- [39] Kim M I, Kwak J H. Assessment of building vulnerability with varying distances from outlet considering impact force of debris flow and building resistance[J]. Water, 2020, 12(7): 2021.
- [40] 黄勋. 强震区大型泥石流动力特性与风险量化研究[D]. 成都:成都理工大学, 2015.
Huang X. Dynamic characteristics and quantitative risk assessment of catastrophic debris flows in Wenchuan earthquake-stricken Area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [41] 曾超,崔鹏,葛永刚,等. 四川汶川七盘沟“7·11”泥石流破坏建筑物的特征与力学模型[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(2): 81-91.
Zeng C, Cui P, Ge Y G, et al. Characteristics and mechanism of buildings damaged by debris flows on 11 July, 2013 in qipangou of Wenchuan, Sichuan [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(2): 81-91. (in Chinese)
- [42] 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.
Zeng C. Evaluation method of building vulnerability under debris flow [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [43] 赵开鹏. 西部山区泥石流房屋建筑易损性研究[D]. 成都:四川大学, 2023.
Zhao K P. Buildings fragility analysis under debris flow in western mountainous area [D]. Chengdu: Sichuan University, 2023. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)