

潘毅,陈子峰,郭欣,等.积石山 6.2 级地震学校建筑典型震害特征及对人员疏散的启示[J].地震工程学报,XXXX,XX(X):000-000.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240811001

PAN Yi, CHEN Zifeng, GUO Xin, et al. Typical seismic damage characteristics of school buildings in M_s 6.2 Jishishan earthquake and implications for evacuation[J]. China Earthquake Engineering Journal, XXXX, XX(X): 000-000. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20240811001

积石山 6.2 级地震学校建筑典型震害特征 及对人员疏散的启示

潘毅^{1,2}, 陈子峰^{3,4}, 郭欣^{1,2}, 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. 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: 2023 年 12 月 18 日, 甘肃省积石山县发生 6.2 级地震。地震发生后, 对处于不同烈度区的 9 所中小学及 4 个教学点内的 15 栋框架结构和 24 栋砌体结构进行调查与分析。调查结果显示, 发生严重破坏的 12 栋建筑均为设置钢木屋架的单层砌体结构, 框架结构仅有少数发生中等破坏, 其余均为轻微破坏。在一些主体结构相对完好的学校建筑中, 非结构构件、构筑物的震害仍相对严重, 对校内师生的人生安全和疏散路径畅通造成较大影响。基于现场震害调查结果, 归纳出学校建筑及内部设施常见的破坏模式, 总结校内师生疏散路径中“房间”“走廊”“楼梯”“户外”等主要环节存在的潜在安全隐患。结合本次地震中学校校园空间中存在的潜在安全隐患, 建议可对非结构构件、设备与构筑物采取适当加固措施, 以进一步提升震后学校师生的人员安全和疏散畅通性。

关键词: 积石山地震; 震害调查; 学校建筑; 震害特征; 人员疏散; 人员安全

中图分类号: P319.09

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(XXXX)0X-0-12

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20240811001

Typical seismic damage characteristics of school buildings in M_s 6.2 Jishishan earthquake and implications for evacuation

PAN Yi^{1,2}, CHEN Zifeng^{3,4}, GUO Xin^{1,2}, 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, Harbin 150080, China)

Abstract: On December 18th, 2023, a M_s 6.2 earthquake struck Jishishan County, Gansu Province. Field investigation was conducted immediately by part of authors to evaluate the damage of 15

收稿日期: 2024-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(U2139209); 黑龙江省自然科学基金(JQ2021E006); 成都市重点研发项目(2024-YF05-00331-SN)

第一作者简介: 潘毅(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事结构工程抗震与加固研究。E-mail: panyi@swjtu.edu.cn.

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

frame structures and 24 masonry structures from 9 schools and 4 teaching points located in varying seismic intensity zones. The investigation showed that the 12 severely damaged buildings were single-story masonry structures with wood-and-steel composite trusses. Most of frames exhibited minor damage, except that a few frame structures suffered moderate damage. Additionally, despite the relative integrity of structural components in some school buildings, non-structural components and ancillary structures exhibited significant seismic damage, threatening the safety and smooth evacuation of students and teachers. The study identified seismic damage patterns within educational facilities, and summarized the potential safety hazards in evacuation routes, including "rooms", "corridors", "staircases", and "outdoor" spaces. Consequently, reinforced measures are recommended for the non-structural components, equipment, and ancillary structures in campus to achieve improved safety and faster evacuation of students and teachers.

Keywords: Jishishan earthquake; field investigation; school buildings; seismic damage characteristics; personnel evacuation; personnel safety

0 引言

学校建筑是重要的公共建筑,人员周期性聚集其中。由于教学活动对开阔空间和采光的要求,学校建筑的结构体系易在强震作用下受到不利影响。2008年汶川8.0级地震中约6 898间学校建筑倒塌,造成大量人员伤亡^[1-2];2010年玉树7.1级地震造成199名学生遇难^[3]。竖向刚度不足、结构体系单薄、整体性较差是灾区学校震害严重的重要原因^[2,4]。李巨文等^[5]统计不同结构类型学校建筑的破坏情况,并对破坏机理进行分析,发现没有抗震设计的砌体和土木建筑极易在地震中发生破坏。随着全国“校安工程”的持续推进,学校建筑的抗震能力得到明显提高。在2013年芦山7.0级地震中,汶川地震后新建或加固的房屋抗震能力表现良好^[6];在2017年九寨沟7.0级地震中,不同地震烈度区的27所学校和幼儿园中位于8度区以内的学校建筑均处于基本完好或轻微破坏状态^[7];2022年泸定6.8级地震时,学校建筑无一发生倒塌,不同地震烈度区的13所学校中绝大部分学校建筑的主体结构表现出良好的抗震能力,但非结构构件的破坏仍较为严重^[8]。

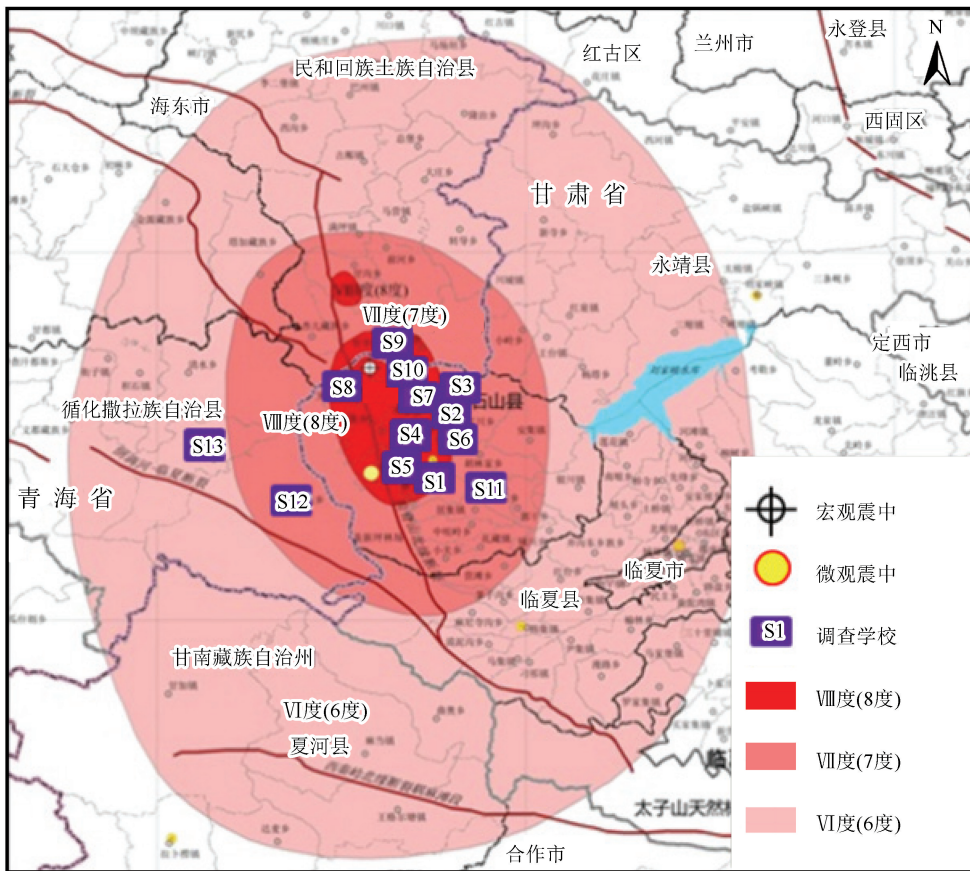
国内外震害资料表明^[3-10],随着抗震能力的提升,学校建筑的主体结构破坏相对较轻,但非结构构件的破坏、地震导致的坠落物仍可对建筑内人员安全造成严重威胁。部分坠落物还可降低疏散路径的通行效率,甚至发生阻塞^[11]。遭遇地震时人们不可避免会产生恐慌情绪,在疏散中存在盲从人流、推搡、插队等现象^[12],在疏散瓶颈处出现拥挤、踩踏的风险较高^[13]。可见疏散路径的畅通对保护师生的生命安全具有重要意义。

积石山地震后,课题组第一时间奔赴灾区现场,针对9所学校与4个教学点内的39栋不同类型的建筑物进行详细调查。本文通过整理震害调查资料,总结了此次地震中学校建筑的震害特征,并分析震害对学校建筑疏散通道可能造成的安全隐患,以期降低人员伤亡风险,特别是学生,保障学校建筑疏散路径畅通提供参考。

1 地震概况与调查范围

2023年12月18日23时59分,甘肃省临夏回族自治州积石山县发生6.2级地震。根据中华人民共和国应急管理部统计,此次地震造成甘肃和青海两省共计151人死亡,983人受伤,倒塌房屋7万间,严重损坏房屋9.9万间,一般损坏房屋25.2万间^[14]。根据应急管理部中国地震局发布的烈度图^[15],甘肃积石山6.2级地震最大烈度为Ⅷ度(8度),Ⅵ度(6度)以上区域面积为8 364 km²。在此次地震范围内,200余所学校建筑遭到不同程度的影响。幸运的是,地震发生时正值深夜,学校建筑无人员伤亡。

此次现场调研中,对甘肃省积石山县的大河家镇、徐扈家乡、柳沟乡,青海省循化县白庄镇、道帏藏族乡的学校建筑进行了震害调查,如图1所示。调查对象包括1所中学、8所小学和4个教学点,其中处于Ⅷ度(8度)区的10所,处于Ⅶ度(7度)区的2所,处于Ⅵ度(6度)区的1所。结构形式主要为砌体结构和钢筋混凝土框架结构两类,其中砌体结构学校建筑均为1层,框架结构学校建筑从1层到5层不等。调研学校的基本信息列于表1。



注:该图基于应急管理部发布的《甘肃积石山 6.2 级地震烈度图》^[15]制作,底图无修改

图 1 积石山 6.2 级地震学校科考分布

Fig.1 Distribution of scientific research in schools of Jishishan $M_s6.2$ earthquake

学校建筑震害等级根据《建(构)筑物地震破坏等级划分(GB/T 24335—2009)》^[16]确定,不同烈度区的建筑震害等级统计详见图 2。此次地震中,框架结构以轻微破坏为主,仅 3 栋位于 VIII 度区的建筑为中等破坏;砌体结构破坏相对严重, VIII 度区的 18 栋建筑中有 12 栋严重破坏,5 栋中等破坏,而在 VII 区的 6 栋建筑中有 2 栋为中等破坏,其余均为轻微破坏。

2 结构震害特征与分析

学校建筑多属常规的结构体系,其震害与一般建筑有共通之处^[17-18]。为满足学生在校期间的各项教学活动需求,学校建筑房间多为大开间、大开窗的教室。学校中多间教室一般沿建筑纵向布置,横墙饱满,而纵墙大面积开洞。洞口间墙体属于“弱脆”构件,延性较差^[19],在同等级的地震作用下更易开裂破坏。此次地震中,学校内的建(构)筑物均遭受不同程度的震害。为进一步研究学校的震害特征,分别对砌体结构、框架结构以及构筑物的震害进行

分析。

2.1 砌体结构

调研发现,灾区砌体结构学校建筑多为一层,主要由黏土砖墙作为主要承重构件,屋盖系统采用木屋盖或不上人混凝土梁板屋面,大部分砌体结构学校建筑设有圈梁等抗震设防措施。主要震害特征为:墙体破坏、屋盖破坏、吊顶破坏、女儿墙破坏等。

(1) 墙体破坏

总的来说,灾区一层砌体结构学校建筑屋面重量相对较轻,且设置了圈梁,但仍然出现大量墙体开裂的情况。这种开裂多为墙体在剪切破坏下展现的斜裂缝[图 3(a)];在屋面整体性较强的砖混结构还可能表现为楼板下水平裂缝[图 3(b)]。

由于教室对大空间的要求,砌体学校建筑横墙长度往往超过 3 m。在未设置构造柱的情况下墙体易发生面外破坏,如墙体沿竖向齿缝开裂或整体外闪等,严重者发生局部面外倾覆(图 4)。对于砖木结构,墙体倾覆后檩条易失去支撑,引起建筑局部倒塌。

表1 积石山6.2级地震学校建筑调研基本信息

Table 1 Basic information of investigated school buildings in the M_s 6.2 Jishishan earthquake

序号	学校名称	建筑物情况	结构类型	层数	学生数	设防烈度	所在区域地震烈度	破坏等级
S1	积石山县柳沟乡龚马家小学	教学楼	框架	3	143	7(0.1g)	VIII	轻微破坏
		教学楼	砌体	1				中等破坏
		食堂	框架	1				轻微破坏
		厕所	框架	1				轻微破坏
S2	积石山县柳沟乡袁家小学	教学楼	框架	3	147	7(0.1g)	VIII	轻微破坏
		食堂	框架	1				轻微破坏
		厕所	砌体	1				严重破坏
S3	积石山县柳沟乡张郭家小学	教学楼	砌体	1	37	7(0.1g)	VIII	严重破坏
		教学楼	砌体	1				严重破坏
		教学楼	砌体	1				严重破坏
		宿舍楼	砌体	1				严重破坏
		厕所	砌体	1				中等破坏
S4	积石山县柳沟乡柳沟小学	教学楼	框架	3	26	7(0.1g)	VIII	轻微破坏
		宿舍楼	砌体	1				轻微破坏
		厕所	砌体	1				中等破坏
S5	积石山县柳沟乡土门教学点	教学楼	砌体	1	2	7(0.1g)	VIII	严重破坏
		厕所	砌体	1				严重破坏
S6	积石山县柳沟乡上坪毓英希望小学	教学楼	砌体	1	10	7(0.1g)	VIII	严重破坏
		宿舍楼	砌体	1				严重破坏
		厕所	砌体	1				严重破坏
S7	积石山县柳沟乡四坝干教学点	教学楼	框架	1	9	7(0.1g)	VIII	中等破坏
		厕所	砌体	1				严重破坏
S8	积石山县大河家镇郭家教学点	教学楼	砌体	1	9	7(0.1g)	VIII	中等破坏
		厕所	砌体	1				严重破坏
S9	积石山县大河家镇保安族中学(废弃)	教学楼	框架	4	0	7(0.1g)	VIII	中等破坏
		教学楼	框架	3				中等破坏
S10	积石山县大河家镇陈家小学	教学楼	框架	3	444	7(0.1g)	VIII	轻微破坏
		宿舍楼	砌体	2				中等破坏
S11	积石山县徐扈家乡周家小学	教学楼	框架	2	44	7(0.1g)	VII	轻微破坏
		宿舍楼	砌体	1				轻微破坏
		食堂	砌体	1				轻微破坏
		厕所	砌体	1				轻微破坏
S12	循化县道韩藏族乡牙木教学点	教学楼	砌体	1	10	7(0.1g)	VII	中等破坏
		教学楼	砌体	1				中等破坏
		厕所	砌体	1				轻微破坏
S13	循化县白庄镇白庄中心小学	教学楼	框架	5	660	7(0.1g)	VI	轻微破坏
		教学楼	框架	4				轻微破坏
		宿舍楼	框架	4				轻微破坏
		食堂	框架	2				轻微破坏

为了满足采光需求,砌体学校建筑纵墙设置多个门洞与大面积窗洞,部分窗间墙跨宽度通常仅有1 m左右。在较大开洞率的影响下,墙体强度较低,且洞口间墙体高宽比较大,变形能力较差,易开裂破坏(图5)。在灾区的砖木结构中,木檩两端通常直接搭放在砖砌山墙之上,少部分使用砂浆灌注填补空隙,木檩与墙体之间接触不均匀,屋盖地震荷载难以均匀传递至墙体。在地震中,木檩与墙体发生碰撞^[20],极易使墙体因局部受力过大而破坏(图6)。

对于设置了圈梁和构造柱的砌体结构,其整体

性和变形能力通常可得到显著提升^[21],但部分灾区砖木结构构造柱与圈梁强度较低,存在圈梁混凝土脱落、构造柱随墙体一并剪切断裂等现象(图7)。

(2) 屋盖破坏

砌体学校建筑包括采用钢筋混凝土梁板屋面的砖混结构和采用木屋盖的砖木结构。砖混结构学校建筑的梁、板结构强度较高,整体性较好,震害并不明显。砖木结构学校建筑的木屋盖系统采用硬山搁檩式,中段设置钢木屋架承重以保留教室较大的使用空间,木檩架设在屋架与教室两端山墙之上(图8)。

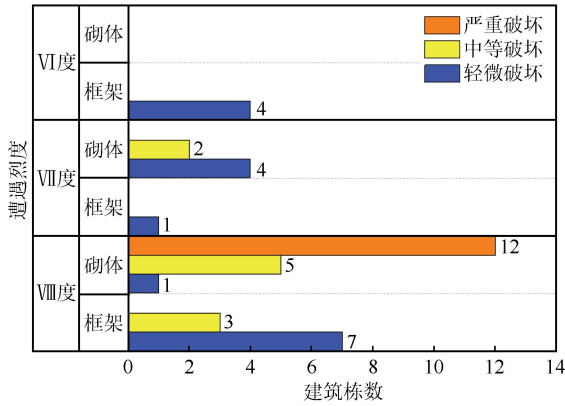


图 2 调研学校建筑的破坏等级统计

Fig.2 Seismic damage degree statistics of investigated school buildings



(a) 斜裂缝(柳沟乡, VIII度) (b) 水平裂缝(道韩藏族乡, VII度)

图 3 砌体墙剪切破坏

Fig.3 Shear failure to masonry wall



(a) 竖向沿齿裂缝(柳沟乡, VIII度) (b) 墙体外闪(柳沟乡, VIII度)



(c) 局部面外倾覆(道韩藏族乡, VII度)

图 4 砌体墙面外破坏

Fig.4 Out-of-plane failure to masonry wall



(a) 窗间墙(柳沟乡, VIII度) (b) 门窗洞口间墙体(柳沟乡, VII度)

图 5 洞口间墙体破坏

Fig.5 Damage to the wall between openings



图 6 墙体局部开裂(柳沟乡, VIII度)

Fig.6 Partial cracking to wall (Liugou town,intensity VIII)



(a) 圈梁混凝土脱落(柳沟乡, VIII度) (b) 构造柱剪切开裂(柳沟乡, VIII度)

图 7 圈梁构造柱破坏

Fig.7 Damage to ring beam and construction column



图 8 砖木结构典型屋盖系统(柳沟乡, VIII度)

Fig.8 Typical roof system of timber-and-brick structures (Liugou town,intensity VIII)

木檩与山墙缺乏可靠的连接措施,在地震中易相对滑动,存在拔出风险(图 9)。木檩上架设椽子,椽子上铺设屋面板,板上搁置平瓦,少量建筑采用泥土固定瓦片。由于瓦片与屋面板间缺乏可靠连接,在地震下极易出现溜瓦(图 10)。部分木屋盖设有砖砌正脊,正脊通常仅通过砂浆与瓦片固定在一起,并未和木檩有可靠连接,易在地震作用下脱落(图 11)。值得一提的是,柳沟乡张郭家小学砖木结构宿舍在地震中引发次生火灾并引燃木屋盖,屋盖最终燃烧后坍塌(图 12)。



图 9 木檩拔出(柳沟乡, VIII度)

Fig.9 Wooden purlins pulling out (Liugou town,intensity VIII)



图 10 溜瓦(柳沟乡, VIII 度)

Fig.10 Tiles sliding (Liugou town, intensity VIII)



(a) 端头震害(大河家镇, VIII 度) (b) 中部震害(柳沟乡, VIII 度)

图 11 砖砌正脊倾覆

Fig.11 Brick ridge overturn



图 12 屋顶坍塌(柳沟乡, VIII 度)

Fig.12 Roof collapse (Liugou town, intensity VIII)

(3) 吊顶破坏

一些砖木结构教室中还设置有吊顶。此类吊顶龙骨由木条制作而成,木条间通过铁钉连接,并直接固定在山墙或木条吊杆连接在檩条上,吊顶板则通过铁制扣件和射钉固定在木龙骨(图 13)。由于吊顶板材料材质较脆,地震中易在扣件处局部折断而导致吊顶脱落。



图 13 木龙骨吊顶破坏(柳沟乡, VIII 度)

Fig.13 Damage to ceiling with wooden keel (Liugou town, intensity VIII)

(4) 女儿墙破坏

在砌体结构学校建筑中,存在女儿墙开裂和坠落的情况(图 14)。灾区砌体结构的建筑多未设置女儿墙或仅设置约 30 cm 的现浇混凝土女儿墙用作防水收头,仅少量建筑采用砌体女儿墙。



(a) 女儿墙开裂(柳沟乡, VIII 度) (b) 女儿墙坠落(道韩藏族乡, VIII 度)

图 14 女儿墙破坏

Fig.14 Damage to parapet

2.2 框架结构

在此次地震中,框架结构的震害较轻,这是由于抗震缝、楼梯底端滑动支座、填充墙构造柱等抗震构造措施基本发挥设计预想的作用(图 15)。而框架结构内的非结构部件破坏却较为严重。震害特征主要表现为:填充墙破坏、墙体装饰面掉落、吊顶及悬挂物掉落等。



(a) 抗震缝(柳沟乡, VIII 度) (b) 楼梯滑动支座(柳沟乡, VIII 度)



(c) 填充墙构造柱(柳沟乡, VIII 度)

图 15 框架结构抗震措施

Fig.15 Seismic measures for frame structure

(1) 填充墙破坏

灾区框架结构填充墙的主要材料为空心砖砌块或加气混凝土砌块,墙顶使用黏土砖斜砌顶紧,如图 15(c)所示。随着主体结构在地震作用下出现层间变形,填充墙出现梁下水平裂缝、斜裂缝等典型开裂形式,部分填充墙发生倒塌,如图 16 所示。而对于有门窗洞口的填充墙,墙体刚度较低且应力集中在洞口边缘,墙体开裂往往更为严重[图 16(a)]。部

分洞口旁填充墙设置了构造柱和拉结钢筋,砌块即使被剪碎,墙体仍能基本维持稳定[图 16(d)]。



图 16 砌体填充墙破坏

Fig.16 Damage to masonry infill wall

(2) 墙体外饰面掉落

灾区的框架结构学校多为近年新建,有较好的装修水平,学校教室、走廊等功能分区均有瓷砖或砂浆抹灰装饰面。随着主体结构变形或填充墙开裂,墙体外饰面从粘贴薄弱处开裂脱落[图 17(a)]。部分学校建筑的抹灰层较厚,最厚可达到 3~4 cm[图 17(b)]。



图 17 墙体外饰面脱落

Fig.17 Exterior decoration of wall peeling off

(3) 吊顶及悬挂物掉落

对于框架结构学校建筑,其混凝土楼板通常设有各类功能设备,如吊顶、吊灯等,这些设备通过膨胀螺栓等方式固定。吊顶一般设置在食堂、舞蹈教室等大空间公共场所,而教室房顶管线一般相对简单,未安装吊顶。调研点框架结构学校建筑采用常见的悬挂式集成吊顶^[22],震害表现为龙骨折断和脱落、吊顶板掉落等(图 18)。除吊顶外,吊灯等属于教室常见吊装设备,也存在坠落的风险(图 19)。

2.3 构筑物

基于安全保卫需要,学校多建有围墙等构筑物。

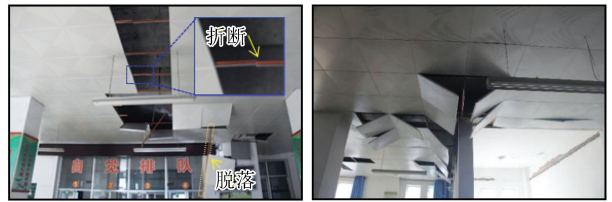


图 18 吊顶破坏

Fig.18 Damage to ceiling



图 19 吊灯脱落(柳沟乡, VIII度)

Fig.19 Damage to ceiling lamp (Liugou town,intensity VIII)

构筑物属于学校建筑的外围附属设施,在建造的过程中往往不被重视,施工质量相对较差,部分构筑物存在明显的施工缺陷。这类构筑物破坏后,除了对学校场地的使用功能造成影响外,还可能对附近人员安全造成影响。此次地震中,灾区学校的砌体围墙震害较为常见,如砌体围墙转角的剪切破坏或砂浆强度不足而沿齿缝开裂[图 20(a)、(b)];砖砌矮墙因未与围墙搭接砌筑仅使用砂浆连接,而在地震作用下脱开[图 20(c)];砖柱因未与围墙搭接砌筑而倒塌[图 20(d)];围墙局部倒塌[图 20(e)]等。其余构筑物震害还有国旗旗杆的混凝土基座开裂,如图 20(f)所示。

3 疏散通道的畅通性分析

学校建筑的疏散路径示意图 21。地震发生时,学校建筑内师生的疏散路径主要包括“室内”“走廊”“楼梯”“户外”四个环节。一层教学楼布局较为简单,并未设置走廊和楼梯,房间直通户外,则疏散路径不包含“走廊”与“楼梯”两个环节。基于调研的震害资料,整理出疏散路径四个主要环节中对人员产生影响的震害隐患清单(表 2)。其中,房间隐患 8 处,走廊隐患 5 处,楼梯隐患 3 处,户外隐患 5 处。

3.1 房间

学校建筑的房间类型较为单一,主要为教室和活动室,其次还有如办公室、阅览室、食堂等其他功能区。在学校建筑中,教室是学生活动的主要场所,为满足教学需要,往往有大量家具和浮放物品,如储



图 20 构筑物震害

Fig.20 Damage to special structure

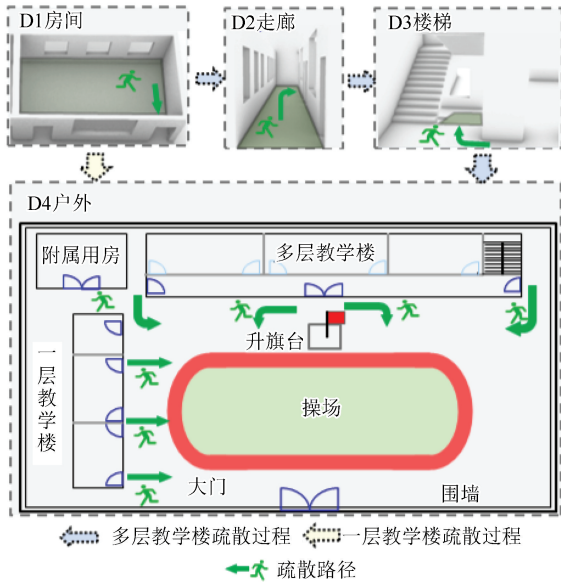


图 21 学校建筑疏散示意

Fig.21 Diagram of evacuation in school buildings

物柜、书柜等储物家具，显示屏、图书、花盆等办公或装饰用品。未固定家具和设备在地震作用下易发生滑移、倾覆^[23-24]，造成安全隐患并影响疏散道路的畅通。特别对于较为年幼的学生，身体机能较弱，大型柜体倾覆和吊装设备的坠落还将对其安全造成严重威胁。当地震作用较大时，框架结构学校建筑填充墙将发生开裂甚至倒塌，而填充墙变形也可能导致门窗随之发生损坏，例如玻璃窗户破碎、门框变形，都将对人员安全和疏散道路畅通造成威胁。本次地震中房间内引起安全隐患的典型震害如图 22 所示。

3.2 走廊

走廊为学校建筑平面交通空间的重要组成部分。它负责联系各教室、活动室等功能空间和楼梯间、建筑出入口等交通节点，是大部分师生疏散的必经之路。灾区学校建筑多为单走廊式布局，走廊两侧填充墙体均设有大面积开洞。调研发现，学校建筑走廊地面多被两侧墙体开裂后脱落的碎片与墙体外饰面所覆盖，如图 23 所示。地震时，还需警惕窗户玻璃破碎飞溅和破坏较重的填充墙体发生倾覆。

3.3 楼梯

楼梯多为多层学校建筑的主要竖向交通功能空间，是地震中学生疏散的主要通道。阻碍楼梯畅通的因素与走廊类似，主要为墙体外饰面掉落产生的碎片等(图 24)。

3.4 户外

学生抵达室外，前往空旷区域，即完成疏散。一般将学校建筑主体的出入口视为空旷区域，但也存在需绕过建筑物前往空旷区域的情况。离开建筑物出入口和在建筑物边缘绕行时，需注意坠落物对人员安全和疏散道路畅通的影响。这些坠落物包括瓦片、女儿墙、外填充墙等，倒塌的围墙亦可对疏散道路的畅通造成影响(图 25)。

4 结论与启示

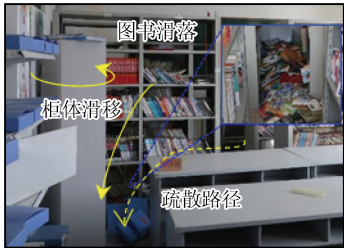
通过对此次地震灾区 13 所学校内的 15 栋框架结构和 24 栋砌体结构现场震害调研，总结了震害特征，分析了震害机理，并从师生疏散的角度，讨论震害对人员安全与疏散道路畅通的影响，得到主要结

表 2 人员疏散路径上震害隐患清单

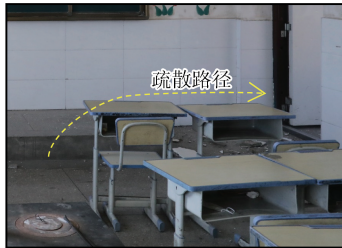
Table 2 List of seismic damage along personnel evacuation

环节	序号	隐患位置	潜在破坏	伤人	阻碍疏散	震害示例
房间	D1-1	墙体	开裂、倒塌	✓	✓	图 16
	D1-2	窗户	掉落、玻璃破碎	✓	-	图 22(e)
	D1-3	门	门框变形	-	✓	图 22(f)
	D1-4	墙体饰面	脱落	-	✓	图 22(b)
	D1-5	吊顶	掉落	✓	-	图 22(d)
	D1-6	固定设备(如灯具等)	脱落	✓	-	图 19
	D1-7	浮放家具(如书架等)	滑移、倾覆	✓	✓	图 22(a)(c)
	D1-8	浮放物品(如书本等)	掉落	-	✓	图 22(a)
走廊	D2-1	墙体	开裂、倒塌	✓	✓	图 16
	D2-2	窗户	掉落、玻璃破碎	✓	-	图 22(e)
	D2-3	栏杆	掉落	✓	-	文献[8]图 15(c)
	D2-4	固定设备(如灯具等)	脱落	✓	-	图 19
	D2-5	墙体饰面	脱落	-	✓	图 23
楼梯	D3-1	墙体	开裂、倒塌	✓	✓	图 16
	D3-2	窗户	掉落、玻璃破碎	✓	-	图 22(e)
	D3-3	墙体饰面	脱落	-	✓	图 24
户外	D4-1	地基	不均匀变形	-	✓	文献[8]图 3
	D4-2	围墙	倒塌	✓	✓	图 25(d)
	D4-3	外墙	倒塌、坠落	✓	✓	图 25(c)
	D4-4	女儿墙	坠落	✓	✓	图 25(b)
	D4-5	瓦片	坠落	✓	-	图 25(a)

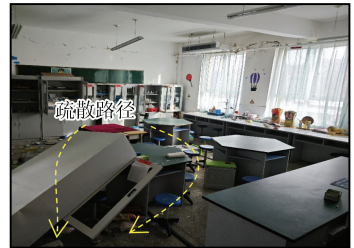
注:✓代表存在产生影响的可能,-代表不产生影响。



(a) 柜体滑移与物品滑落(柳沟乡, VIII度)



(b) 饰面坠落(柳沟乡, VIII度)



(c) 柜体倒塌(柳沟乡, VIII度)



(d) 吊顶坠落(柳沟乡, VIII度)



(e) 玻璃破碎(大河家镇, VIII度)



(f) 房门损坏(大河家镇, VIII度)

图 22 房间疏散受阻示例

Fig.22 Example of obstructed room evacuation

论和启示如下:

(1) 对不同烈度区的 39 栋学校建筑物进行调查发现,均未出现学校建筑倒塌的情况。其中,砌体结构相对框架结构的震害较重,且以单层砌体结构为主,Ⅷ度区 67%的砌体结构严重破坏;框架结构表现出较好的抗震能力,仅有 3 栋学校建筑属于中等破坏,其余均为轻微破坏。

(2) 在本次地震中,部分学校建筑的主体结构

虽无明显震害,但其非结构构件仍出现了严重破坏的情况。随着建筑抗震能力的提升,与主体结构相比,学校建筑的非结构构件和围墙的破坏相对严重,对师生的人身安全和疏散畅通造成影响。而此类构件通常并不是建筑抗震设计的重点,且设计时并未考虑其破坏对校园安全与人员疏散产生的不利影响。建议针对学校建筑中容易出现的填充墙开裂、玻璃破碎、吊顶坠落、围墙倒塌、坠落物、家具倾倒等



图 23 走廊疏散受阻示例(白庄镇, VI度)

Fig.23 Example of obstructed corridor evacuation (Baizhuang Town,intensity VI)



图 24 楼梯疏散受阻示例(柳沟乡, VIII度)

Fig.24 Example of obstructed staircase evacuation (Liugou town,intensity VIII)



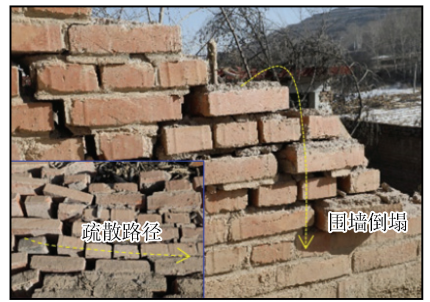
(a) 瓦片坠落物 (柳沟乡, VIII度)



(b) 女儿墙坠落 (道韩藏族乡, VII度)



(c) 外墙坠落物 (柳沟乡, VIII度)



(d) 围墙倒塌(柳沟乡, VIII度)

图 25 户外疏散受阻示例

Fig.25 Example of obstructed outdoor evacuation

现象进行进一步分析,对潜在危险非结构构件与物品进行定期检查、维护,并采取必要加固或固定措施,以进一步提升校园安全。

(3) 多层建筑的校内师生的疏散路径涉及“房间”“走廊”“楼梯”“户外”四个环节,单层学校建筑主要包括“房间”和“户外”两个环节。地震作用下,每个疏散环节均可出现隐患,考虑到中小学校的学校建筑的使用者主要为未成年学生,建议通过课程、讲座、演练等形式,提高对地震人员伤亡风险的认识与应对能力。制定应急疏散预案,进一步完善校园逃生与避难提示标志,有条件情况下可加设地震预警系统和智能疏散指示系统,以确保震时在校师生疏散有序、安全。

致谢:感谢国家应急管理部、国家防灾减灾救灾委员会、甘肃省应急管理厅、甘肃省地震局和青海省应急管理厅提供的帮助,感谢在本次震害调查过程中给予支持的各个学校!

参考文献(References)

[1] 清华大学土木工程结构专家组,西南交通大学土木工程结构专

家组,北京交通大学土木工程结构专家组,等.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(4):1-9.

Expert Group on Tsinghua University Civil Engineering Structural, Expert Group on Southwest Jiaotong University Civil Engineering Structura, Expert Group on Civil Engineering Structures at Beijing Jiaotong University, et al. Analysis on seismic damage of buildings in the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Building Structures,2008,29(4):1-9.

[2] 郭樟根,孙伟民,倪天宇,等.汶川地震中小学校建筑震害调查及抗震性能分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2009,31(1):49-54.

GUO Zhanggen, SUN Weimin, NI Tianyu, et al. Earthquake damage and anti-seismic behavior analysis of school buildings in Wenchuan earthquake[J].Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition),2009,31(1):49-54.

[3] 中国政府网.截至5月30日青海省玉树地震已造成2698人遇难[EB/OL].(2010-5-31)[2024-04-30].https://www.gov.cn/jrzg/2010-05/31/content_1617614.htm.

Gov.cn.2 698 people were killed in Yushu earthquake, Qinghai Province until May 30th[EB /OL].(2010-5-31)[2024-04-30].https://www.gov.cn/jrzg/2010-05/31/content_1617614.htm.

[4] 李碧雄,雷涛,邓建辉,等.汶川地震中学校建筑震害研究[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(3):172-179,215.

- LI Bixiong, LEI Tao, DENG Jianhui, et al. Investigation on the damage of school buildings during Wenchuan earthquake[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(3): 172-179, 215.
- [5] 李巨文, 薄景山, 卢滔, 等. 玉树 7.1 级地震学校建筑震害分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(1): 123-129.
- LI Juwen, BO Jingshan, LU Tao, et al. Seismic damage analysis of school buildings in Yushu $M_s 7.1$ earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(1): 123-129.
- [6] 王涛, 雷远德, 张永群, 等. 芦山地震中校舍建筑的震害特点与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 36-47.
- WANG Tao, LEI Yuande, ZHANG Yongqun, et al. Seismic damage analysis of school buildings in Lushan earthquake[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(3): 36-47.
- [7] 薄景山, 李孝波, 段玉石, 等. 九寨沟 7.0 级地震学校建筑震害调查与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(5): 120-128.
- BO Jingshan, LI Xiaobo, DUAN Yushi, et al. Investigation and analysis of seismic damage to school buildings in $M_s 7.0$ Jiuzhaigou earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(5): 120-128.
- [8] 谢贤鑫, 潘毅, 寇创琦, 等. 泸定 6.8 级地震学校建筑典型震害调查与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(6): 12-24.
- XIE Xianxin, PAN Yi, KOU Chuangqi, et al. Typical seismic damage investigation and analysis to school buildings in the Luding $M_s 6.8$ earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(6): 12-24.
- [9] RODGERS J, HASSAN W, MOTTER C, et al. Impacts of the 2018 $M 7.1$ Anchorage earthquake on schools[J]. Earthquake Spectra, 2021, 37(3): 1849-1874.
- [10] 潘毅, 张兰林, 林旭川, 等. 泸县 6.0 级地震城市建筑群震害模拟与震害机理分析[J/OL]. 防灾减灾工程学报, [2024-09-05]. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.20240808004>.
- PAN Yi, ZHANG Lanlin, LIN Xuchuan, et al. Simulation and mechanism analyses on damage of urban buildings subjected to $M_s 6.0$ Luxian earthquake[J/OL]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, [2024-09-05]. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.20240808004>.
- [11] LU X Z, YANG Z B, CIMELLARO G P, et al. Pedestrian evacuation simulation under the scenario with earthquake-induced falling debris[J]. Safety Science, 2019, 114: 61-71.
- [12] 高梦茹. 考虑楼梯震后通行能力的教学楼应急疏散研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2023.
- GAO Mengru. Study on emergency evacuation of teaching building considering the capacity of stairs after earthquake [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2023.
- [13] 霍非舟, 刘蒙, 吕伟, 等. 考虑儿童运动特性的小学教学楼楼梯间人员疏散研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(4): 149-155.
- HUO Feizhou, LIU Meng, LÜ Wei, et al. Research on pedestrian evacuation at staircase in teaching building of primary school considering movement characteristics of children[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(4): 149-155.
- [14] 国家防灾减灾救灾委员会办公室, 应急管理部发布. 2023 年全国自然灾害基本情况[EB/OL]. (2024-03-26) [2024-08-11]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120_475697.shtml.
- Office of the National Committee for Disaster Prevention, Reduction and Relief, Ministry of Emergency Management of People's Management of Republic of China. Basic situation of natural disasters in China in 2023 [EB/OL]. (2024-03-26) [2024-08-11]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120_475697.shtml.
- [15] 中华人民共和国应急管理部. 甘肃积石山 6.2 级地震烈度图[EB/OL]. (2023-12-22) [2024-03-26]. <https://www.cea.gov.cn/cea/xwzx/365134/5748483/index.html>.
- Ministry of Emergency Management of People's Management of Republic of China. Intensity map of Gansu Jishishan $M_s 6.2$ earthquake [EB/OL]. (2023-12-22) [2024-03-26]. <https://www.cea.gov.cn/cea/xwzx/365134/5748483/index.html>.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 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.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classification of earthquake damage to buildings and special structures: GB/T 24335—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [17] 潘毅, 陈建, 包韵雷, 等. 长宁 6.0 级地震村镇建筑震害调查与分析[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(增刊 1): 297-306.
- PAN Yi, CHEN Jian, BAO Yunlei, et al. Investigation and analysis of earthquake damage of rural buildings in Changning earthquake with $M_s 6.0$ [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Suppl01): 297-306.
- [18] 潘毅, 范元青, 任宇, 等. 芦山 6.1 级地震山区典型震害调查与分析[J]. 土木工程学报, 2023, 56(12): 35-48.
- PAN Yi, FAN Yuanqing, REN Yu, et al. Typical seismic damage investigation and analysis in mountain area after $M_s 6.1$ Lushan earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(12): 35-48.
- [19] 罗若帆, 郭迅, 阿拉塔, 等. 漾濞 6.4 级地震外廊式教学楼震害调查与分析[J]. 世界地震工程, 2021, 37(4): 53-63.
- LUO Ruofan, GUO Xun, A Lata, et al. Investigation and analysis of seismic damage to side corridor school buildings in $M 6.4$ Yangbi earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(4): 53-63.
- [20] 闫培雷, 孙柏涛, 王明振. 芦山 7.0 级地震芦阳镇的建筑物震害[J]. 土木工程学报, 2014, 47(11): 39-44.
- YAN Peilei, SUN Baitao, WANG Mingzhen. Seismic damage of building structures in Luyang Town during Lushan earthquake with a magnitude of 7.0 [J]. China Civil Engineering

- Journal, 2014, 47(11): 39-44.
- [21] 潘毅, 袁家聪, 林拥军, 等. 泸定 6.8 级地震农村居住建筑震害调查与分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(6): 1200-1214.
PAN Yi, YUAN Jiacong, LIN Yongjun, et al. Seismic damage investigation and analysis of rural residential buildings in M_S 6.8 Luding earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1200-1214.
- [22] 李戚齐, 曲哲, 解全才, 等. 我国公共建筑中吊顶的震害特征及其易损性分析[J]. 工程力学, 2019, 36(7): 207-215.
LI Qiqi, QU Zhe, XIE Quancai, et al. Seismic damage characteristics and fragility of suspended ceilings in Chinese public buildings[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(7): 207-215.
- [23] 潘毅, 彭鑫, 王腾, 等. 泸定 6.8 级地震医疗建筑震害调查与分析[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(5): 14-29.
PAN Yi, PENG Xin, WANG Teng, et al. Seismic damage investigation and analysis of hospital buildings in M_S 6.8 Luding earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(5): 14-29.
- [24] 陈子峰, 林旭川, 陆新征, 等. 6.4 级漾濞地震某 RC 框架及其非结构部件震害分析[J]. 工程力学, 2024, 41(1): 138-148.
CHEN Zifeng, LIN Xuchuan, LU Xinzheng, et al. Analysis on damage of a RC frame and its non-structural components in the M_S 6.4 Yangbi earthquake[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(1): 138-148.

(本文编辑: 张向红)