

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210522002

## 西部山区泥石流灾害下建筑物破坏特征与破坏等级划分\*

李碧雄<sup>1,2</sup>, 赵开鹏<sup>2,3</sup>, 王甜恬<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 四川大学-香港理工大学灾后重建与管理学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**近年来我国西部山区泥石流灾害频发,严重威胁当地居民的生命财产安全,其中,建筑物的破坏是造成各类损失的重要原因。正确认识泥石流的致灾机理和泥石流灾害下建筑的破坏特征不仅是正确评价泥石流灾害风险的基础,也是科学构建泥石流下房屋建筑易损性模型的依据。基于文献查阅、新闻资料和现场调研,首先对西部山区泥石流灾害主要特点进行了归纳阐述,其次梳理了近年来发生泥石流灾害中建筑物的破坏特征,最后结合泥石流的动力学特性和建筑结构情况剖析了建筑结构的受损机理。基于建筑物的空间分布与泥石流强度的时空耦合变化特征,对泥石流强度表征方式给出方向性建议;基于建筑的受损机理,参考地震作用下建筑的破坏等级划分标准,初步提出了泥石流下建筑物破坏等级划分方式,旨在为防灾减灾工作提供一定参考。

**关键词:**西部山区;泥石流;建筑物;受损机理;易损性分析;风险评估

**中图分类号:** P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0484-10

### Damage Form and Vulnerability Analysis of Buildings under Debris Flow Impact

LI Bixiong<sup>1,2</sup>, ZHAO Kaipeng<sup>2,3</sup>, WANG Tiantian<sup>1,2</sup>

(1. College of Architecture & Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
2. Key Laboratory of Deep Earth Science and Engineering, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Institute for Disaster Management and Reconstruction, Sichuan University-The Hong Kong Polytechnic University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In recent years, debris flow disasters occur frequently in western mountainous areas of China, which seriously threatens the safety of local residents' lives and property. Among them, the destruction of buildings is an important cause of various losses. A proper understanding of both the mechanism of debris flow and the damage characteristics of buildings under such disaster is not only the basis for the accurate risk assessment of debris flow disasters, but also the basis for scientifically constructing vulnerability models of buildings under the impact of debris flow disasters. Initially, the main characteristics of debris flow disasters in the western mountainous areas are summarized and explained

\* 收稿日期:2021-05-22;修回日期:2021-08-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508802)资助

作者简介: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

通讯作者:赵开鹏(1997—),男,硕士研究生。主要从事防灾减灾研究。E-mail:2470404318@qq.com

based on literature review, news sources, and field investigation. Then the damage characteristics of buildings in debris flow disasters in recent years are summarized. Lastly, the damage mechanism of building structures is analyzed in combination with the dynamic characteristics of debris flow and the conditions of building structures. Given the spatial distribution of buildings and the spatiotemporal coupling variation characteristics of debris flow intensity, directional suggestions are offered to characterize the debris flow intensity. Furthermore, in light of the damage mechanism of buildings and by referring to the classification standard of damage grades for buildings under earthquakes, a preliminary classification method for damage grades of buildings under debris flow is proposed. This approach aims to provide some guidance for disaster prevention and reduction.

**Keywords:** western mountainous area; debris flow; buildings; damage mechanism; vulnerability analysis; risk assessment

## 0 引言

泥石流是山区常见的地质灾害,2008年汶川地震导致众多的滑坡、崩塌、碎屑流等地表破坏,孕灾环境极为敏感,暴雨极易诱发大规模甚至群发性泥石流灾害。据文献[1]预测,其持续活跃时间达5~10年,地震已经过去12年了,但汶川地震影响区泥石流灾害程度并未呈现减弱的趋势。西部山区因地形条件限制,许多城镇选址于地势平坦开阔的河道堆积扇上,承灾体较为脆弱,特别是汶川地震以来,每年均有因山区泥石流暴发而威胁到人民生命财产安全的事件发生,在震惊中外的2010年舟曲8·8特大泥石流灾害中遇难1 557人,失踪284人。其中,泥石流对建筑物的破坏是造成生命财产损失的重要原因,因此探究泥石流灾害下建筑物破坏特征和泥石流作用下建筑物的易损性分析不仅是进行泥石流灾害评估和风险预测的基础,也是保障人民生命财产和防灾减灾的关键。

目前针对泥石流作用下建筑物破坏等级的划分标准尚未形成,且缺乏以承灾体宏观破坏特征为基础的划分方式。有关泥石流灾害下建筑物易损性研究不多,主要基于分类指标体系,采用专家打分赋权重值或数学分析方法,建立单沟、区域泥石流易损度的评价方法或模型<sup>[2-5]</sup>。但由于较少考虑承灾体的致灾机理以及不同承灾体对泥石流灾害敏感性的差异,已有的模型权重和参数的赋值主观性较大,且难以构建泥石流灾害强度与承灾体损坏程度间的定量关系。而建筑物的受损形态和损伤程度不仅与建筑物自身情况有关,也受到泥石流的特点及两者空间关系的影响,后者将影响泥石流对

建筑物致灾强度的判断。因此,有必要研究泥石流作用下建筑物的受损机理。

本文拟从分析西部山区泥石流的特点出发,系统梳理近年来我国西部山区泥石流灾害作用下的建筑物典型受损形态,深入探究其致灾机理,分析泥石流的致灾强度与承灾体的成灾响应关系。以此为基础,初步探讨了泥石流强度指标的选择和建筑物破坏等级划分两个关键问题。这些不仅对直接评价泥石流灾害的破坏程度有着重要的参考价值,还对今后泥石流危险区域建筑物的结构设计、合理布局等都具有指导意义,同时还可为进一步进行泥石流易损性定量评估及西部山区泥石流风险预测和防灾减灾提供支持。

## 1 中国西部山区泥石流的特点分析

中国的泥石流灾害主要集中分布在第一阶梯和第二阶梯的过渡带上。甘肃、四川、云南、西藏等省(区)既是中国泥石流最频发的地区,也是受泥石流威胁或危害的城镇分布最密集的地带。据统计<sup>[6]</sup>,西部地区有一百三十多个县市暴露于泥石流灾害下。厘清西部山区泥石流灾害的特征是分析其对房屋建筑致损机理的基础,以下从泥石流灾害的危险性、动力学特征、承灾体的暴露度三个方面来梳理西部山区泥石流灾害的主要特点。

### 1.1 泥石流灾害的危险性分析

大量的研究表明,影响泥石流形成的主要因素有:地质、地形、地貌、河沟、水文、气象等。中国西部地势以山地、高原为主,如四川省有山地、丘陵、平原和高原4种地貌类型,分别占全省区域面积的

77.1%、12.9%、5.3%和4.7%。西部山区由于其特殊地理位置和悬殊的地形高差,地域形态不规则,以及夏季暴雨多发的气候特点,为泥石流的孕育提供了地貌和气候条件。

近年来的西部大开发中,在金沙江、大渡河、岷江、雅砻江等流域进行了大量的水利水电工程梯级开发建设,同样地,交通道路建设和矿产开发也在快速铺开,尽管开发过程中采取了很多环保措施,但仍不可避免地对自然环境造成或多或少的影响,如地貌发生局部改变以及产生大量的碎屑物质,形成了触发泥石流的局部地形,且丰富了泥石流的物质基础,使得建设区域泥石流更为发育。

每年雨季,都有成百上千处泥石流发生,不少沟道每年都暴发泥石流,如云南东川蒋家沟、桃家小河、大白泥沟,甘肃武都的火烧沟、北峪河等。2008年汶川特大地震导致山河破碎,严重加剧了震区的泥石流灾害风险,暴发规模和频率显著增加。据四川省国土资源厅报道,震后5年内(2008~2012年),震区共暴发2333处泥石流灾害,约为震前水平(2003~2007年,共758处)的3倍<sup>[7]</sup>。据R.Huang等<sup>[8]</sup>的研究成果,强震区内地震产生的松散固体物质约为4亿m<sup>3</sup>,而震后泥石流年均输砂量约为1800万m<sup>3</sup>,两者对比可知,汶川地震后泥石流将在20年内处于活跃状态。震后泥石流的活动特征主要表现为数量增多、规模增大、频率增加、临界雨量降低,且多发育黏性泥石流等<sup>[9]</sup>。近10年来,四川省因暴雨遭受的泥石流灾害触目惊心,譬如2010年8月13日,四川都江堰市龙溪河流域遭遇大范围强降雨,共有44处暴发泥石流灾害,泥石流冲出总量共334×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,大量泥沙沉积在龙溪河下游河道内,使该段河床整体抬升3~8m,危害公路3130m,233栋民房受损<sup>[10]</sup>。综上所述,西部山区泥石流灾害暴发风险高,受灾区域大,是我国重大科研专项必须关注的重要灾种之一。

## 1.2 泥石流流体及其动力学特征分析

受西部山区地形影响,泥石流沟床纵坡降较大。山区泥石流多发育于流域面积仅几平方公里至几十平方公里的小流域,还有不少沟谷流域面积不足1km<sup>2</sup>。其中,沟谷长度也多在几百米至几公里,但沟床纵坡降却多在200‰~400‰。泥石流沿沟谷路程短,流速快,具有来势凶猛、破坏力大的特征,故而成灾率高。

西部山区泥石流流经地段多为陡峭、多急弯、有卡口的沟道,因沟道狭窄,导致泥石流流体反复出现堵塞-溃决现象,引起流量和流速的间歇性猛增,显著加大了泥石流的冲淤能力;此外,流体过弯时由于离心作用,弯道超高现象明显,常翻越数米高的沟岸造成损害,如四川省唐家沟特大泥石流在沟口右岸S弯形成超高,跃上约10m高的台地,冲毁台地上3处民房并造成2人死亡<sup>[11]</sup>。

泥石流可分为黏性、过渡性和稀性泥石流3种。根据对汶川、茂县、黑水、松潘、彭州、都江堰、什邡、北川等区域的泥石流野外调查和取样分析,震后新暴发的泥石流流体,容重多在2.10~2.13g/cm<sup>3</sup>,以黏性泥石流为主<sup>[9]</sup>。黏性泥石流具有较强的整体运动性、运动速度快、搬运力强等特征,其冲击、碰撞和爬高能力及冲刷摩擦、淤埋能力特别强大,破坏力极强。同时,由于浆体浮托力和屈服应力较大,夹带能力强,可使大石块呈悬浮状态或推移质运动,易造成巨大的冲击破坏。

可见,该区域泥石流具有破坏性强、致灾方式多样和成灾率高的显著特征。

## 1.3 承灾体建筑物的暴露度分析

我国西部山区可以开发利用的土地资源有限,建设用地紧张。位于高山峡谷中溪河谷两岸的滩地、历史泥石流的堆积扇或古滑坡体往往形成较为平坦的地形,极易成为村镇建设的理想选址。从前述分析可见,修建于这些场地的建筑物大都暴露于泥石流灾害的威胁中。迫于泥石流灾害风险的压力,云南德钦县、四川九寨沟及甘肃武都县的县城均重新选址和整体搬迁,但由于自然条件的限制,搬迁后的县城仍未完全摆脱泥石流的影响。近年来城镇化率逐渐提高,城镇规模不断扩大,向边坡要地,半挖半填也成为山区建设用地的常态,从某种程度上来看进一步加大了建筑物在泥石流灾害中的暴露度。

综上,西部山区地貌形态和气候特征构成了该地区泥石流形成的基本条件,也决定了其破坏力大的灾害特征;近年来的建设开发形成了某些触发泥石流的局部环境;地震带来的大量松散体,不仅大幅降低了触发泥石流的临界雨量,也加大了灾害强度;加之河谷地貌中建筑物对泥石流灾害的暴露度非常高,因此,该地区遭受泥石流灾害风险非常高,有必要深入研究泥石流成灾机理和建筑物的易损性特征。

## 2 泥石流作用下建筑物的受损形态

### 2.1 建筑物被淤埋

泥石流最显著而典型的特点就是泥石流流体淤积沟道,抬高沟床,导致河道、溪沟附近建筑被整体或局部淤埋。如2010年清平8·13特大泥石流灾害中,文家沟段泥石流总量达 $310 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,平均淤积深度为7 m,最大淤积厚度超15 m,造成479户农房被淤埋,乡卫生院、学校等公共建筑亦未能幸免<sup>[12]</sup>。此次泥石流过后,由于山区建筑分布错落有致,且层数不同,有些建筑彻底被掩埋,部分建筑仅有屋顶部分尚暴露在外,如图1(a)所示。图1(b)为文家沟泥石流中泥砂、巨砾、漂木和各类生活生产废弃物等固体物



(a) 沟口处被整体淤埋的建筑(来源: blog.sina.com.cn)



(b) 建筑物周围堆积的漂木、废弃物(来源: bbs.zhulong.com)



(c) 沟口处被泥石流掩埋的建筑(自摄)

图1 淤埋现象

Fig.1 Deposition by debris flow

质在建筑物迎流面大量堆积,它们对建筑物可能产生的破坏值得关注。图1(c)为2019年汶川8·20特大暴雨中转经楼村转经楼沟发生泥石流后沟口处被掩埋的建筑。

### 2.2 掏空建筑物地基

泥石流移动过程中对河沟岸坡具有强烈的侵蚀或淘蚀作用,对于临河建筑,若其下基础部分被掏空,会导致其发生局部破坏或部分坍塌,甚至于发生整体倾斜或倾覆,历次泥石流事件中该类破坏现象经常发生。图2(a)中左边的单层建筑虽地基部分被掏空,但上部建筑仍保持完好,右侧建筑则因地基失效导致建筑倾斜而严重破坏。图2(b)所示三层框架结构房屋中一个柱下独立基础下地基被掏空后产生沉降,因沉降不均导致与其相连的楼面梁、板发生破坏。图2(c)所示的临河二层建筑,泥石流暴发时临河侧地基被冲刷而掏空,建筑物向河心方向倾斜坠入河中。



(a) 地基部分被掏空(来源: gs.cnr.cn)



(b) 个别基础下地基被掏空(来源: chinanews.com)



(c) 河道边建筑倾覆(来源: news.sina.com.cn)

图2 建筑物地基基础失效

Fig.2 Failure of building foundations

### 2.3 建筑物局部损毁

建筑物在泥石流作用下呈现多种多样的局部破坏形态,除了因地基局部被掏空所造成的局部破坏,还经常观察到以下几种:(1)墙体被泥石流所携带的大石块直接击中或因各种原因飞起的大石块撞击,而导致墙体局部形成洞口或坍塌,如图3(a)、(b)所示;(2)重要承重墙、柱受泥石流流体

或石块正面冲击而发生破坏后导致其所支撑的水平结构体系局部塌陷,如图3(c)所示的局部屋面受损系其下的木柱受损所致,图3(d)所示情形为底层框架柱破坏引起的房屋部分坍塌;(3)建筑物一角受泥石流冲击作用部分被冲毁,如图3(e)所示。



图3 建筑物的局部破坏形态

Fig.3 Local damage patterns of buildings

## 2.4 整体垮塌或倾覆

建筑整体坍塌或倾覆除了因地基失效引起外,由于泥石流的直接冲击所致也较为常见。对于西部山区常见的单层建筑物,特别是砖木、土木结构等简易房屋,在泥石流冲击作用下因部分关键受力构件或连接破坏而发生整体垮塌,如图4(a)所示。多层建筑的底层受泥石流冲击破坏至一定程度时,亦会导致房屋发生整体坍塌,图4(b)即为此类情况。此外,当建筑物间距较小时,泥石流推倒前排建筑后,后排建筑如“多米诺骨牌”次第整体倾覆倒塌。图4(c)为舟曲泥石流中,左侧建筑底层破坏后倒向右侧建筑,将后者撞倒。K.H.Hu等<sup>[13]</sup>报道了一处舟曲泥石流中房屋间接破坏的案例,一教学楼



(a) 简易房屋整体垮塌(来源:k.sina.com.cn)



(b) 框架结构整体倒塌(来源: chinanews.com)



(c) 建筑物的间接破坏(来源: blog.sina.com.cn)

图4 建筑物的整体垮塌

Fig.4 Overall collapse of buildings

被泥石流推倒后,直接撞向后方砖混结构建筑,整栋楼第2层到第4层被水平推垮,层间依次错位2米左右,建筑只余最上面完整的2层。

在灾情评定时,对有些虽未倒塌但损伤至一定程度的建筑,其破坏程度也经常判为倒塌,主要依据历史泥石流中建筑破坏案例,当砖混结构承重墙体破坏超过40%时,属于严重结构性破坏,会造成房屋整体性垮塌;框架结构破坏柱体数量超过总数的40%时,建筑物将失稳完全倒塌,如果破坏柱体为中央支撑构件,其比例超过25%后,建筑物便完全垮塌<sup>[14-15]</sup>。

综上所述,泥石流作用下房屋建筑的破坏形态多种多样,可汇总为如图5所示的类型。

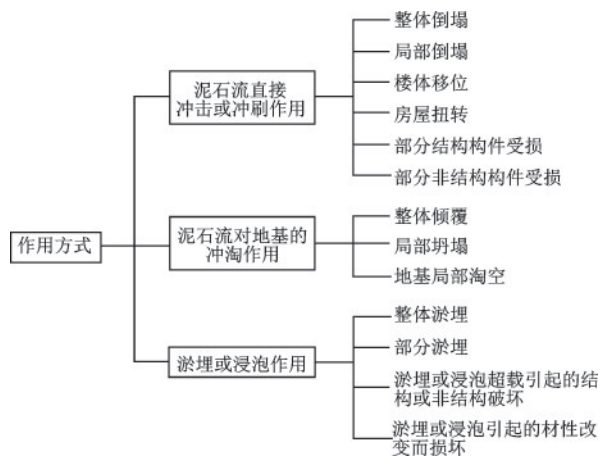


图5 泥石流下房屋建筑的受损形态

Fig.5 Damage patterns of buildings due to debris flows

### 3 泥石流对建筑物的作用机理分析

为深入探究泥石流作用下建筑物的受损机理,为泥石流灾情评估、灾情预测、易损性分析以及防灾策略的制定等提供依据,需开展泥石流对建筑物的作用机理研究,厘清泥石流灾害强度特性与建筑物损伤程度之间的关系。

泥石流是一种快速流动的高浓度固液两相体,它既像水流一样在遇到障碍物时在物体表面产生水压力,又像固体颗粒一样,在物体接触面发生碰撞和摩擦。此外,由于泥石流具有比较大的屈服应力,易淤积。由此可见,泥石流对建筑物的作用方式主要体现为冲击、冲刷、淤积作用三种。一般地,这三种方式交织发生,联合作用于房屋建筑,并非单独出现。

#### 3.1 冲击作用

广义的泥石流流体冲击力由浆体动压力、静压力和块石撞击力三部分组成,浆体冲击力作用时间较长,大小取决于浆体流速。流速快时泥石流携带的动能大,破坏性强,表现为动压力;流动慢时一般表现为静力作用;块石撞击力取决于石块质量与流体流动速度。以下分述这三种作用对建筑物的影响。

(1)浆体动压力。浆体动压力是泥石流最普遍的作用方式,当冲击动能高于建筑物抵抗能力时,泥石流将摧毁建筑物,部分动能转化为建筑物形变及破坏所消耗的能量。浆体动压力作用下建筑物的受损程度不仅与流体的速度、规模及建筑物自身的抵抗能力有关,还受冲击角度的影响,即受控于

泥石流的主流线与建筑物正立面的夹角。当冲击夹角约为 $90^\circ$ 时,如图6(a)所示,迎流面墙体即区域1,受冲面积大,承受面外弯曲作用,众所周知,砌体墙的设计很少考虑面外的荷载作用及相应的承载力要求,因墙体迎流面即平面外抗侧及抗弯刚度均很小、抗弯能力低,故易发生破坏;当泥石流主流线与建筑物正立面成一定夹角时,如图6(b)所示,墙面1和墙面2以承受侧向冲击摩擦作用为主,泥石流携带的大颗粒会对建筑结构侧面门窗和墙体表面的保护层造成磨蚀破坏,如钢筋混凝土构件中钢筋外部包裹层或砖混结构砖块外的砂浆。同时,凸出部位A、B转角处在泥石流侧向冲击下极易被冲坏,如图3(e)中的建筑。

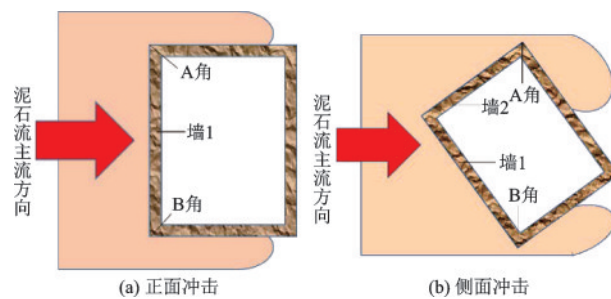


图6 泥石流对房屋的冲击动力破坏示意

Fig.6 Schematic diagram of dynamic damage of buildings under the impact of debris flows

(2)浆体静压力。许多关于泥石流浆体整体冲击力的研究往往只考虑泥石流冲击动力<sup>[16-18]</sup>,实际上,当泥石流流速较慢时,静力是泥石流浆体冲击力的主要部分。借鉴洪水中的静水压力的计算方法<sup>[19]</sup>,将浆体静压力近似为三角形分布荷载,作用示意如图7所示<sup>[20]</sup>,可以看出,流深对结构所承受的荷载

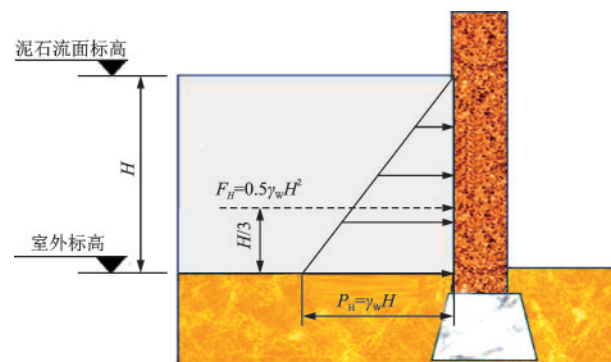


图7 泥石流静压力对建筑墙体的作用

Fig.7 Effect of static pressure of debris flow on the building wall

注: $H$ 为泥石流流深; $\gamma_w$ 为泥石流的容重; $F_H$ 为单位宽度墙体受到的静压力合力; $P_H$ 为泥石流的静压力

起关键作用。取黏性泥石流最小容重( $2.10\text{ g/cm}^3$ ),流深为一层建筑物高度的(3 m)浆体静合力将达到90 kN,此时墙体必将产生严重结构性破坏<sup>[20]</sup>。

(3)块石撞击力。泥石流携带的大石块是破坏建筑物的主要介质之一,相对泥石流浆体作用面积小,相应破坏程度较大,可撞坏主体支撑结构,导致该结构完全破坏或失效。块石撞击力取决于石块质量与速度。此外观察发现,大石块多聚集于龙头,位于泥石流河道入口处的建筑往往首当其冲,破坏严重,而之后的建筑由于受到遮蔽效应破坏较轻,因此在设计格栅坝支墩、栏杆以及防撞墩等结构时尤其需要考虑大石块的冲击作用。

### 3.2 冲刷作用

冲刷作用在泥石流沟的不同位置有着不同的表现形式。在泥石流形成区和流通区,泥石流供给、启动和补给水源、土源和砂石,泥石流暴发时,泥石流沟大量的松散物源在坡面径流,高速运动的泥石流侵蚀冲刷主沟两侧的残坡积物、阶地,不断补给固体物质,通过溯源侵蚀、侧蚀、下蚀方式使得沟道两侧房屋建筑桩基、条形基础、筏板基础等外露、悬空;当泥石流进入堆积区后,流体接触建筑物表面,在建筑物底部形成湍流,对建筑物的地基产生局部冲刷作用,冲刷最严重的地方一般发生在相邻建筑物的墙角处。

冲刷作用的强度受泥石流固体体积浓度、动力黏滞系数、流速和流深等参数的影响,同时与建筑物采取的基础形式也有一定关系。随着泥石流作用时间的延长,建筑物地基土被冲刷、掏空,导致建筑物基础滑移断裂或不均匀下沉,并加剧上部结构的破坏,其严重后果不言而喻。

### 3.3 淤埋和浸泡作用

泥石流的淤积作用主要有两种形式:一是泥石流以低流速经过建筑物或通过建筑物上的开口进入建筑物内部时,淤积在建筑物周围或者建筑物内部;二是泥石流进入堆积扇后,由于地形开阔,沟床平缓,泥石流前行阻力增大,流速逐渐减小,进入堆积过程,其搬运的大量泥沙石块等固体物质沉积,淤埋建筑。淤埋会对建筑物产生浸泡作用,此外,由于堰塞湖形成导致水位上涨也会将建筑物浸泡其中。

淤积作用的强度主要取决于泥石流的流深,浅

层次的淤积会使室内物品受损,造成一定经济损失。当堆积物过多时可能会使房屋建筑地基基础或构件产生超载,进而产生变形破坏。当建筑物完全被淤埋时,已丧失修复价值,造成严重损失。此外,淤积过程中受到泥石流浆体浸泡的房屋,会出现钢筋锈蚀和建筑材料的受水侵蚀等影响结构耐久性的破坏,建筑物地基土的承载力也会受到一定影响。

## 4 破坏等级划分

基于上述对泥石流作用下建筑的受损形态和致灾原理的讨论,泥石流破坏等级可从宏观建筑受损程度进行划分。泥石流下房屋建筑的破坏等级是构建其易损性模型的基础,据刘希林等<sup>[21]</sup>对泥石流易损性的定义,泥石流灾害强度量化指标和破坏等级划分是不可分割的,故从以下两个方面来介绍。

### 4.1 泥石流灾害强度量化指标探讨

由前述分析可知,流深和流速是表征泥石流破坏力的两个关键参数,但各自也存在局限性。流深易获取,较直观,通过泥痕法测得,应用最为广泛。S.Fuchs等<sup>[22]</sup>、F.Leone等<sup>[23]</sup>和W.Lo等<sup>[24]</sup>均选用流深为强度指标在各自的研究区构建了建筑物易损性模型。但若仅以流深表征泥石流强度,会导致高层建筑物易损性评估过高,而低矮建筑物往往会被低估<sup>[25]</sup>。

流速与泥石流冲击动能关系密切,但难以直接获取。通常根据改进曼宁公式、大石块起动的临界流速计算公式、泥石流冲高与流速关系公式、弯道超高公式等反算,涉及多个泥石流特征参数(容重、纵坡降、沟床糙度等),计算复杂。随着计算机科学、计算流体力学以及数值方法的革新,有学者结合FLO-2D等泥石流流体力学模型进行数值模拟,得到流速等多个强度参数并建立对应的易损性曲线<sup>[26-28]</sup>。该方法仍存在明显的局限性,一是由于泥石流流体性质复杂,其各种作用很难模拟;二是模拟中没有考虑建筑物的空间分布对泥石流强度的影响。

应当明确,泥石流对建筑的破坏力成因复杂,破坏作用在流经路径上呈“强-弱-强”起伏变化,受建筑物空间分布的影响<sup>[29]</sup>。仅用单一强度因子难

以涵盖泥石流的破坏力,采用不同的泥石流强度参数所得到的分析结果往往不尽相同。因此,考虑多参数形成综合强度指标以表征泥石流强度应是较好解决该问题的一个研究趋势。

#### 4.2 建筑物破坏等级划分

目前国内外尚无专门针对泥石流的建筑物破坏等级评定的相关标准。各国学者结合实际灾害现场调研需要,提出了一些建筑物的泥石流破坏分级方法<sup>[14-15, 29-31]</sup>。2010年8·8舟曲特大泥石流后为了科学开展灾后受损房屋鉴定工作,甘肃土木工程科学院会同中国建筑科学研究院临时起草了《甘肃省舟曲特大山洪泥石流灾区受损建筑物安全性应急鉴定技术导则》,导则主要考虑承重结构构件的受损程度以及修复的难易程度,确定了完好、轻微破坏、中等破坏和严重破坏四个鉴定等级,对我国泥石流灾后房屋受损鉴定工作具有开创性意义<sup>[32]</sup>。由于现有的分级方法均未考虑建筑及结构类型,且破坏状态描述较为笼统,评估鉴定结果难以用于易损性分析。

如前所述,西部山区建筑类型多样,建造质量

参差不齐,对泥石流灾害的敏感性差异很大;另一方面,不同类型建筑在泥石流下的成灾机理显著不同,如混凝土框架结构的承重构件(柱或梁)破坏是导致其倒塌的主要原因,而砖混结构则是因承重墙体被冲垮导致房屋垮塌,由于前者承重构件的受冲面小且抗冲击能力强,故遭受同等强度泥石流作用时,混凝土框架结构建筑物抵抗破坏的能力远高于砖混结构。由此可见,易损性分析时需结合各地房屋建筑的实际情况,科学合理分类,分别建立破坏等级划分标准。

《建(构)筑物地震破坏等级划分》<sup>[33]</sup>中明确规定,建筑物破坏等级划分原则应以承重构件的破坏程度为主,兼顾非承重构件的破坏程度,并考虑修复的难易和功能丧失程度的高低。泥石流不仅会对承重构件和非承重构件造成损坏,还会掏空地基、淤埋或浸泡建筑,这些破坏形态会加大修复难度,增加重建费用,还会造成使用功能丧失。综上,本文以半定量的方式给出框架结构与砖混结构的破坏等级划分标准,见表1。破坏等级共分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏5个级别。

表1 泥石流下建筑物破坏等级的划分

Table 1 Classification of building damages due to debris flow

破坏等级	破坏状态描述				可修复性
	承重和非承重构件		地基失效情况	浸泡或淤积情况	
	框架结构	砖混结构			
基本完好	框架梁、柱完好,个别门窗和部分墙面轻微损坏	承重墙和非承重墙完好,个别门窗和墙面部分轻微损坏	地基基础基本维持原状	墙面有冲刷、磨损的痕迹,底层地面基本无浸泡或淤积	使用功能正常,不加修理可继续使用
轻微破坏	个别框架梁或框架柱轻微受损,部分墙体有明显裂缝,部分门窗受损	个别承重墙出现轻微受损,个别非承重墙有明显裂缝,部分门窗受损	个别地基处出现掏空现象	淤积厚度小于1/4房屋高度	基本使用功能不受影响,稍加修理可继续使用
中等破坏	少数梁和柱体撞断,部分墙体损坏严重或倒塌	少数承重墙体损坏,部分有明显裂缝,部分非承重墙损坏严重或被打穿	部分地基被掏空,基础出现下沉现象	淤积厚度小于1/2房屋高度	基本使用功能受到一定影响,修理后可使用
严重破坏	部分框架梁和柱体损坏严重或撞塌,多数墙体倒塌,部分楼屋盖塌落	部分承重墙损坏严重或被打穿,多数非承重墙倒塌,部分楼屋盖塌落	多数地基被掏空,基础下沉,上部结构明显倾斜	淤积厚度超过1/2房屋高度	基本使用功能受到严重影响,难以修复或无修复价值
毁坏	房屋框架破坏比例超过40%或超过25%的中央支撑柱破坏,整体残余部分不足50%	房屋承重墙体受损比例超过40%,整体残留部分不足50%	地基完全被掏空,房屋下沉倾斜严重,濒于倒塌或被冲毁	房屋整体淤埋	使用功能丧失,已无修复可能

注:破坏数量用语含义:个别、少数一宜取10%以下;部分一宜取10%~50%;多数一宜取50%以上

## 5 结 论

泥石流作用下房屋建筑破坏机理复杂、破坏形态多样,本文对此进行了尝试性探讨分析,为开展西部山区泥石流灾害的评估及建筑物易损性分析提供研究思路和参考,形成了以下结论:

(1)泥石流对房屋建筑的致损形态多样,包括直接冲击破坏、地基冲刷破坏、淤埋或浸泡致灾以及间接破坏等。

(2)表征泥石流灾害强度的流深和流速在路径上呈显著动态波动,与建筑物的空间分布密切相关,仅靠单一指标难以全面反映泥石流致灾强度,应考虑建立综合强度指标。

(3)建筑物的规模、结构型式及建造质量不同,其泥石流易损性差异很大,框架结构表现出较为明显的抗灾优势。

(4)泥石流下建筑物的破坏等级划分应综合考虑泥石流动力或静力作用造成的结构和非结构损伤以及地基失效情况、浸泡或淤积情况。

### 参考文献:

- [1] 崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J]. 地理科学进展, 2014, 33(2): 145-152.  
Cui P. Progress and prospects in research on mountain hazards in China[J]. Progress in Geography, 2014, 33(2): 145-152. (in Chinese)
- [2] 蒋庆丰, 游珍, 沈吉, 等. 山坡泥石流场地易损性评价[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(1): 123-127.  
Jiang Q F, You Z, Shen J, et al. Vulnerability assessment of site with hill slope debris flow[J]. Journal of Nature Disasters, 2006, 15(1): 123-127. (in Chinese)
- [3] 崔鹏, 杨坤, 韦方强, 等. 泥石流灾情评估指标体系[J]. 自然灾害学报, 2001, 10(4): 36-41.  
Cui P, Yang K, Wei F Q, et al. Index system of debris-flow hazard assessment[J]. Journal of Nature Disasters, 2001, 10(4): 36-41. (in Chinese)
- [4] 石莉莉, 乔建平. 基于GIS和贡献权重迭加方法的区域滑坡灾害易损性评价[J]. 灾害学, 2009, 24(3): 46-50.  
Shi L L, Qiao J P. Vulnerability evaluation on regional landslides based on gis and contribution weight superposition approach[J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(3): 46-50. (in Chinese)
- [5] 苏鹏程, 韦方强, 徐爱淞, 等. 四川省汶川地震灾区震后山地灾害综合风险评价[J]. 水土保持通报, 2011, 31(1): 231-237.

- Su P C, Wei F Q, Xu A S, et al. Integrated risk assessment of mountainous hazards in seismic disastrous areas of sichuan province after wenchuan earthquake [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(1): 231-237. (in Chinese)
- [6] 韦方强, 谢洪, 钟敦伦, 等. 西部山区城镇建设中的泥石流问题与减灾对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(4): 25-30.  
Wei F Q, Xie H, Zhong D L, et al. Debris flow and its disaster mitigation in the construction of mountain towns in western China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(4): 25-30. (in Chinese)
- [7] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444.  
Yin Y P. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433-444. (in Chinese)
- [8] Huang R, Fan X. The landslide story[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(5): 325-326.
- [9] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 10-19.  
Cui P, Zhuang J Q, Chen X C, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in wenchuan area after the earthquake[J]. Journal of Sichuan University (Engineer Science Editon), 2010, 42(5): 10-19. (in Chinese)
- [10] 余斌, 唐川, 杨永红, 等. 泥石流动力特性与活动规律研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
Yu B, Tang C, Yang Y H, et al. Dynamic characteristics and activity law of debris flow [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [11] 谢洪, 刘维明, 赵晋恒, 等. 四川石棉2012年“7·14”唐家沟泥石流特征[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(4): 90-97.  
Xie H, Liu W M, Zhao J H, et al. Characteristics of Tangjiagou debris flow in Shimian of Sichuan in July 14, 2012 [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(4): 90-97. (in Chinese)
- [12] 余斌, 马煜, 吴雨夫. 汶川地震后四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流灾害调查研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 827-836.  
Yu B, Ma Y, Wu Y F. Investigation of severe debris flow hazards in Wenjia guily of Sichuan province after the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 827-836. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 曾超, 崔鹏, 葛永刚, 等. 四川汶川七盘沟“7·11”泥石流

- 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)
- [15] Jakob M, Stein D, Ulmi M. Vulnerability of buildings to debris flow impact [J]. Natural Hazards, 2012, 60(2): 241-261.
- [16] 张宇, 韦方强, 贾松伟, 等. 砖砌体建筑在泥石流冲击力作用下动态响应实验[J]. 山地学报, 2006, 24(3): 340-345. Zhang Y, Wei F Q, Jia S W, et al. Experimental research of unreinforced masonry wall under dynamic impact of debris flow [J]. Journal of Mountain Science, 2006, 24(3): 340-345. (in Chinese)
- [17] 曾超, 苏志满, 雷雨, 等. 泥石流浆体与大颗粒冲击力特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1923-1930. Zeng C, Su Z M, Lei Y, et al. An experimental study of the characteristics of impact forces between debris flow slurry and large-sized particles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1923-1930. (in Chinese)
- [18] 雷雨, 崔鹏, 蒋先刚. 泥石流作用下砌体房屋破坏机理与结构优化[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(4): 61-69. Lei Y, Cui P, Jiang X G, et al. Failure mechanism and structure optimization of masonry building due to debris flow impact [J]. Journal of Sichuan University (Engineer Science Editon), 2016, 48(4): 61-69. (in chinese)
- [19] 曹留伟, 刘曙光, 钟桂辉. 基于结构及人身安全的住宅建筑洪水破坏分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(1): 67-74. Cao L W, Liu S G, Zhong G H. Analysis of residential building failure under flood action based on building and human life safety [J]. Joernal of Nature Disasters, 2013, 22(1): 67-74. (in Chinese)
- [20] 曾超. 泥石流作用下建筑物易损性评价方法[D]. 成都: 中国科学院大学, 2014. Zeng C. Vulnerability assessment of building to debris flow hazard[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [21] 刘希林, 莫多闻. 泥石流易损度评价[J]. 地理研究, 2002, 21(5): 569-577. Liu X L, Mo D W. Site-specific debris flow vulnerability assessment [J]. Geographical Research, 2002, 21(5): 569-577. (in Chinese)
- [22] Fuchs S, Heiss K, Huebl J. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2007, 7(5): 495-506.
- [23] Leone F, Lavigne F, Paris R, et al. A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability [J]. Applied Geography, 2011, 31(1S1): 363-375.
- [24] Lo W, Tsao T, Hsu C. Building vulnerability to debris flows in Taiwan: a preliminary study [J]. Natural Hazards, 2012, 64(3): 2107-2128.
- [25] Totschnig R, Sedlacek W, Fuchs S. A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport [J]. Natural Hazards, 2011, 58(2): 681-703.
- [26] Zhang S, Zhang L, Li X, et al. Physical vulnerability models for assessing building damage by debris flows [J]. Engineering Geology, 2018, 247: 145-158.
- [27] 黄勋, 唐川. 基于数值模拟的泥石流灾害定量风险评估[J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 1047-1055. Huang X, Tang C. Quantitative risk assessment of catastrophic debris flows through numerical simulation [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(10): 1047-1055. (in Chinese)
- [28] Luna B Q, Blahut J, Van Westen C J, et al. The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011, 11(7): 2047-2060.
- [29] 胡凯衡, 崔鹏, 葛永刚. 舟曲“8·8”特大泥石流对建筑物的破坏方式[J]. 山地学报, 2012, 30(4): 484-490. Hu K H, Cui P, Ge Y G. Building destruction patterns by August 8, 2010 debris flow in Zhouqu, Western China [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(4): 484-490. (in Chinese)
- [30] Guillard-Goncalves C, Zezere J L, Pereira S, et al. Assessment of physical vulnerability of buildings and analysis of landslide risk at the municipal scale: application to the Loures municipality, Portugal [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2016, 16(2): 311-331.
- [31] Kang H, Kim Y. The physical vulnerability of different types of building structure to debris flow events [J]. Natural Hazards, 2016, 80(3): 1475-1493.
- [32] 杜雷, 郑建军, 牛金亮, 等. 8·8舟曲特大山洪泥石流灾后受损房屋鉴定评估与分析[J]. 工程质量, 2011, 29(11): 51-54. Du L, Zheng J J, Niu J L, et al. Damaged houses evaluation and analysis in the 8.8 zhou qu super mountain flood and debris flow disaster [J]. Construction Quality, 2011, 29(11): 51-54. (in Chinese)
- [33] 建(构)筑物地震破坏等级划分 GB/T 24335—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

(

(本文编辑: 池营营)