

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250708003

泸定6.8级地震磨西镇建筑坠落物模拟及其对道路通行的影响*

潘毅^{1,2}, 刘方琳¹, 郭欣¹, 陈子峰^{3,4}, 林旭川^{3,4}

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031; 2. 西南交通大学抗震工程技术四川省重点实验室, 四川成都 610031; 3. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150080; 4. 中国地震局工程力学研究所地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150080)

摘要: 强震发生时沿街建筑所产生的坠落物往往对灾区城市道路的通行能力造成不同程度的影响。以位于川西山区的磨西镇为研究对象, 探讨2022年泸定6.8级地震引发的道路通行能力退化问题, 分析建筑坠落物对震后交通系统的影响机制。基于震害调查与遥感影像数据, 建立建筑群结构弹塑性时程分析模型与多刚体动力学倒塌模型, 模拟泸定地震中磨西镇建筑群震害, 评估坠落物空间分布。在此基础上, 分析地震烈度、建筑结构类型等因素对山区城镇建筑群坠落物分布和道路通行能力的影响。研究表明, 基于本文模拟方法获取的坠落物分布范围和形态与实际震害调查结果基本吻合。建筑坠落物的空间分布受地震烈度、结构类型与地形位置影响显著。地震强度增加, 坠落物覆盖范围增大, 其中, 砖砌体结构和未抗震设防结构增长幅度明显。而磨西台地独特的地形特点使得台地边缘建筑坠落物分布范围大于台地中部。临街建筑产生的坠落物显著影响道路的通行能力, 在9度设防地震动作用下导致部分路段通行能力下降超过50%, 当地震作用达到9度极罕遇水准时, 道路堵塞路段占比超过70%, 交通系统接近瘫痪。本文研究旨在为西南山区城镇地震应急救援通道规划与震后交通恢复提供参考。

关键词: 建筑倒塌; 道路通行能力; 震害调查; 坠落物模拟; 坠落物分布

中图分类号: P315; TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0291-12

Simulation of Falling Debris from Buildings in Moxi Town during M_s 6.8 Luding Earthquake and Its Impact on Road Capacity

PAN Yi^{1,2}, LIU Fanglin¹, GUO Xin¹, CHEN Zifeng^{3,4}, LIN Xuchuan^{3,4}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 4. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: Falling debris from buildings along streets during strong earthquakes often affects the capacity of urban roads in disaster-affected areas to varying degrees. Taking Moxi Town in the mountainous

* 收稿日期: 2025-07-08; 修回日期: 2025-08-18

基金项目: 应急管理部重点科技计划(2024EMST050503)、地震科技星火计划(XH24038YB)、中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2024D01)资助

作者简介: 潘毅(1977—), 男, 教授, 博士。主要从事工程结构抗震与加固研究。E-mail: panyi@swjtu.edu.cn

通信作者: 林旭川(1984—), 男, 研究员, 博士。主要从事区域震害模拟与结构工程抗震研究。E-mail: linxuchuan@iem.ac.cn

area of western Sichuan Province as the study area, this study investigated the degradation of road capacity caused by the 2022 Luding M_s 6.8 earthquake and analyzed the influence mechanisms of falling debris on the post-earthquake transportation system. Based on seismic damage surveys and remote sensing imagery data, an elastoplastic time-history analysis model for building clusters and a multi-body dynamics collapse model were established to simulate the seismic damage of building clusters in Moxi Town during the Luding earthquake and to assess the spatial distribution of falling debris. On this basis, the effects of seismic intensity, building structural types, and other factors on the distribution of falling debris and road capacity in mountainous towns were analyzed. The results showed that the distribution range and morphology of falling debris obtained by the simulation method in this study were basically consistent with the results of actual seismic damage surveys. The spatial distribution of building falling debris was significantly affected by earthquake intensity, structure type, and topographic location. As earthquake intensity increased, the coverage of falling debris expanded, with a significant increase observed for brick masonry structures and structures without seismic fortification. The unique topographic characteristics of the Moxi terrace resulted in a larger distribution range of falling debris from buildings at the terrace edge than those in the central area of the terrace. Under the 9-degree fortification ground motion, the capacity of some road sections decreased by more than 50%. When the seismic action reached the 9-degree extremely rare earthquake level, the proportion of blocked road sections exceeded 70%, and the transportation system was close to paralysis. This study provides a reference for planning earthquake emergency rescue routes and post-earthquake traffic restoration in mountainous towns of southwestern China.

Keywords: building collapse; road capacity; seismic damage survey; falling debris simulation; falling debris distribution

0 引言

地震是我国西南山区城镇面临的主要自然灾害之一。强烈地震可使城镇建筑群遭受严重震害,沿街建筑的倒塌或其产生的坠落物可能直接侵占道路有效通行空间,削弱道路通行能力,进而影响震后应急响应效率与居民疏散安全。^[1-2]。泸定磨西镇地处川西高山峡谷区,地形复杂,道路沿山体和河谷呈线性集中分布,主要依赖S434省道及少量支路形成“二横多纵”路网。2022年泸定6.8地震发生后,灾城镇道路功能一度中断,严重阻碍灾区人员疏散和救援力量进入^[3-7]。磨西镇是距震中最近的城镇,镇内建筑群出现较多震害,且多处建筑发生倒塌^[8],部分倒塌建筑产生的坠落物侵入道路建筑限界^[5-9],造成道路阻塞。

在建筑密集区域,地震时沿街建筑产生的坠落物,往往以点状或带状形式堆积于路面上,形成严重堵塞,成为限制应急救援车辆通行和人员疏散的瓶颈。目前,已有研究较多聚焦于地震对道路基础

设施的破坏机制^[10-11],如路基稳定性、边坡滑移与桥梁震害等方面,但较少系统探讨建筑倒塌瓦砾的空间分布规律。而灾后道路通行能力的衰减不仅源于道路自身的破坏,还与建筑坠落物的堆积密切相关^[12]。在建筑密度较高的区域,因建筑倒塌形成的坠落物堆积区域可对主干道和节点区域道路通行能力造成不同程度影响^[13]。

震后道路通行能力的准确评估是城镇应急响应与灾后恢复规划的重要基础。目前,常用的评估方法主要包括基于交通流经验模型的估算方法^[14],以及结合道路网络特征与路径分析方法^[15]。然而,这些方法忽略了地震后建筑倒塌所带来的空间占据效应,难以反映瓦砾堆积对道路通行能力的干扰情况。本研究以磨西镇为研究区域,基于震害调查数据与高分辨率遥感影像,构建建筑结构的弹簧-质量动力模型,结合多刚体动力学模拟地震作用下倒塌建筑的破坏与坠落过程,以获得坠落物在空间上的分布。在此基础上,结合道路设计条件、交通流特性等参数,定量评估城镇道路震后通行能力的降低水平,以揭示建筑坠落物对道路功能性损失的

影响机制,为地震应急救援通道规划与城市抗震韧性提升提供理论依据。

1 磨西镇道路震后通行能力调查

1.1 磨西镇道路概况

磨西镇道路网络以省道、县道及景区专用公路为骨架,构成通达性较强但结构较为集中的交通体

系,如图1所示。横向干道主要包括位于新城区的环城路和位于旧城区的贡嘎大道,分别分布于城镇南北两侧,形成横向交通主轴;纵向主干以S434省道为核心,北通康定,南接泸定县城,并与G318国道交汇,是川藏旅游环线的重要组成部分。镇内公路通达性良好,分别向西通海螺沟、东达燕子沟景区及雅安方向、南联雅康高速,北接康定机场与川藏北线,整体构成了联通旅游景点与区域交通枢纽的多向延展格局。



图1 磨西镇道路网络布局

Fig. 1 Road network layout of Moxi Town

结合震害调查,并参考《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)^[16],获取磨西镇道路信息。磨西镇道路依功能分为三级结构,包括主干道、次干道与支路,如图2所示。主干道以S434省道、环城路和贡嘎大道为核心。其中,S434省道设计时速为40~60 km/h,路基宽度为6~7 m,路面采用沥青混凝土铺筑,旅游旺季日均通行量可达3 000辆;环城路与贡嘎大道则承担景区集散功能,宽度约7 m,路面以沥青为主,局部高海拔易损段采用水泥路面。次干道包括磨西至燕子沟公路及镇内新兴旅游通道,前者宽度为5~6 m,后者作为近几年新建道路,宽度达6~7 m,全沥青铺装,主要服务于区域轻型货运与旅游车辆分流。支路系统由磨西古镇石板街道和乡村道路构成,古镇街道宽度仅3~4 m,保留传统石板铺面,主要用于旅游观光,部分区域限制机动车通行;乡道多分布于山地村落,部分路段仍为碎石路面,主要满足本地居民日常出行需求。

受地形条件制约,磨西镇交通出入口高度依赖S434省道。道路多沿山体边缘或峡谷延伸,虽有利于适应地形、提升空间利用效率,但也加剧了系统在灾后通行中的脆弱性。特别是在老城区与景区连接处,道路狭窄、建筑密集,一旦发生结构倒塌或构件脱落,易对道路形成堵塞,严重影响救援与疏散效率。



(a) 主干道

(b) 次干道

图2 震前磨西镇道路

Fig. 2 Roads in Moxi Town before earthquake

1.2 震后建筑坠落物分布

地震发生后,第一时间进行了现场调查。调查结果表明,磨西镇部分建筑出现倒塌或非结构构件脱落现象。非结构坠落物主要来源包括外围护墙、屋顶覆盖材料、木质装饰构件及玻璃门窗等。其中,多层砌体建筑普遍采用非承重填充墙作为外围护结构,在地震作用下填充墙易发生脱落,形成碎块坠落。例如,S434省道沿线分布有大量砖混结构建筑,这些建筑的墙体老化严重且部分无抗震构造措施,震后多处填充墙出现大面积剥落。较为严重的为贡嘎大道中段的一栋建筑,因基础受损导致墙体倾斜并发生大块坠落,如图3所示。低层砖木结构建筑屋顶采用瓦片作为覆盖材料,瓦片之间缺乏可靠连接,在地震作用下易整体滑落。例如,民俗风情街及旅

游接待区内的大量仿古建筑采用木质屋顶结构,屋面瓦片多叠压于椽子之上,缺乏锚固措施,震后普遍出现“溜瓦”现象,导致成片坠落物,如图4所示。



图3 外围护墙破坏坠落

Fig. 3 Collapse of exterior enclosure walls



图4 屋顶覆盖材料坠落

Fig. 4 Collapse of roof covering materials

仿古建筑及部分商业设施设置有简易固定的木质屋檐等外挑构件,地震中容易因连接失效整体坠落。以位于榆磨路的部分仿古建筑为例,其外檐结构整体失稳,上层木屋檐坠落后进一步冲击下层结构,产生大量瓦片与木构件堆积,如图5所示。此外,建筑的玻璃门窗也因结构变形导致破裂,产生大量玻璃碎片。新城部分建筑玻璃门窗破裂后碎片散落至车道和人行通道,如榆磨路某建筑的玻璃门在地震作用下破裂,碎片大面积分布于车道区域,如图6所示。震害调查发现,坠落物主要分布在临街建筑5 m范围内,部分密集街段堆积厚度超过0.3 m。坠落物明显挤占道路有效通行宽度,影响震后道路通行能力。



图5 窗户屋檐覆盖材料坠落

Fig. 5 Collapse of window and eave covering materials



图6 玻璃破碎

Fig. 6 Glass breakage

从空间分布特征来看,坠落物密集分布于磨西古街及磨西镇边缘区域的街道。这一分布特征与建筑结构类型、地形条件密切相关,对震后交通疏散能力构成直接影响。磨西古街街道狭窄,部分路段宽度小于4 m,两侧为密集的老旧砖木建筑,建筑间距小、结构脆弱,在强烈地震作用下出现多处倒塌,坠落物单侧覆盖范围普遍超过2 m,呈每隔几米一处的“点状”不连续分布,断续影响道路通行。磨西镇边缘区域,如鹏程路一带,其受台地效应影响,地震动放大效应显著,部分沿街建筑发生连续倒塌,坠落物呈“带状”分布,覆盖整个街段,严重挤占道路空间,造成该道路功能大幅下降。总体上,磨西镇建筑坠落物空间上的分布呈现出明显的“点状、带状”复合特征,主要分布于道路两侧。

1.3 震后道路通行能力调查

地震发生后,磨西镇部分道路通行能力显著受限,尤其是靠近台地边缘区域,沿街建筑坍塌产生的大量坠落物,造成道路阻塞。例如,作为横向主干道之一的贡嘎大道,其靠近台地边界的路段受邻近建筑震害影响,产生大量坠落物,导致道路堵塞。原本具备双向单车道通行能力的路段,震后被迫改为交替通行,不同方向车辆需依次通过,显著降低了通行效率,如图7(a)所示。



(a) 贡嘎大道

(b) 磨西古街

图7 震后磨西镇道路

Fig. 7 Roads in Moxi Town after earthquake

交通节点区域的通行问题尤为突出。冰川路作为纵向支路,与贡嘎大道在镇中心区域形成重要交汇点,承担纵横向交通转换功能。但由于贡嘎大道震后宽度减小,该节点转弯半径不足,造成对向车辆排队等候,加剧了通行拥堵,严重制约了镇区道路网络的交通效率。同时,磨西古街作为连接磨西镇与海螺沟景区的重要交通节点,在地震中受损明显。由于该路段铺设为传统砖石结构,震后出现地砖错位与翘起,形成明显高差,严重影响机动车和行人的通行效率。部分区域甚至需绕行或人工清障后方可通行,显著削弱了该节点在镇区通行网络中的枢纽功能,如图7(b)所示。另外,位于镇边缘的鹏程路在震后发生建筑倒塌,原为双车道的道路现仅剩一条车道可通行,通行能力显著下降,为确保安全需设置一定的防护距离。该道路原本承担着向贡嘎大道方向的交通导入功能,与主路的相交点在震后成为新的交通瓶颈,导致贡嘎大道部分路段交通压力集中,局部拥堵加剧。综合来看,贡嘎大道沿线及其与支路相交的枢纽区域成为本次震后交通系统的堵塞点,其震害程度直接影响了主要疏散路线的畅通性与应急响应效率。

2 建筑倒塌的坠落物模拟

2.1 建筑倒塌模型的建立

为模拟地震作用下建筑群的倒塌过程及其坠落物分布,基于地理信息系统(GIS)技术,结合模拟器 Yousimulator^[17]所构建的多自由度弹簧-质量模型,开展了建筑群的地震弹塑性时程分析与震害模拟。通过震害调查和卫星遥感影像,获取了磨西镇区域内各类建筑物的结构类型、层数、建造年代等基础信息,输入至模拟器中,构建了具有区域特征的建筑群仿真模型。为实现建筑倒塌过程中坠落物的空间分布模拟,在弹簧-质量模型的基础上,引入了多刚体动力学实现建筑倒塌过程模拟。相比通用结构分析方法,该方法能用更小的计算资源,再现坠落物的坠落过程。

在模型构建过程中,基于上述计算框架,建筑倒塌模型引入了若干关键假设^[18]。采用模块化方式对建筑结构进行简化,将单体建筑拆分为承重构件、外墙构件、楼板构件三种基本构件。其中,承重构件、外墙构件进一步细化为多个刚体单元,以增强对局部破坏特征的捕捉精度;楼板则视为整体刚体,在缺乏结构详细信息的情况下,以简化模型复

杂度并保持质量分布合理性,如图8(a)所示。为提高计算效率,模型假设各层楼板集中承担本层质量,形成质量集中模型,如图8(b)所示。构件之间通过物理引擎构建的铰链约束或点对点约束实现连接,不同结构类型和构造措施的抗震性能差异,是通过调节连接强度参数实现。

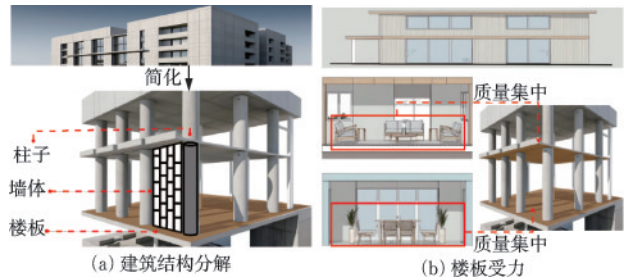


图8 建筑倒塌简化模型示意

Fig. 8 Schematic diagrams of simplified building collapse model

2.2 建筑倒塌模型的验证

为验证坠落物模拟结果的有效性,选取磨西镇中典型的砌体结构与砖木结构建筑开展对比分析。以S434省道西侧台地边缘区域一栋三层砌体建筑(以下简称建筑A)为例,该建筑建造于2010年,采用现代砌筑工艺,其震害主要表现为底部薄弱层破坏模式。现场调查显示,该建筑首层承重墙体出现典型的X形贯穿性剪切裂缝,梁柱节点处多根柱发生水平位移,并伴有圈梁与构造柱连接破坏,如图9(a)所示。上部结构在失去有效竖向支撑后发生整体倒塌。底层窗台的错位痕迹与顶层外墙相对完整的状态对比,验证了该结构的倒塌情况,如图9(b)所示。从倒塌碎屑的分布特征来看,坠落物主要源于首层承重构件的破坏产物,具体包括混凝土破裂后裸露出纵向钢筋的构造柱残段、表面附有砌筑砂浆剥落痕迹的破碎砖块,以及保持原始L型转角形态的圈梁残片等。

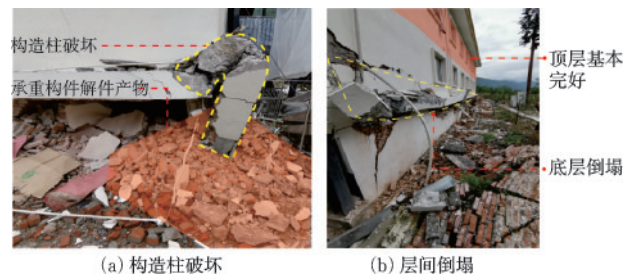


图9 建筑A的震害

Fig. 9 Seismic damage of building A

位于磨西古街核心区的某二层砖木结构建筑(以下简称建筑B),该建筑建造年代较早,在本次地震中主体结构整体倒塌,如图10所示。现场调查表明,木构架节点脱榫率高达92%,导致结构整体性显著削弱。砖砌填充墙则呈现外向散落特征,大量墙体碎块散落至周围区域,进而加剧了建筑的破坏程度。现场调查显示,建筑残骸主要来源于屋面瓦片和木檩条的解体,其中屋面构件在地震作用下发生错位和脱落,导致结构承载能力下降。砖砌填充墙虽然未直接承重,但其与砖木结构框架连接较弱,在地震作用下失稳,形成面外破坏模式。



图10 建筑B的震害

Fig. 10 Seismic damage of building B

选取位于磨西镇的SC.V2204强震台站的地震动记录,对建筑A和建筑B进行弹塑性时程分析。根据计算结果,可得到两栋建筑在地震作用下的倒塌结果及坠落物分布情况,如图11所示。

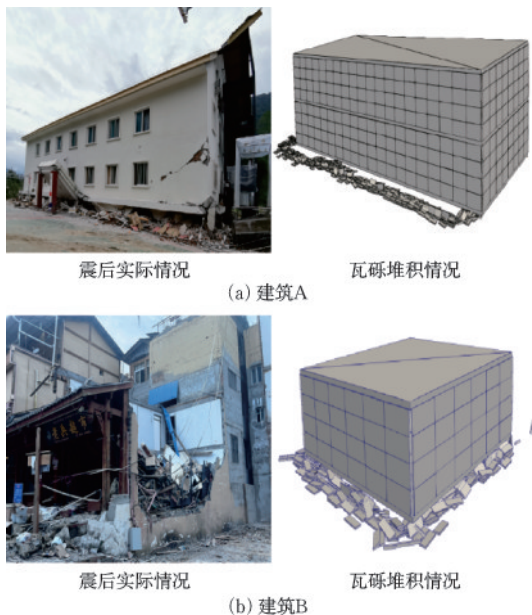


图11 建筑实地震害与坠落物模拟对比

Fig. 11 Comparison between observed building seismic damage and simulated falling debris

建筑A的模拟坠落物主要集中于西南侧,坠落物以底层结构解体产生的碎片为主,其分布特征与现场震害调查结果较为吻合。建筑B的模拟坠落物则主要分布在东南侧,呈现一定的方向性,同样与实际震害情况相符。对比模拟结果与震后调查数据可发现,该方法在考虑建筑动力响应的基础上,有效再现了震后瓦砾堆积的范围和形态,能够较为准确地模拟坠落物的空间分布特征。

3 磨西镇震后通行能力评估

3.1 地震动选取

根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)^[19],磨西镇的地震峰值加速度为 $0.4g$,反应谱特征周期为 0.45 s 。磨西镇为9度($0.4g$),选取其设防地震、罕遇地震和极罕遇地震三种工况。结合规范^[19]6.2条规定,并参考地震动参数计算方法^[20],确定不同地震影响下的峰值加速度,见表1。

对SC.V2204地震波进行了调幅,作为分析用的地震动。SC.V2204地震波的反应谱如图12所示。

表1 时程分析用的地震加速度最大值

Table 1 Peak ground acceleration values for time-history
单位: cm/s^2

设防地震	罕遇地震	极罕遇地震
392	746	1 138

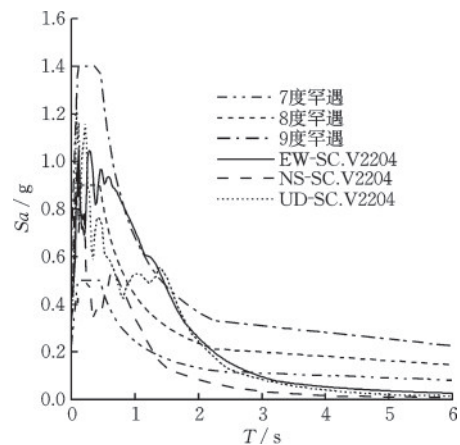


图12 SC.V2204地震动反应谱

Fig. 12 Response spectrum of SC.V2204 ground motion

3.2 不同地震下坠落物分布

3.2.1 不同地震强度下建筑坠落物范围差异

整体趋势上,随着地震作用的增强,建筑倒塌

率也逐渐升高,如图 13 所示。从结构受力角度分析,地震动增强带来更强的作用,使得建筑构件在各方向上的坠落距离发生级跃式变化,部分构件甚至出现“飞溅”偏移的现象,表现为坠落物远离建筑原址。其中,沿建筑长边方向的坠落物延展距离为 B,短边方向为 L。坠落物堆积范围的统计方法如图 14 所示。

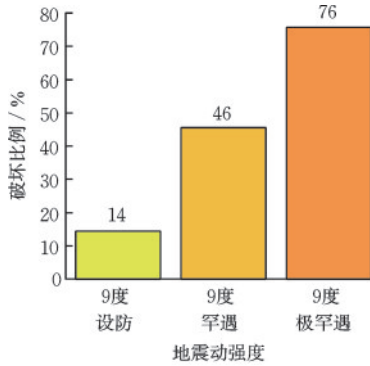


图 13 不同地震动强度下的建筑倒塌率

Fig. 13 Building collapse rates under different ground motion intensities

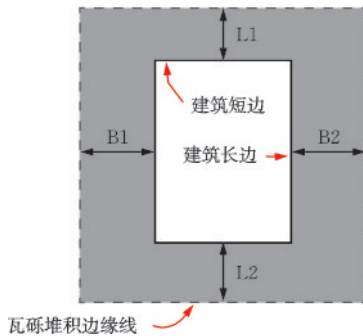


图 14 坠落物堆积范围

Fig. 14 Accumulation range of falling debris

以某栋长 14 m、宽 9.5 m 的三层砌体结构为例,在 9 度设防地震作用下,该建筑在长边方向的坠落物堆积最远距离为 9.4 m,短边方向为 4.5 m,其他方向的堆积范围均较小,见图 15(a)。此阶段地震能量尚不足以导致结构整体失稳,坠落物的分布仍具有明显的方向集中性。然而,随着地震烈度上升至 9 度极罕遇,该建筑坠落物的堆积范围显著扩大:长边方向坠落物延展至 9 m,短边方向甚至达到 16 m,见图 15(b)。在强震作用下,部分构件在脱离主结构后呈远距离散落,尤其在建筑长边方向上,其堆积范围几乎达到原建筑占地面积的两倍。

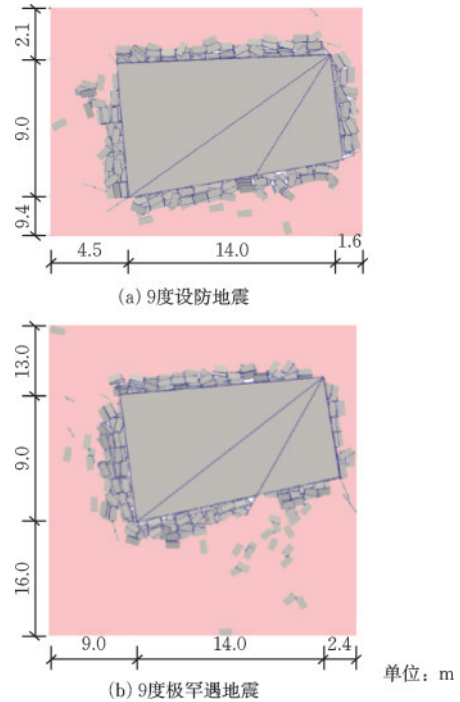


图 15 三层砌体结构坠落物堆积范围

Fig. 15 Accumulation range of falling debris from a three-story masonry structure

在不同方向上,不同建筑结构均表现出随地震烈度增强而平均坠落物堆积范围增加的趋势,如图 16 所示。其中,砖砌体结构、未设抗震措施的传统建筑以及砖木结构建筑的增长幅度尤为显著。以未设防建筑为例,其平均坠落物偏移量由 9 度设防地震下的 6.4 m 增至 9 度极罕遇地震下的 11.2 m,增长幅度达到 75%。砖砌体结构在相同烈度提升下,平均偏移量由 4.2 m 增至 9.6 m,增长幅度为 128.6%,表现出较高的地震易损性。相比之下,钢结构与钢筋混凝土结构的平均坠落物堆积范围显著较小,显示出更优的抗震性能。例如,钢筋混凝土结构在 9 度极罕遇地震下的平均偏移量为 6.5 m,仅为未设防建筑的 58.0%,且其增长幅度相对平缓,增长约 189.5%。这与其结构整体性强、构件连接牢固的特点高度一致,表明现代抗震设计能够有效减小坠落构件带来的次生灾害风险。不同结构类型在烈度增强过程中的响应差异较大。例如,砖木结构在 9 度设防地震下的平均偏移量仅为 3.4 m,但在 9 度极罕遇下骤增至 8.9 m,增长幅度高达 161.8%。这种“低起点、高增长”的响应特征表明砖木结构在中低烈度地震中具备一定韧性,但在高烈度作用下可能发生整体性倒塌,导致坠落物堆积范围急剧扩大。

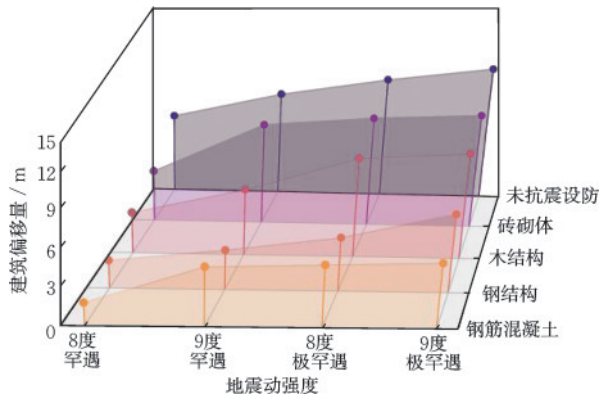


图 16 不同结构类型建筑的坠落物堆积范围

Fig. 16 Accumulation range of falling debris from buildings with different structural types

3.2.2 不同区域建筑坠落物范围差异

震害调查结果表明,建筑所处的地形位置显著影响坠落物堆积范围,导致台地边缘与中心区域存在较大差异。针对该特征,对台地边缘与中心区域的建筑分别进行调幅模拟。结果显示台地边缘建筑破坏程度明显偏重,坠落物堆积范围更大,如图 17 所示。

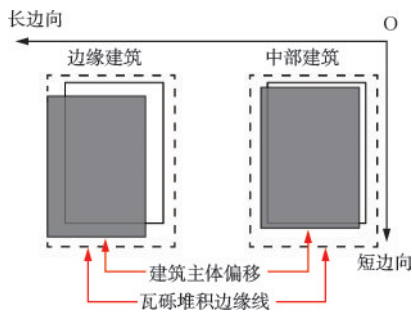
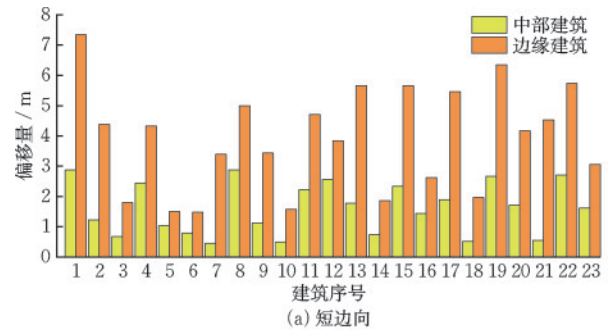


图 17 不同区域建筑倒塌

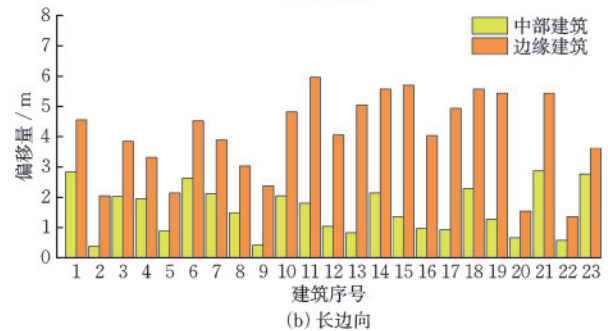
Fig. 17 Building collapse in different areas

台地边缘区域受地震动的局部放大效应影响,峰值加速度显著高于中心区域^[21]。为比较台地边缘与中部区域建筑坠落物的分布特征,本文选取了中长宽比、高度及结构类型相近的建筑样本,控制非地形因素的干扰,突出地形位置对坠落物堆积范围的影响。根据设定的筛选条件,在每类区域中共筛选出 23 栋符合要求的建筑,作为分析对象。在此基础上,对选取的建筑倒塌后构件的偏移范围进行了统计分析。分析结果表明,边缘区域建筑在震作用下,除了整体结构发生明显的位移外,倒塌产生的碎片和构件还更容易向四周扩散,尤其在建筑的短边方向表现得尤为突出,见图 18(a)。相比之

下,中部区域建筑的坠落物范围相对较小,且在各方向上更为对称和集中。边缘区域建筑在短边方向的坠落物范围普遍大于长边方向,整体偏移程度也明显高于中部区域,见图 18(b)。这一现象在体积较大的建筑中尤为明显,表现出更高的坠落物堆积范围。



(a) 短边向



(b) 长边向

图 18 建筑的坠落物堆积范围

Fig. 18 Accumulation range of falling debris from buildings

对建筑倒塌后的坠落物堆积范围进行统计分析时发现,边缘区域与中部区域建筑在各方向上均展现出不同程度的扩展特征。四个方向上坠落物堆积范围的平均值对比,见表 2。结果显示,在短边方向,边缘区域建筑的坠落物堆积范围显著高于中部区域。其中, L1 方向坠落物从 6.14 m 增至 8.83 m,扩展幅度为 43.81%; L2 方向坠落物则由 5.87 m 增至 9.32 m,增幅为 58.77%。

表 2 建筑坠落物堆积范围平均值

Table 2 Average accumulation range of falling debris from buildings

方向	堆积范围/m		差异/%
	中部建筑	边缘建筑	
L1	6.1	8.8	44
L2	5.9	9.3	59
B1	8.9	12.2	36
B2	7.1	14.2	100

这一差异表明,建筑在短边方向上更容易受到地形放大效应的影响,结构构件在倒塌过程中更可能沿该方向扩散。在长边方向上,B1方向从8.93 m提升至12.15 m,增长36.06%;B2方向由7.13 m增至14.24 m,增幅为99.72%,虽然坠落物堆积范围的绝对数值也出现增加,但扩展趋势相对温和。尽管B2方向的扩展幅度接近翻倍,但这种数值可能受个别建筑倒塌模式或二次弹射现象的影响。总体来看,边缘区域建筑在所有方向上的坠落物扩散范围均大于中部区域,说明台地的地震局部放大效应,对坠落物堆积空间产生显著影响。坠落物堆积范围的扩展不仅与地震动强度有关,也与建筑倾倒的初始方向和构件的惯性特征密切相关。部分倒塌结构在倾斜过程中受到地震动的扰动,倒塌方向发生偏移。倒塌的构件还存在多次弹跳或反向滑移的情况,使得部分区域的堆积范围被拉长。这种复杂的动力机制应在震害评估与疏散安全距离设计中予以充分考虑。

3.3 震后道路通行能力评估

在震后城镇道路通行能力评估中,倒塌建筑造成的坠落物堵塞是关键影响因素。为评估道路的堵塞程度,本文采用瓦砾堆积范围的最大值作为判据。这是因为在实际灾后情境中,即便道路仅局部被严重阻塞,也可能对整段道路的通行能力造成显著影响。坠落物侵占车道空间,削减有效通行宽度,从而干扰交通流,降低通行效率。

依据《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012)^[22]对磨西镇道路横断面布置进行判定,可知磨西镇道路为单幅路,道路横断面由7 m行车道与0.75 m双侧路侧带构成,理论值为8.5 m,如图19所示。参考《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)^[16],结合建筑偏移量与坠落物堆积宽度,获得道路剩余宽度。当坠落物未侵入行车道,道路可正常通行。根据初始宽度与剩余宽度的比例,判定道路为无堵塞、部分堵塞或完全堵塞,道路剩余宽度与道路堵塞状况的判定,见表3。

道路堵塞系数可定义为道路剩余宽度与初始宽度的比值,见式(1)。该系数用于量化道路堵塞程度,并进一步评估震后道路的通行能力。

$$f_{\text{block}} = \frac{W_r}{W_0} \quad (1)$$

式中, f_{block} 为道路堵塞系数; W_r 为道路堵塞宽度(m); W_0 为道路初始宽度(m)。

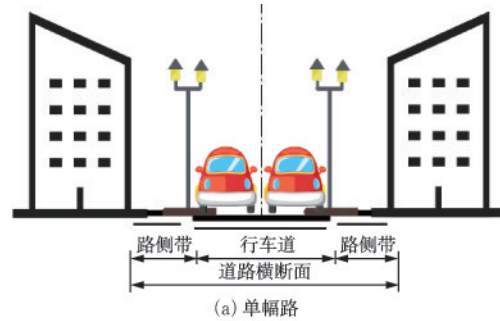


图19 磨西镇道路横断面判定

Fig. 19 Determination of road cross-sections in Moxi Town

表3 道路堵塞程度判定

Table 3 Determination of road blockage degree

道路剩余宽度/m	交通状况	堵塞类型
$[7, +\infty]$	车辆可正常双向通行	无堵塞
$[3.5, 7)$	车辆需单向交替通行	部分堵塞
$(0, 3.5)$	车辆无法通行,仅允许行人步行通过	完全堵塞

为保证模型精度,通过网络资料与实地调研获取道路长度、宽度、限速等详细信息,见表4。

表4 道路空间参数

Table 4 Road spatial parameters

参数	物理意义
道路长度	用以计算通行时间与通达能力
道路宽度	用以评估震后实际通行能力
限速	结合震害情况修正道路可通行性
通行方向	假设所有道路在正常情况下均可双向通行,以简化震后通行分析模型

构建了包含空间拓扑的道路网络,并确保网格中的各节点能够有效连通,如图20所示。以通行能力损失率作为评估指标,当堵塞系数小于等于0.18时,视为无堵塞,车辆可正常双向通行,通行能力接近设计值;当堵塞系数介于0.18~0.5时,车辆仅能单向交替通行,判定为部分堵塞;当堵塞系数大于0.5时,震后通行能力将低于每小时650当量标准小

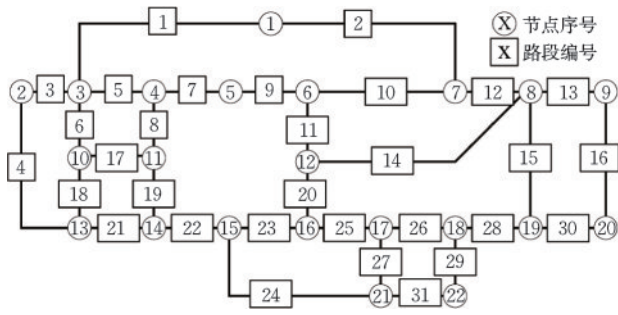


图 20 磨西镇道路网络

Fig. 20 Road network of Moxi Town

客车,该路段被认定为严重拥堵。据此分析道路网络受损特征与疏散路径可行性。对部分受损路段则根据堵塞程度调整其通行条件。

在9度设防地震动作用下,道路通行能力已出现明显下降,超过50%的路段发生堵塞。共识别出7条通行能力严重退化的路段,编号分别为9、14、17、24、27、29和31,见图21(a)。其中,路段9

的通行能力降至650 pcu/h以下,道路堵塞系数在多种地震动强度下均超过0.8,表明其受到建筑倒塌物严重堆积影响,车辆基本无法通行,交通功能完全丧失。路段14的堵塞系数为0.59,亦反映出堆积物对通行构成较大阻碍。此外,路段24和27虽然长度较短,但堵塞系数分别达到0.73和0.66,且承担连接主干道与支路的作用,极易形成交通瓶颈。

在9度罕遇地震动作用下,道路堵塞范围进一步扩大,影响区域向旧城区和建筑密集区延伸。如图21(b)所示,新增受限路段包括5、15、21和22。路段5和15位于建筑密度大、抗震性能差的区域,震后更易发生大范围坍塌,形成连续堆积带,严重阻碍通行。与此同时,路段21和22作为磨西镇横向主干道,原本交通负荷较高,且周边缺乏可替代道路资源,在震害作用下极易引发连锁性拥堵,对应急响应与物资调度造成显著影响。

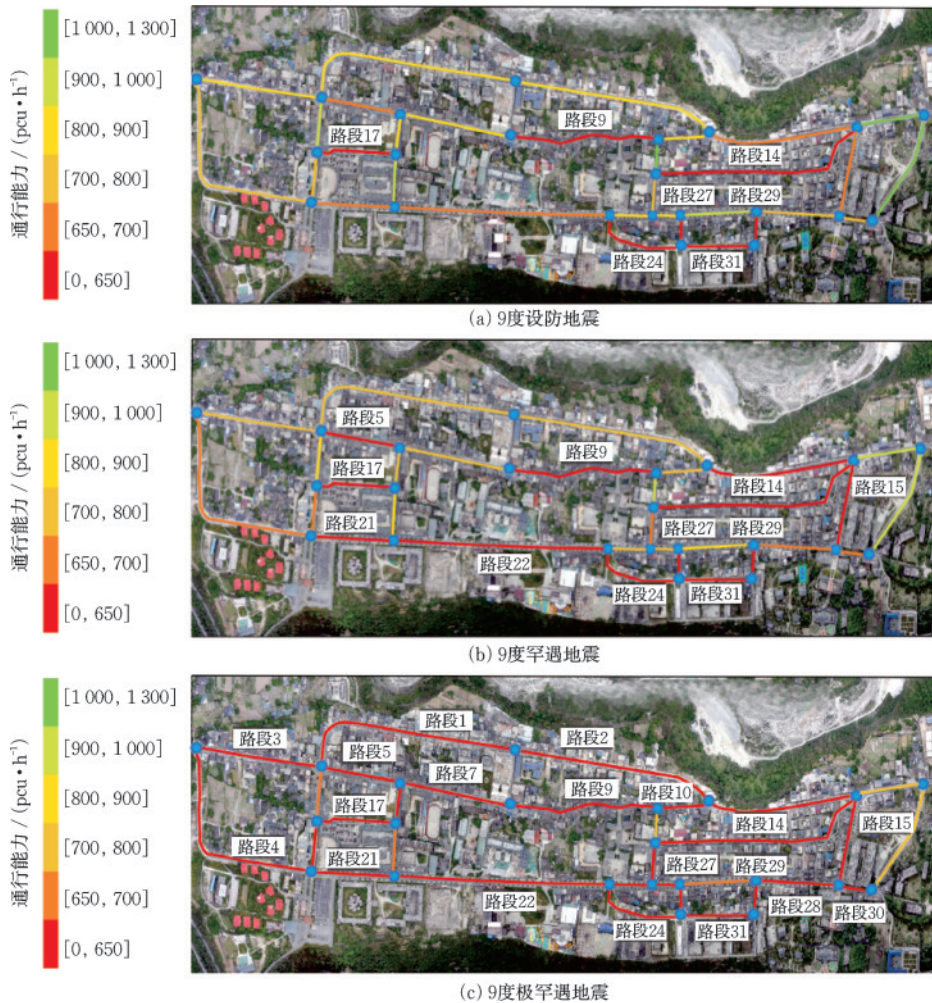


图 21 震后道路通行能力

Fig. 21 Post-earthquake road capacity

当地震烈度提升至9度极罕遇地震时,道路系统几近全面瘫痪。如图21(c)所示,道路堵塞路段占比已超过70%,无论是城镇边缘的次干道,还是核心区域的主干道,均大面积失效。大多数建筑在强震作用下发生倒塌,大量坠落物直接阻断道路,造成区域交通网络系统性崩溃。在极端情境下,道路基本丧失通行功能,严重制约震后救援、资源输送与人员疏散的效率。

4 结 论

通过对泸定6.8级地震中磨西镇的震害调查,结合建筑坠落物分布与道路网络,考虑不同地震强度对建筑震害分布的影响,分析了震后建筑坠落物对道路拥堵的影响机制,主要结论如下:

(1)数值模拟结果在建筑倒塌位置、倒塌率与坠落物分布范围等方面与震害调查具有较好的一致性,验证了基于弹塑性时程分析方法与多刚体动力学方法构建的建筑群震害模拟体系的合理性。

(2)建筑坠落物的空间分布受地震烈度、结构类型与所处区域地形影响显著。随着地震烈度的增强,坠落物覆盖范围显著增加,而不同结构类型坠落物偏移量的增长存在差异。其中,砖砌体结构和未抗震设防结构增长幅度尤为显著。台地对地震动的局部放大效应导致磨西镇边缘区域建筑倒塌更为严重,边缘区域建筑在短边方向的坠落物范围平均扩展幅度达43.81%~58.77%。

(3)坠落物对震后道路通行能力产生了显著影响。泸定地震导致部分路段出现严重拥堵,局部区域出现交通功能中断。而在9度极罕遇地震作用下,道路堵塞路段占比超过70%,道路交通基本瘫痪。震后,主干道沿线及与支路交汇的枢纽区域成为交通瓶颈,交通功能高度依赖该类关键节点的震害情况,其破坏程度直接影响主要疏散通道的畅通性与应急响应效率。

致谢:感谢四川省应急管理厅、四川省减灾委员会专家委员会、四川省住建厅、泸定县人民政府、泸定县应急管理局等单位及相关工作人员的大力支持与帮助,感谢中国地震局工程力学研究所提供强震动数据支持。

参考文献:

[1] 陈子翰, 窦爱霞, 王晓青, 等. 基于高分辨率影像的九寨沟7.0级地震道路震害评估[J]. 中国地震, 2017, 33

(4): 590-601.

Chen Z H, Dou A X, Wang X Q, et al. Assessment of road seismic damage for the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake based on high resolution image [J]. Earthquake Research in China, 2017, 33 (4) : 590-601. (in Chinese)

[2] 李廷辉, 林均岐, 刘金龙. 汶川 $M_s8.0$ 地震公路易损性研究[J]. 地震研究, 2021, 44(4): 682-688.

Li T H, Lin J Q, Liu J L. Research of high way fragility based on the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 2021, 44(4) : 682-688. (in Chinese)

[3] 杨王永, 娄世平, 刘瑞峰, 等. 地震灾区公路通行能力快速评估方法研究与应用[J]. 科学技术创新, 2021 (28): 43-46.

Yang Y Y, Lou S P, Liu R F, et al. Research and application of rapid evaluation method for highway capacity in earthquake-stricken areas[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(28): 43-46. (in Chinese)

[4] 李鑫, 李智敏, 盖海龙, 等. 青海门源 $M_s6.9$ 地震极震区震害调查与防灾建议[J]. 震灾防御技术, 2022, 17 (1): 84-94.

Li X, Li Z M, Gai H L, et al. Investigation and prevention suggestion of earthquake disaster in the extreme earthquake area of $M_s6.9$ earthquake in Menyuan County, Qinghai Province [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2022, 17(1): 84-94. (in Chinese)

[5] 刘金龙, 林均岐, 武雪宁. 四川泸定6.8级地震交通系统震害调查及分析[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(6): 25-34.

Liu J L, Lin J Q, Wu X N. Investigation and analysis of seismic damage of transportation system caused by the Luding $M_s6.8$ earthquake in Sichuan Province [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(6): 25-34. (in Chinese)

[6] 刘金龙, 林均岐, 潘毅, 等. 泸定6.8级地震交通网络应急服务能力分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42 (6): 1121-1129.

Liu J L, Lin J Q, Pan Y, et al. Analysis of emergency service capability of transportation network after Luding $M_s6.8$ earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6) : 1121-1129. (in Chinese)

[7] 杜鹏. 交通系统震害预测中瓦砾堆积问题的改进[J]. 世界地震工程, 2007, 23(1): 161-164.

Du P. Improvement for the calculating method of debris piling problem in the earthquake damage forecasting of

- the transportation system [J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(1): 161-164. (in Chinese)
- [8] 潘毅, 赖馨粤, 李明东, 等. 泸定6.8级地震某砌体结构历史建筑震害调查与分析[J]. 土木工程学报, 2025, 58(11): 54-67.
Pan Y, Lai X Y, Li M D, et al. Seismic investigation and analysis of a historic masonry structure in the M_w 6.8 Luding earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(11): 54-67. (in Chinese)
- [9] 金鹏, 钟焱宇, 梅本强, 等. 泸定地震后公路应急抢险响应及灾损评估方法[J]. 科技和产业, 2025, 25(2): 79-84.
Jin P, Zhong Y Y, Mei B Q, et al. Highway emergency rescue response and disaster damage assessment method after Luding earthquake [J]. Science Technology and Industry, 2025, 25(2): 79-84. (in Chinese)
- [10] 张乐, 陈沛, 向波, 等. 基于运动学三维模拟的山区公路崩塌灾害损伤评价及治理[J]. 地质科技通报, 2025, 44(2): 104-115.
Zhang L, Chen P, Xiang B, et al. Rockfall damage evaluation and treatment suggestions for mountain highways based on three-dimensional kinematic simulations [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 104-115. (in Chinese)
- [11] 朱孟华, 夏陈红, 郭小东, 等. 不同震害强度下山区公路通行能力及救援效率测度研究[J]. 灾害学, 2025, 40(2): 205-210.
Zhu M H, Xia C H, Guo X D, et al. Measurement of highway traffic capacity and rescue efficiency in downhill areas with different earthquake damage intensities [J]. Journal of Catastrophology, 2025, 40(2): 205-210. (in Chinese)
- [12] 段满珍, 轧红颖, 李珊珊, 等. 震害道路通行能力评估模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(5): 79-85.
Duan M Z, Ga H Y, Li S S, et al. Assessment model for traffic capacity after seismic disaster [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2017, 36(5): 79-85. (in Chinese)
- [13] 周荣贵, 钟连德. 公路通行能力手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [14] Maruyama Y, Yamazaki F, Mizuno K, et al. Fragility curves for expressway embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(11): 1158-1167.
- [15] 王鼎, 王晓文, 冯德成, 等. 基于蒙特卡洛模拟的城市道路网络地震易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3): 558-567.
Wang D, Wang X W, Feng D C, et al. Seismic fragility analysis of urban road network based on Monte Carlo simulation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 558-567. (in Chinese)
- [16] 公路工程技术标准: JTG B01—2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [17] Lin X C, Liu X Y, Hui J, et al. Assessment on detailed regional seismic damage risk of buildings based on time-history dynamic analyses [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2024, 22(6): 2903-2923.
- [18] 陈子峰. 基于物理的城市建筑群地震倒塌情景模拟方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.
Chen Z F. Research on simulation method of urban buildings collapse in earthquake scenario based on physics [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022. (in Chinese)
- [19] 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] 崔济东. GB 18306—2015地震动参数确定步骤与实例[EB/OL]. (2024-05-15)[2026-03-09]. <http://www.jd-cui.com/p=2948>.
- [21] 潘毅, 刘方琳, 陈子峰, 等. 泸定6.8级地震磨西镇建筑群震害模拟与成因分析[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(11): 22-33.
Pan Y, Liu F L, Chen Z F, et al. Simulation and analysis on damage of buildings in Moxi Town subjected to the M_w 6.8 Luding Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2025, 46(11): 22-33. (in Chinese)
- [22] 城市道路工程设计规范: CJJ 37—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

(本文编辑:张艺)