DOI: 10.7672/sgjs2025180037

定日 6.8 级地震公共建筑震害调查与分析*

来朝辉[1,2],李明隽[1,2],白　暘[1,2],段　盟[1,2]
(1. 陕西省建筑科学研究院有限公司,陕西　西安　710082;
2. 陕西省建筑工程质量检测中心有限公司,陕西　西安　710082)

[摘要] 西藏日喀则市定日县地处喜马拉雅地震带,地震活动频繁,公共建筑的抗震性能对保障人员安全及灾后功能恢复至关重要。2025 年定日 6.8 级地震发生后,研究团队对震区 52 栋公共建筑(34 栋砌体结构、18 栋框架结构)展开震害调查,结合现场数据与分析,揭示了高海拔地区公共建筑的震害特征。结果表明:按现行规范设计的建筑主体结构表现良好,未发生倒塌,多数为轻微损伤,验证了“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设防目标。砌体结构破坏集中于墙体开裂和女儿墙倒塌;框架结构则以非结构构件破坏为主,包括填充墙裂缝、楼梯间损伤及吊顶和抹灰层破坏。研究特别指出,高原环境对材料性能与施工质量的影响显著,砌体砖尺寸偏差、砂浆不饱满、构造措施不足等问题显著影响了结构抗震能力。基于震害调查结果,建议高原地区需完善相关地方标准,加强非结构构件抗震核查,推广减隔震技术,并针对既有建筑开展定期隐患排查,以实现高原地区公共建筑安全性和功能韧性的提升。

[关键词] 地震;震害调查;公共建筑;砌体结构;框架结构
[中图分类号] TU746;P315.9　　[文献标识码] A　　[文章编号] 2097-0897(2025)18-0037-09

Earthquake Damage Investigation and Analysis of Public Buildings in Dingri M_S 6.8 Earthquake

LAI Zhaohui[1,2], LI Mingjun[1,2], BAI Yang[1,2], DUAN Meng[1,2]
(1. *Shaanxi Architecture Science Research Institute Co.,Ltd., Xi'an,Shaanxi* 710082, *China*;
2. *Shaanxi Construction Engineering Quality Testing Center Co.,Ltd., Xi'an,Shaanxi* 710082, *China*)

Abstract: Dingri County in Shigatse City, Tibet Autonomous Region, is located in the Himalayan seismic zone with frequent earthquake activity. The seismic performance of public buildings is crucial for ensuring personnel safety and post-disaster functional recovery. Following the 2025 Dingri M_S 6.8 earthquake, a research team conducted a earthquake damage investigation on 52 public buildings (34 masonry structures and 18 frame structures) in the earthquake-affected area. By integrating field data and analysis, the study revealed the earthquake damage characteristics of public buildings in high-altitude regions. The results show that the buildings designed according to current codes perform well, with no collapses and most sustaining minor damage, validating the seismic fortification objective of “no collapse under minor earthquakes, repairable damage under moderate earthquakes, and life safety under major earthquakes.” Masonry structures primarily exhibited wall cracking and parapet collapse, while frame structures suffered mainly non-structural component damage, including infill wall cracks, stairwell damage, and ceiling or plaster layer failures. The study highlights that the high-altitude environment significantly impacts material properties and construction quality, with the issues such as brick size deviations, insufficient mortar filling, and inadequate structural detailing markedly reducing seismic capacity. Based on the findings, the recommendations include refining local standards for high-altitude regions, enhancing seismic checks for non-structural components, promoting seismic isolation and energy

*陕西省“两链”融合重点研发计划(2022LL-B-12);陕西省省级国有资本经营预算科技创新专项资金项目(ZXZJ-2024-015)
[作者简介] 来朝辉,硕士,高级工程师,E-mail: 13861986@qq.com
[收稿日期] 2025-07-11

dissipation technologies, and conducting regular safety inspections of existing buildings to improve the safety and functional resilience of public buildings in plateau areas.

Keywords: earthquake; earthquake damage investigation; public buildings; masonry structures; frame structures

0 引言

西藏日喀则市地处青藏高原南部,位于全球三大地震带之一的地中海-喜马拉雅地震带上,具有复杂的地形地貌,由于印度和欧亚板块的持续碰撞,强震发生频率高。日喀则地区及附近区域自有地震记录以来,共发生 8 级以上强震 3 次,即 1411 年当雄西南一带 8 级地震、1833 年聂拉木 8 级地震和 2015 年尼泊尔 8.1 级地震,造成大量人员伤亡和财产损失[1]。

学校、政府办公楼等公共建筑作为城乡功能体系的核心载体,具有显著的社会功能属性。这些场所人员流动性强且密度大,其结构安全性至关重要,需予以重点关注。此外,部分公共建筑还承担着应急避难、灾后救援等关键功能,其震后功能性也不容忽视。为掌握公共建筑在地震中的震害特征,相关学者进行了大量调查与分析。郭樟根等[2-3]调查了 2008 年汶川地震后公共建筑震害情况,分析了建筑严重损坏和倒塌原因,并给出了相应建议。汶川地震后,国务院启动了“全国中小学校舍安全工程”,投入大量资金对中小学校舍进行抗震加固,使其达到重点设防类抗震设防标准。王玉梅等[4]对 2013 年四川芦山地震后医疗建筑震害展开调查,指出 2008 年后兴建的框架结构抗震能力得到很大改善和提高。薄景山等[5]评估了 2017 年九寨沟地震后学校的破坏等级,指出经抗震设计的学校可较好地抵御地震灾害。李昆等[6]分析了 2021 年云南漾濞地震混凝土框架公共建筑砌体填充墙和吊顶等非结构构件的震害特征。潘毅等[7]分析了 2022 年四川泸定地震后医疗建筑的震害特征并得出结论,即采用隔震技术的医疗建筑结构性能良好。王多智等[8]、黄锐等[9]、潘毅等[10]对 2023 年青海积石山地震后学校、医院等公共建筑进行了震害调查分析。

上述研究揭示,在经历 2008 年汶川地震中大量公共建筑倒塌的惨痛教训后,我国公共建筑领域经历了从抗震设计、减隔震设计到建筑非结构构件安全和功能恢复等方面的逐步发展。笔者所在团队通过对地震灾区公共建筑物现场实地调查,获取了翔实震害资料并进行了进一步分析,为我国高海拔地区建筑抗震能力提升提供了有力的数据支持。

1 地震概况

北京时间 2025 年 1 月 7 日 09:05,西藏日喀则市定日县发生 6.8 级地震,震源深度 10km,震中位于北纬 28.50°、东经 87.45°,震中 10km 范围内平均海拔约 4 471.000m。此次地震震中距措果乡政府驻地约 3km,距曲洛乡政府驻地约 14km,距长所乡政府驻地约 16km。自 1900 年以来,该地区 50km 范围内 3.0 级及以上地震共发生 40 次,其中 6.0~6.9 级地震 2 次,此次地震为该区域有历史记录以来的最大地震[11]。截至 1 月 20 日 10:00,震区附近共记录到 5 396 次余震,其中 4.0 级以上余震 12 次,最大余震为 5.0 级[12]。

根据中国地震局工程力学研究所的观测,距震中 67.5km 烈度仪 D0007 记录到东西、南北、垂直 3 个方向的地震加速度反应谱如图 1 所示[13],该地震动记录的 3 个分量产生的拟加速度值远大于 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》(2016 年版)[14]的 7 度设防标准,其中南北与东西方向的地震动加速度反应谱在 0.1~0.4s 高于 8 度罕遇地震对应的谱值,南北方向在 0.2s 时高于 9 度罕遇地震对应的谱值。

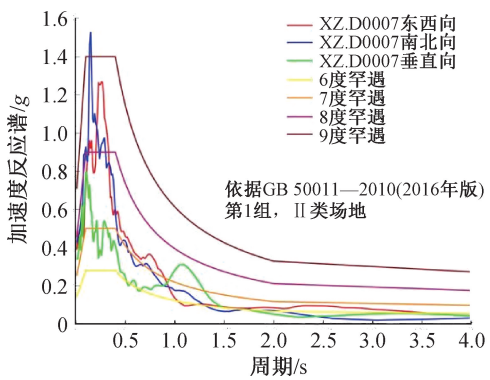


图 1 拟加速度反应谱与规范设计谱对比

Fig. 1 Comparison of pseudo acceleration and code design response spectra

根据《建筑抗震设计规范》(2016 年版)[14],日喀则市桑珠孜区、南木林县、江孜县、定日县、萨迦县、白朗县、吉隆县、萨嘎县、岗巴县抗震设防烈度为 7 度(0.15g),拉孜县、定结县、亚东县抗震设防烈度为 8 度(0.20g)。震后,应急管理部发布了地震烈度图,最高烈度为 9 度。其中,9 度区面积约 411km^2,主要涉及定日县长所乡、曲洛乡等 5 个乡

镇;8 度区面积约 869km^2,主要涉及拉孜县芒普乡、定日县曲洛乡及长所乡、定结县郭加乡等 8 个乡镇;7 度区面积约 5 350km^2,主要涉及 20 个乡镇[15]。

虽然西藏地区人口密度较小,有大量无人区,但此次地震发生区域人员密度相对较大,截至 1 月 8 日 12:00,定日县地震已造成 126 人遇难、188 人受伤[16]。在地震发生后,笔者所在团队对拉孜县拉孜镇及芒普乡的 52 栋公共建筑进行了现场调查与应急评估,共计约 22 000m^2,其中 65.4%为砌体结构,34.6%为框架结构。调查结果表明,尽管所调查区域地震烈度为 7 度及 8 度,公共建筑震害整体上仍较轻,4%的建筑严重破损,73%的建筑轻微损坏,23%的建筑基本无损坏。多数建筑为非结构构件损伤,未见倒塌建筑。

2　公共建筑震害特征与分析

本次调查的 52 栋公共建筑中,34 栋为砌体结构,18 栋为框架结构。同时,调查发现,5 栋建筑主体外建造了钢框架阳光房,供使用者在天气寒冷时使用。本文从所调查建筑物结构类型出发,对其地震后损伤情况及特征进行分析。

2.1　砌体结构

由于造价低、施工简便等特点,砌体结构在此次地震区域得到广泛应用。本次调查的砌体结构建筑共 34 栋,其中 28 栋为单层建筑,6 栋为 2 层及 3 层建筑。多数建筑建造于 2010 年后,仅有 2 栋建筑建造于 1990—2000 年。在抗震设计方面,25 栋建筑设置有圈梁构造柱,在此次地震中并未发生严重损坏,具有良好的抗倒塌能力。

在砌体材料方面,受所在地区原材料限制,本次所调查建筑大多采用如图 2 所示混凝土砌块砖。该类砖尺寸略大于普通烧结砖,约为 280mm×120mm×80mm,且不同建筑间砖尺寸偏差较大。所检测建筑墙厚主要为 280,400mm。同时,所用砌体砖材料均匀性较差,部分砖内有大粒径骨料,导致建筑同一面墙内砌体转的抗压强度、抗拉强度等力学性能不一致,从而引起结构整体强度不稳定。

图 2　混凝土砌块砖

Fig. 2　Concrete masonry block

在屋面形式上,多采用混凝土预制板及混凝土现浇板,部分修建于 2000—2010 年的单层砌体结构采用如图 3a 所示单坡木屋面,为硬山搁檩式构造,木梁直接搁置在横墙上,木屋面板上覆铁皮。此种结构形式结构简单,施工方便,具有良好经济性,但其隔热、保温性能较差,且木梁与横墙的连接不足,影响整体结构稳定性。同时,部分阳光房采用图 3b 所示钢框架玻璃屋面。

a 硬山搁檩式屋面　　b 钢框架屋面

图 3　单坡木屋面与玻璃屋面

Fig. 3　Single slope wood roof and glass roof

2.1.1　结构构件破坏

在所调查的公共建筑中,砌体结构构件破坏主要为墙体开裂、门窗洞口裂缝、纵横墙脱开、屋面破坏等。

1)墙体开裂

墙体开裂形态主要为水平裂缝、斜裂缝、阶梯形裂缝。水平裂缝主要产生在楼层墙顶与楼层中部,如图 4 所示。水平裂缝的形成通常可归结为 3 个原因:①当地震动峰值过大时,墙体在瞬间受到过大剪切力,发生滑移现象;②砂浆强度不足,砂浆层的抗剪力无法有效抵御水平地震力,从而引发剪摩破坏;③当地震作用方向与墙体垂直时,作为主要抗侧力构件的纵墙可能因承载力不足而发生破坏,进而产生水平裂缝[17]。

a 墙顶　　b 中部

图 4　水平裂缝(砌体结构)

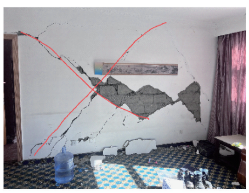
Fig. 4　Horizontal cracks(masonry structures)

斜裂缝为砌体结构墙最常见的破坏形式,其产生原因主要是墙体的抗剪强度不足,主拉应力超过砌体的抗拉强度所致。裂缝沿主拉应力方向发展,属于剪压破坏[17]。主要裂缝形态有单向斜裂缝、八字形裂缝、“X”形裂缝等,如图 5 所示。

阶梯形裂缝为在墙体受到水平地震作用时砂

a 单向斜裂缝1

b 单向斜裂缝2


c “X”形裂缝

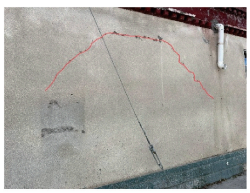

d 八字形裂缝

图 5 斜裂缝(砌体结构)

Fig. 5 Diagonal cracks(masonry structures)

浆强度不足所引起,阶梯形沿灰缝裂缝如图 6 所示。

图 6 阶梯形裂缝

Fig. 6 Stepped cracks

研究表明,砌体抗剪强度受砂浆强度影响很大,且随砂浆强度提高而提高[18]。在本次震害调查过程中发现,砂浆强度较低、不饱满使砌块间黏结力不足,降低了墙体的抗剪承载力(见图 7),这成为建筑结构构件严重损坏的主要原因之一。

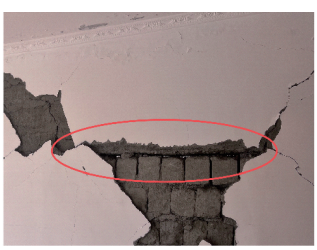


图 7 砌体墙砂浆不饱满

Fig. 7 Unfilled mortar for mortar wall

2)门窗洞口裂缝

由于墙体开洞所形成的角部易产生应力集中,开洞引起的墙体截面减小形成了刚度突变,同时在洞口处未合理设置构造措施。因此,开洞墙体在地震作用下易发生开裂,裂缝一般由洞口角部延伸,如图 8 所示。

3)纵横墙脱开

如图 9 所示,芒普乡政府阳光棚在纵横墙连接处,施工时咬槎砌筑不到位,缺乏足够的拉结,同时未设置圈梁构造柱,建筑物整体性不足,在地震作用下出现纵横墙脱开现象。

a 门洞口

b 窗洞口

图 8 门窗洞口裂缝

Fig. 8 Cracks around door and window openings

图 9 纵横墙脱开

Fig. 9 Separation at orthogonal wall intersections

4)屋面破坏

对于混凝土预制与现浇板屋面,其强度高且整体性强,在所调查的建筑中未见出现破坏。而木屋面具有自重小的特点,受地震作用影响较小,在所调查的建筑中基本保持完好。调查发现,芒普乡小学原教工宿舍建造于 20 世纪 90 年代,采用了木板檩条和自拌混凝土屋面。此屋面自重较大,且屋面与墙缺乏可靠连接,在地震作用下出现屋面倒塌,如图 10 所示。

a 破坏 1

b 破坏 2

图 10 屋面破坏

Fig. 10 Roof damage

2.1.2 非结构构件破坏

砌体结构非结构构件破坏主要为女儿墙倒塌、山墙上端开裂、散水开裂。

1)女儿墙倒塌。在历次强震中,女儿墙作为典型非结构部件均有震害案例。在地震作用下,无拉结砖砌女儿墙作为悬臂构件,易发生面外失稳破坏[19]。如图 11 所示,芒普乡政府 1 层平房构造柱

上端和女儿墙缺少稳固连接,且未设置现浇混凝土压顶梁,导致女儿墙稳定性不足,发生整体倒塌,掉落的砖砌体使下方车棚发生坍塌。如图 12 所示,悬挑上部与下部连接不可靠,在地震作用下发生整段倒塌。

a 女儿墙　　b 车棚

图 11　女儿墙与车棚垮塌

Fig. 11　Parapet wall and car shed collapse

图 12　悬挑上部倒塌

Fig. 12　Upper cantilever collapse

2)山墙上部开裂。对于硬山搁檩式构造的单坡木屋面建筑,其山墙突出屋面,与周边女儿墙未形成封闭整体,成为悬臂构件,且与下部墙体和构造柱缺乏可靠连接,如图 13 所示。在地震水平力作用下,山墙上端与墙体连接处抗剪能力不足,出现如图 14 所示裂缝。

图 13　山墙上端连接不可靠

Fig. 13　Inadequate connections at gable wall tops

3)散水开裂。当地基土质较松散时,在地震作用下易产生土体开裂或挤密沉降破坏,地基基础易发生不均匀沉降,进而引起散水开裂,如图 15 所示。

2.2　钢筋混凝土框架结构

框架结构开间布置灵活,且其结构延性强、整体性好,具有良好的抗震性能,多用作学校教学楼和政府办公楼等公共建筑。本次调查共有 18 栋框架建筑,均设计建造于 2010 年后,经过正规设计与

图 14　山墙上端水平开裂

Fig. 14　Horizontal cracking at gable wall tops

图 15　散水开裂

Fig. 15　Apron cracking

施工。这些建筑在此次地震中表现出较好的抗震性能,主体结构无严重破坏,损坏形式主要有填充墙开裂、楼梯板开裂、吊顶破坏、抹灰破坏等。

1)填充墙开裂

在历次地震中,钢筋混凝土框架结构填充墙破坏现象非常普遍。尽管填充墙可提高框架结构的初始刚度和侧向承载力[20],但由于其材料强度变异性大,且破坏模式为脆性破坏,抗震性能不宜预测,因此在《建筑抗震设计规范》(2016 年版)[14]中将填充墙考虑为非结构构件,仅由框架结构承受水平和竖向荷载。填充墙的失效机理包括纯弯曲失效、水平裂缝、对角斜裂缝、多层接缝处滑移和平行对角斜撑[21]。在本次调查中框架结构均出现填充墙开裂现象。主要裂缝形态有水平裂缝、竖直裂缝、斜裂缝、洞口角部裂缝等。

水平裂缝主要出现在墙底部和墙顶部,如图 16 所示。其中,填充墙顶与框架梁底交接处开裂是最常见的裂缝形态,所调查含填充墙框架结构均发生此类开裂。部分建筑 75%以上填充墙出现此类裂缝。竖直裂缝主要出现在填充墙与框架柱连接处,如图 17 所示。

此类裂缝出现原因主要为框架结构与填充墙刚度不同,在承受水平地震作用时,连接处首先出现破坏。同时,在调查中发现,部分填充墙顶部未采用斜砌,且灰缝不密实。图 18a 所示填充墙采用斜砌砌筑,灰缝填充密实,在地震后未出现明显裂缝;图 18b 所示填充墙砌筑不符合要求,且未进行填

a 墙底部 b 墙顶部

图 16 水平裂缝(框架结构)

Fig. 16 Horizontal cracks(frame structures)

a 裂缝 1 b 裂缝 2

图 17 填充墙与梁、柱连接处裂缝

Fig. 17 Cracks at the connection among infilled wall and beam, column

充,在地震后发生破坏,部分砌块掉落。

a 符合要求 b 不符合要求

图 18 墙顶砌筑

Fig. 18 Masonry on the top of the wall

斜裂缝主要包括梁下斜裂缝和“X”形交叉斜裂缝,开裂原因主要为地震水平作用超过墙抗剪承载力。如图 19a 所示,在地震发生时,框架梁上水平力直接作用在墙右上角,导致填充墙出现剪切型裂缝。如图 19b,19c 所示“X”形交叉裂缝则为填充墙发生了双向剪切破坏,填充墙通过自身变形及开裂消耗大量地震能量,增强了结构整体延性。在墙体开洞区域,截面改变使得该部分墙刚度减小,在洞口角部也易出现应力集中现象,因此出现如图 19d,19e 所示从角部发展的裂缝。若截面改变处砌块强度不足,便会出现图 20 所示窗洞口墙破坏。

图 20 窗洞口墙破坏

Fig. 20 Wall damage at the window opening

值得注意的是,在所调查的建筑中,多数裂缝产生原因为砂浆强度不足及拉结措施不完善。同时,并未出现填充墙平面外倾斜和整体倒塌现象。

2)楼梯间裂缝

楼梯作为关键逃生通道,须满足相应的通行和疏散功能。本次调查中发现,近年新建建筑采用了楼梯滑动支座。相对于两端刚接的传统楼梯,滑动支座处可视为铰接,在地震发生时释放弯矩和水平力,避免楼梯发生破坏[22]。如图 21 所示,此次地震作用下楼梯支座处发生滑动并出现裂缝,而楼梯板结构保持完好,说明抗震构造措施发挥了预期作用。除此之外,调查得到楼梯板和填充墙连接处易出现裂缝,如图 22 所示。楼梯间墙体开裂原因包括:楼梯构件增加了楼梯间刚度,使其分配到的地震作用较大;楼梯间墙体高度较大且无楼板支撑约束;楼梯踏步嵌入墙体削弱了墙体截面等[7]。

a 2层楼梯 b 3层楼梯

图 21 楼梯滑动铰支座开裂

Fig. 21 Cracking in sliding hinge supports of staircases

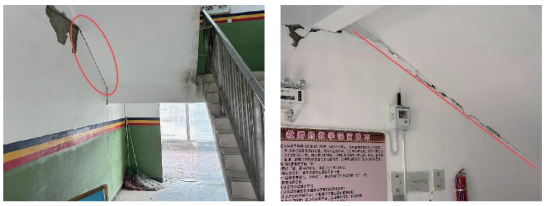
3)吊顶破坏

近年来历次地震中吊顶为震害较严重的一类

a 梁下填充墙裂缝 b 窗间墙“X”形裂缝 c 填充墙“X”形裂缝 d 窗洞口角部裂缝 e 门洞口角部裂缝

图 19 斜裂缝(框架结构)

Fig. 19 Diagonal cracks(frame structures)



a 裂缝1　　b 裂缝2

图 22　楼梯板与填充墙连接处裂缝

Fig. 22　Cracks at the connection between stair slab and infilled wall

非结构构件[8]。此次调查中发现,芒普乡政府活动中心采用的间接悬挂式吊顶在地震后出现龙骨变形及吊顶板坠落(见图 23)。而在芒普乡政府办公楼中,尽管设置了竖向撑杆,但仍出现龙骨折断、吊顶板大部分坠落的震害(见图 24)。因此,此类吊顶板抗震构造有待进一步研究。

a 龙骨变形　　b 龙骨折断

图 23　吊顶震害(芒普乡政府活动中心)

Fig. 23　Ceiling earthquake damage

(Mangpu Township Government Activity Center)

a 1层处破坏　　b 2层处破坏

图 24　吊顶震害(芒普乡政府办公楼)

Fig. 24　Ceiling earthquake damage

(Mangpu Township Government Office Building)

4)抹灰破坏

所调查区域框架结构教学楼多为近年新建,装修水平较好,随着地震中填充墙变形或开裂,其墙体抹灰饰面从粘贴力不足之处开裂并脱落,如图 25 所示。抹灰破坏不仅可能造成人员伤亡,还易引起走廊等逃生通道正常使用,并影响建筑的震后使用功能恢复。

2.3　钢框架阳光房

西藏地区具有日照强的特点,部分建筑在主体结构外建造有阳光房,供使用者在天气寒冷时进行

a 外部　　b 内部

图 25　抹灰破坏

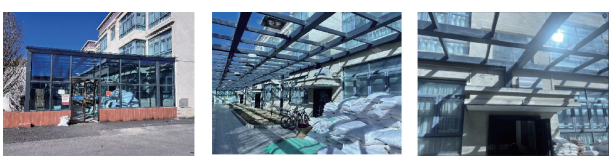
Fig. 25　Plastering damage

使用,如图 26,27 所示。此类阳光房多采用钢框架作为支撑,玻璃作为屋面材料。其结构自重较小,在震害调查中未发现其发生较大损坏。值得注意的是,阳光房多为在主体结构上加建而成,并未经过系统设计,也未充分考量其对主体结构可能产生的影响。如图 26c 所示,其钢桁架搭置在外墙凸起处,未见其与墙体有可靠锚固措施。此外,如图 27c 所示,阳光房的钢柱直接支承在雨棚上,此种结构布置方式给雨棚带来额外荷载。

a 外部　　b 内部　　c 局部

图 26　阳光房(芒普乡小学教工之家)

Fig. 26　Steel-framed sunroom (Faculty Lounge, Mangpu Township Primary School)



a 外部　　b 内部　　c 局部

图 27　阳光房(拉孜县政府大院)

Fig. 27　Steel-framed sunroom (Government Compound, Lhatse County)

尽管在此次地震调查中未见阳光房及主体建筑出现明显破坏现象,但从结构安全和长期使用的角度出发,后续必须对阳光房及其与主体建筑的连接部位进行全面现场核查与计算评估。

3　结语

通过对本次日喀则市定日 6.8 级地震震害调查分析,得出以下结论与建议。

1)本次调查了日喀则市的 52 栋公共建筑,其中 18 栋位于拉孜县拉孜镇,实际地震烈度为 7 度;

34 栋位于拉孜县芒普乡,实际地震烈度为 8 度。所调查地区抗震设防烈度为 8 度,所调查建筑未发生倒塌,极少数建筑严重损坏,多数建筑轻微损坏或无损坏,说明按抗震规范设计并保证施工质量的建筑能较好抵御地震作用,实现“小震不坏,中震可修,大震不倒”的设计目标。同时,按抗震规范设计的砌体结构相比于框架结构,具有损伤小、抗震性能好的优势。

2)砌体结构的主要破坏形式为墙体开裂。破坏原因包括砂浆强度不足、砌体材料均匀性差、施工质量缺陷(如灰缝不饱满、咬槎砌筑不到位)及未设置圈梁构造柱等抗震措施。同时,部分非结构构件(如女儿墙、山墙)不满足规范设计要求,仍存在较大面外失稳风险,应对相关建筑构件展开普查。

3)钢筋混凝土框架结构主体未发生破坏,采取合理抗震构造措施(填充墙顶斜砌、楼梯滑动支座等)能显著提高建筑物的抗震能力。但所调查建筑填充墙开裂现象普遍,包括水平裂缝、斜裂缝、洞口角部裂缝等,极大地影响了建筑的后续使用。在新建建筑中,应考虑选用变形能力大的填充墙、隔墙或柔性连接填充墙。此外,吊顶、抹灰层等构件的破坏也对建筑功能恢复和人员安全构成了威胁,结构抗震设计和加固改造应进一步关注此类构件抗震问题。

4)钢框架阳光房得益于其轻质特性,在本次地震中未发现显著结构损伤,但其多未经系统化结构设计,存在潜在结构安全隐患。建议对已有阳光房进行全面核查评估,并研究制定适用于高寒、高烈度地区的轻型附属阳光房结构设计、施工与加固的地方性技术导则或标准图集。

5)高海拔地区特有的低温、缺氧环境对建筑材料性能和施工工艺提出特殊要求。针对此次地震中展现出砌体材料、砂浆材料及施工工艺等问题,亟待制定适应高原气候相关地方标准,并对高原环境下材料耐久性提升展开相关研究。同时,加强对非结构构件抗震审查,定期开展公共建筑隐患排查,尤其对学校、医院等人员密集场所实施动态评估。

6)已有研究表明,采用隔震技术的建筑结构性能良好,且其内部非结构构件和设备等也基本无损伤[7]。对于易发生地震地区的公共建筑,应积极推广基础隔震、阻尼器等减隔震技术,进而提高其建筑韧性,减少人员伤亡和财产损失,同时增强其在重大灾害中支撑响应能力。

参考文献:

[1] 熊德清,崔笑烽.喜马拉雅山脉地震带主要地质灾害与地形地貌关系——以西藏日喀则地区为例[J].地质通报,2021,40(11):1967-1980.
XIONG D Q,CUI X F. The relationship between main geological hazard and topography in the Himalayan seismic belt:a case study in the Xigaze Area,Tibet[J]. Geological bulletin of China,2021,40(11):1967-1980.

[2] 郭樟根,陆伟东,董军,等.汶川地震中绵竹公共建筑的震害调查与分析[J].特种结构,2010,27(4):36-39.
GUO Z G,LU W D,DONG J,et al. Damage investigation and analysis of public buildings in Mianzhu during Wenchuan earthquake[J]. Special structures,2010,27(4):36-39.

[3] 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 Z G,SUN W M,NI T Y,et al. Earthquake damage and anti-seismic behavior analysis of school buildings in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Nanjing University of Technology (natural science edition),2009,31(1):49-54.

[4] 王玉梅,熊立红,许卫晓.芦山 7.0 级地震医疗建筑震害与启示[J].地震工程与工程振动,2013,33(4):44-53.
WANG Y M,XIONG L H,XU W X. Seismic damage and damage enlightenment of medical buildings in Lushan M_S 7.0 earthquake[J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration,2013,33(4):44-53.

[5] 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 J S,LI X B,DUAN Y S,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.

[6] 李昆,周煜,陶思宇,等.云南漾濞 6.4 级地震公共建筑的震害特征[J].世界地震工程,2021,37(3):1-8.
LI K,ZHOU Y,TAO S Y,et al. Seismic damage to public buildings in the M_S 6.4 Yangbi earthquake in Yunnan[J]. World earthquake engineering,2021,37(3):1-8.

[7] 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 Y,PENG X,WANG T,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.

[8] 王多智,谢笠,陈永盛,等.2023 年积石山地震重要公共建筑吊顶震害调查分析[J].地震工程与工程振动,2024,44(2):218-223.
WANG D Z,XIE L,CHEN Y S,et al. Investigation of seismic damage to ceilings of public buildings during the 2023 Jishishan earthquake[J]. Earthquake engineering and engineering dynamics,2024,44(2):218-223.

[9] 黄锐,姚佩歆,黄兆升,等. 积石山 6.2 级地震公共建筑震害及分析[J/OL].建筑结构, 1-9[2025-03-19].
HUANG R,YAO P X,HUANG Z S,et al. Seismic damage and analysis of public buildings in the M_S 6.2 Jishishan earthquake[J/OL]. Building structure, 1-9[2025-03-19].

[10] 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,2025,47(3):610-620,651.
PAN Y,CHEN Z F,GUO X,et al. Typical damage characteristics of school buildings caused by the Jishishan M_S 6.2 earthquake and implications for personnel evacuation[J]. China earthquake engineering journal,2025,47(3):610-620,651.

[11] 国家地震科学数据中心. 西藏定日 6.8 级地震应急产品发布[EB/OL]. (2025-01-07)[2025-03-20]. https://data.earthquake.cn/gxdt/info/2025/334672994.html.
China National Earthquake Data Center. Release of emergency products for Tibet Dingri M_S 6.8 earthquake [EB/OL]. (2025-01-07)[2025-03-20]. https://data.earthquake.cn/gxdt/info/2025/334672994.html.

[12] 杨婷,王世广,房立华,等. 2025 年 1 月 7 日西藏定日 M_S6.8 地震余震序列特征与发震构造[J]. 地球科学,2025,50(5):1721-1732.
YANG T,WANG S G,FANG L H,et al. Analysis of earthquake sequence and seismogenic structure of the 2025 M_S 6.8 Dingri earthquake in Tibetan Plateau[J]. Earth science,2025,50(5):1721-1732.

[13] 中国地震局工程力学研究所. 西藏日喀则市定日县 6.8 级地震强震动观测简报(一)[EB/OL]. (2025-01-09)[2025-03-20]. https://www.iem.ac.cn/zxgl/info?id=3894.
Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. Brief report on strong motion observation of Dingri M_S 6.8 earthquake, Shigatse, Tibet (No.1)[EB/OL]. (2025-01-09)[2025-03-20]. https://www.iem.ac.cn/zxgl/info?id=3894.

[14] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010(2016 年版)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
China Academy of Building Research. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 (2016 edition) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.

[15] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部中国地震局发布西藏定日 6.8 级地震烈度图[EB/OL]. (2025-01-10)[2025-03-20]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202501/t20250110_517756.shtml.
Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. Official release: seismic intensity map of M_S 6.8 Dingri earthquake, Tibet by China Earthquake Administration [EB/OL]. (2025-01-10)[2025-03-20]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202501/t20250110_517756.shtml.

[16] 新华网. 西藏定日县地震五大公众关切追踪[EB/OL]. (2025-01-08)[2025-03-20]. https://www.news.cn/local/20250108/f1c236f3dbc54e868b9d5ce7717253ff/c.html.
Xinhua News Agency. Tracing five major public concerns regarding the Dingri earthquake in Tibet [EB/OL]. (2025-01-08)[2025-03-20]. https://www.news.cn/local/20250108/f1c236f3dbc54e868b9d5ce7717253ff/c.html.

[17] 郑山锁,张秋石,程明超,等. 砌体结构的震害特征分析[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2016,29(6):65-69.
ZHENG S S,ZHANG Q S,CHENG M C,et al. Research on masonry structure's characteristics of seismic disaster [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (natural science edition),2016,29(6):65-69.

[18] 于敬海,蒋伟,刘凤东. 蒸压灰砂加气混凝土砌体通缝抗剪强度的试验研究[J]. 天津大学学报,2006,39(5):527-531.
YU J H,JIANG W,LIU F D. Experimental study on shear strength of autoclaved aerated sand lime concrete masonry walls [J]. Journal of Tianjin University,2006,39(5):527-531.

[19] 潘毅,任宇,李路,等. 积石山 6.2 级地震村镇建筑震害调查与分析[J]. 建筑结构学报,2024,45(S2):71-84.
PAN Y,REN Y,LI L,et al. Investigation and analysis of earthquake damage of village buildings in Jishishan earthquake with M_S 6.2[J]. Journal of building structures,2024,45(S2):71-84.

[20] 冯兴良,汪陈林,赵鑫,等. 填充墙对框架结构抗震性能影响的研究进展[J]. 工程与建设,2022,36(3):834-835,864.
FENG X L,WANG C L,ZHAO X,et al. Research progress on the influence of infill walls on the seismic performance of frame structures[J]. Engineering and construction,2022,36(3):834-835,864.

[21] SHING P B,MEHRABI A B. Behaviour and analysis of masonry-infilled frames [J]. Progress in structural engineering and materials,2002,4(3):320-331.

[22] 文明,冯辉,王伟伟,等. 现浇梁式楼梯支座形式对结构抗震性能的影响[J]. 南昌大学学报(工科版),2023,45(2):162-169.
WEN M,FENG H,WANG W W,et al. Influence of cast-in-place beam staircase bearing form on seismic performance of structure [J]. Journal of Nanchang University (engineering & technology),2023,45(2):162-169.