

西藏定日 6.8 级地震房屋震害特征调查

张钰曼¹, 邱虎², 叶阳³, 和枫¹, 次仁多吉¹, 魏本勇^{4, 5*}

1. 西藏自治区地震局公共服务中心, 西藏拉萨 850000;

2. 天津市地震局, 天津 300201;

3. 云南省地震局, 云南昆明 650224;

4. 中国地震局地震与火山灾害重点实验室, 北京 100029;

5. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;

摘要: 为研究西藏定日 6.8 级地震房屋的震害机理, 本文通过实地调查, 发现本次地震中土木结构出现的震害主要有倒塌、整体倒塌、墙体开裂、木构件受损; 框架结构出现倒塌, 梁柱构件发生损伤的建筑较少而且损伤较轻, 震害主要出现在多层建筑的框架填充墙; 砌体结构出现局部倒塌, 底框架砌体结构节点受损严重, 承重墙开裂。本文总结了各类建筑结构的震害特征并进行分析, 结果表明土木结构存在竖向刚度不均匀、平面刚度不均匀, 墙体整体性差等问题; 部分框架结构存在拉结筋缺失、柱子配筋率低、混凝土级配差等问题; 砌体结构存在砂浆强度不足、缺乏抗震措施等问题。最后针对本次地震中房屋出现的震害特征提出了抗震加固建议。

关键词: 西藏定日 6.8 级地震; 震害; 土木结构; 框架结构; 砌体结构

中图分类号: P316

收稿日期: 2025-04-27

Seismic Damage Characteristics Investigation of Dingri M_{6.8} Earthquake in Xizang

ZHANG Yuman¹, QIU Hu², YE Yang³, HE Feng¹, CIREN Duoji¹, WEI Benyong^{4, 5*}

1. Xizang Autonomous Region Earthquake Bureau, Public Service Center, Lhasa 850000, Tibet, China

2. Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China

3. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

4. Key Laboratory of Seismic and Volcanic Hazards, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

5. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract: In order to study the Seismic damage mechanism. Based on the field investigation, it was found that the seismic damages of adobe-timber structures are collapse, partial collapse, cracking on walls, damage to timber parts, frame structure occurred collapse, the damage to the beams and columns is rare and light, and the seismic damage mainly occurred in infilled walls. Masonry structures occurred partial collapse, the joints of bottom frame structures were seriously damaged, shear damage to walls. The result shows that adobe-timber structures exist vertical rigidity irregular, plane rigidity irregular, poor integrity of wall, etc. Frame structures exist the construction quality problem like lack of tie bar, low reinforcement ratio in columns and poor quality of concrete, etc. Masonry structures also exist construction quality problems, such as low mortar strength, lack of seismic measures, etc. At the end of this article, some suggestions about the building defects are provided in order to provide ideas for reinforcement and reconstruction.

Keywords: The magnitude 6.8 earthquake in Dingri, Xizang; Seismic Damage; Timber-earth Structure; Frame Structure; Masonry Structure

* 基金项目: 西藏自治区科技计划项目 (XZ202402ZY0008)

[作者简介] 张钰曼 (1996-), 女, 助理工程师, 硕士, 从事震害防御及地震应急工作。E-mail:

: zhangyuman@163.com, ORCID: 0009-0001-8045-2597。

[通讯作者] 魏本勇 (1982-), 研究员, 主要从事地震灾害风险评估、灾害认知与响应、灾后恢复与适应研究。E-mail: bywei1982@163.com, Tel: 010-62009090;

ORCID: 0000-0003-3510-278X。

0 引言

2025 年 1 月 7 日 09 时 05 分，西藏自治区日喀则市定日县（北纬 28.50 度，东经 87.45 度）发生 6.8 级地震，共造成 126 人死亡，188 人受伤。震中距定日县政府驻地约 36 千米，震源深度 10 公里，日喀则市共有 6 个县 43 个乡镇（街道）受灾。自 1949 年以来，震中 100 千米范围内共发生过 14 次 5.0 级及以上地震，详细信息如下表 1。

表 1 5.0 级及以上历史地震信息（1949—2025 年）

Table.1 The records of earthquakes above 5.0-magnitude(1949-2025)

地震时间	位置	震级	经度	纬度	深度	距离(km)
20200320	西藏自治区日喀则市定日县	5.9	87.42	28.63	10	15
20160522	西藏自治区日喀则市定日县	5.3	87.59	28.41	6	17
20160522	西藏自治区日喀则市定结县	5.3	87.6	28.36	10	21
20150425	西藏自治区日喀则市定日县	5.9	87.3	28.4	20	18
20010428	西藏自治区日喀则市定日县	5.2	87	28.8	0	55
19980904	西藏自治区日喀则市定日县	6.1	86.94	27.85	33	88
19930331	西藏自治区日喀则市拉孜县	5.0	87.5	29.2	32	78
19930320	西藏自治区日喀则市昂仁县	6.4	87.4	29.1	21	67
19751126	西藏自治区日喀则市定结县	5.2	87.8	28.15		52
19730322	西藏自治区日喀则市定日县	5.3	87.2	28.1	33	51
19711204	尼泊尔梅吉专区	5.4	87.9	27.9	29	80
19711024	西藏自治区日喀则市定日县	5.0	87.2	28.3	57	33
19581124	西藏自治区日喀则市定日县	5.2	86.9	28.8		63
19510528	西藏自治区日喀则市定日县	5.5	87	29		71

西藏地处青藏高原，是印度板块和欧亚板块的碰撞挤压地带，地壳运动非常活跃，地震活动相当频繁，因此摸清西藏地区建筑的抗震缺陷及隐患十分必要。由于西藏地区经济发展落后，多数村组的民居还是以传统的藏式土木结构、石木结构为主（本次地震震区以土木结构为主）。许多学者曾对藏式传统民居的结构特征、抗震性能进行过研究（楼亚非，2015；杜永峰等，2021；李碧雄等，2021；王郁等，2021；李碧雄等，2022；崔玥和杨娜，2023），藏区不同区域的藏式民居结构特征和在建筑特征受天气、环境和传统习俗的影响会有所不同，例如滇西北的藏式传统民居为平顶式木结构，而川西的藏式传统民居为穿斗式木结构和石木结构，目前暂未有学者对本次地震受灾地区的藏式传统土木结构的承重体系有过深入研究。许多学者对历年西藏地区震后的震害特征进行了总结和分析（曹忠权等，1999；谢英情等，2008；巴桑次仁等，2009；文升梁等，2010；李佳辑等，2014；次仁多吉等，2017；李宗超等，2018；张建龙等，2021；柏伟国等，2024），研究表明传统藏式民居在历次地震中均出现了严重的震害现象。同时，根据往年西藏相邻国家的震例研究可以发现，境外的地震依然可能对西藏的建筑、生命线工程等造成严重影响，威胁境内居民的人生安全和财产安全（陈宇昆等，2012；刘亢等，2019）。因此了解西藏地区房屋存在的抗震缺陷非常重要。

应急管理部、中国地震局在震后发布了本次地震的烈度图（图 1）。从中可见，本次地震出现IX度（9 度）破坏区（徐志双等，2025）。经现场调查，极震区内不同结构房屋震害明显：土木结构大量毁坏，表现为房屋倒塌、局部倒塌或承重构件严重受损无法继续使用等；框架结构出现倒塌，填充墙受损严重等；底框架砌体结构出现轻钢屋顶坍塌、梁柱节点受损、承重墙开裂等。由于震区经济发展相对滞后，房屋结构类型占比与内地不同，震区绝大多数为土木结构，少数为框架结构，砌体结构占比最小。本文通过现场调查，对土木结构、框架结构和砌体结构 3 类主要建筑结构震害特征进行了细致的剖析，对比分析了结构间的震害差异和震害原因，并据此给出了针对性的震后建筑加固和恢复重建建议。

西藏定日6.8级地震烈度图

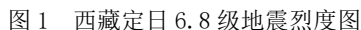


Figure 1. Seismic Intensity Map of survey points of the 6.8 - magnitude Earthquake in Dingri, Xizang

1 受灾地区建筑结构类型

1.1 土木结构

土木结构（图 2）是受灾地区数量最多的建筑结构类型，也是本次地震中震害最严重的结构形式。大部分自然村的民居均为土木结构，仅部分靠近道路两旁的村组有个别钢筋混凝土框架结构。土木结构作为当地传统民宅形式，因缺乏规范，建造多依赖邻里经验，施工标准和建材选取难以保障，致使抗震性能差。



图2 典型两层土木结构(拉孜县查务乡)

Fig.2 Typical two-floor timber-earth structure

当地土木结构多为两层，一层用作牲畜圈养与杂物存放，二层作为居住用房。基础构造简单，一般只有围绕外墙的一圈毛石基础（图 3a, b）和简单的柱下柱础石（图 3c）。

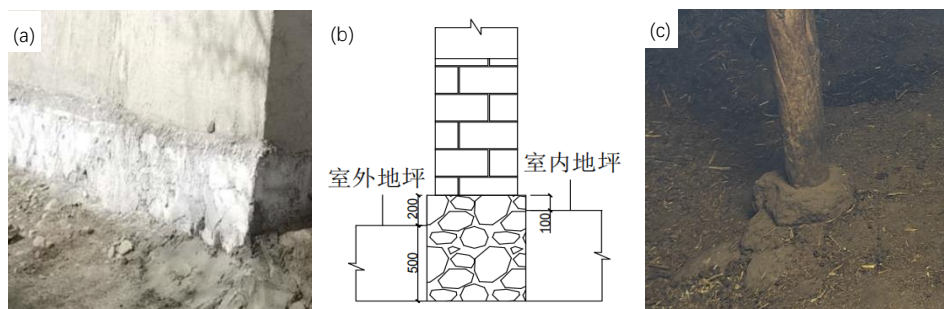


图3 基础构造; (a) 墙下基础; (b) 墙下基础构造; (c) 柱础石

Fig.3 Structure of foundation;(a)Foundation beneath wall;(b)Construction of foundation beneath wall ;(c)Foundation beneath column

根据现场实地调查，该结构民居存在两种承重体系模式：

模式一（图 4a，b）：由承重墙和木构件共同承重。一层以承重墙承重为主，在承重墙上均匀铺设木檩条，木檩条上铺设木板，木板上再铺泥土并夯实形成二层楼板，随后架设二层的梁柱承重体系。二层木梁木柱节点有两种连接方式，一种是用暗梢连接木柱与小弓木、小弓木与大弓木、大弓木与大梁（图 4f），另一种是近年来新建房屋常用的连接方式，仅木柱与小弓木间用暗梢，其余构件采用钉装的方式（图 4g），多见于新建房屋。之后在二层承重墙、木梁上架设木檩条，木檩条上铺设防水塑料布，最后再铺泥土层，夯实泥土层作为屋盖。少数民居也会采用轻钢屋顶。

模式二（图 4c，d）：由承重墙、土坯柱和木构件共同承重。一层外围设外承重墙，内部由土坯柱与木梁、木柱共同承重，土坯柱是由土坯砖垒成、边长约 60cm 的柱状承重构件，一层的木梁木柱体系节点大多无有效拉结（模式二，图 4e），柱头上放置替木，替木上放置大梁，部分房屋也只是简单的在木柱柱头上斜打铁钉，将木柱与替木固定在一起。后续屋盖建造步骤与模式一一致。

两种模式的承重区别主要在一层，二层均为木构件（木柱、木梁）与承重墙共同承重。

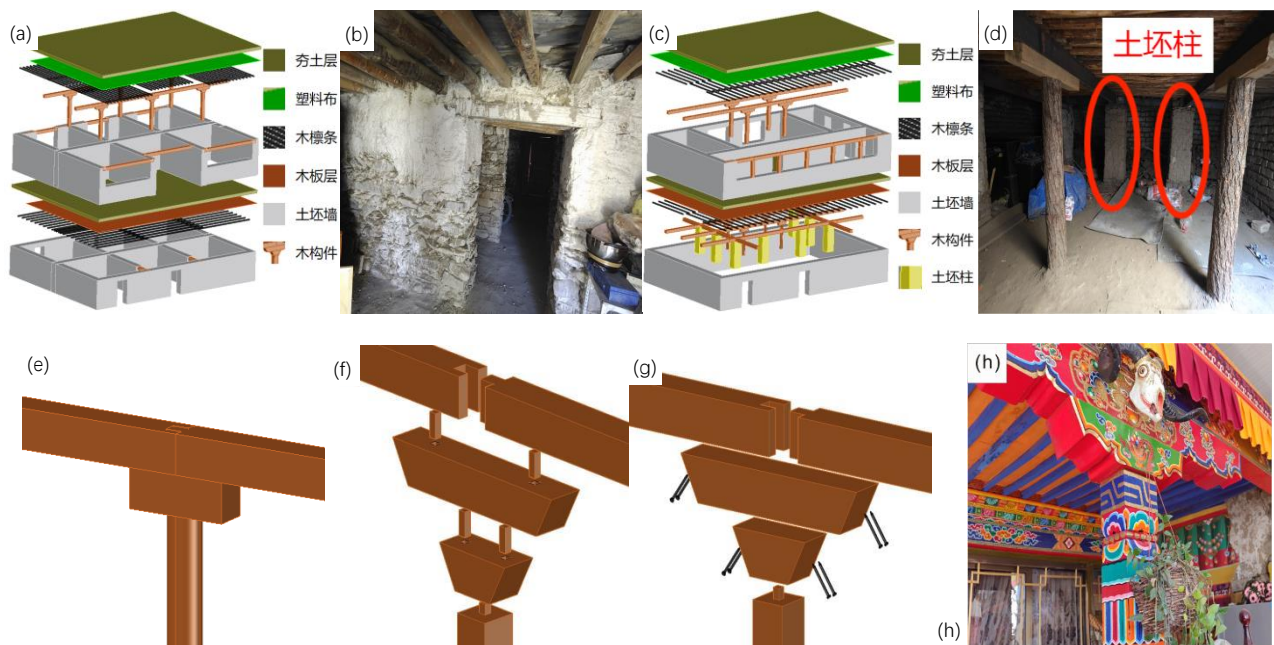


图4 地上承重体系; (a) 模式一展示图; (b) 模式一一层承重; (c) 模式二展示图; (d) 模式二一层承重; (e) 平摘节点; (f) 暗梢连接节点; (g) 钉装节点; (h) 二层木构件

Fig.4 Load-bearing system above ground;(a)Display of mode 1;(b)Load bearing parts of the first floor of model 1;(c)Display of mode 2;(d)Load bearing parts of the first floor of model 2;(e)Joint without Mortise and tenon;(f)Joint by using Anshao;(g)Joint by using nails;(h)Timber parts of secong floor

1.2 框架结构

框架结构是以钢筋混凝土梁、柱形成的框架作为主要承重体系的建筑（图 5a）。震区内框架结构主

要为街边商住两用楼与公房。定日地区发展较滞后，与内地乡镇多为砖混结构情况不同，该地框架结构数量多于砖混。当地框架结构的填充墙多采用加气混凝土砖，楼板大多为钢筋混凝土现浇楼板，但多数民用框架结构的承重柱与填充墙厚度相同，相对“薄弱”不凸出墙面以保持美观。

1.3 砌体结构

震区内砌体结构数量较少，主要包括砖砌体结构（即砖混结构，见图 5b, c）和石砌体结构（图 5d），从承重体系角度可分为底框架砌体结构和墙承重砌体结构。实地调查发现，震区多数村组没有砌体结构房屋，该结构主要分布在发展较早的镇中心商业道路以及医院、学校等老旧宿舍。由于修建年代早、随意性大，许多砌体结构缺乏抗震措施，有的仅设置圈梁而无构造柱。震区砖砌体结构使用的砌块大多是混凝土砖。

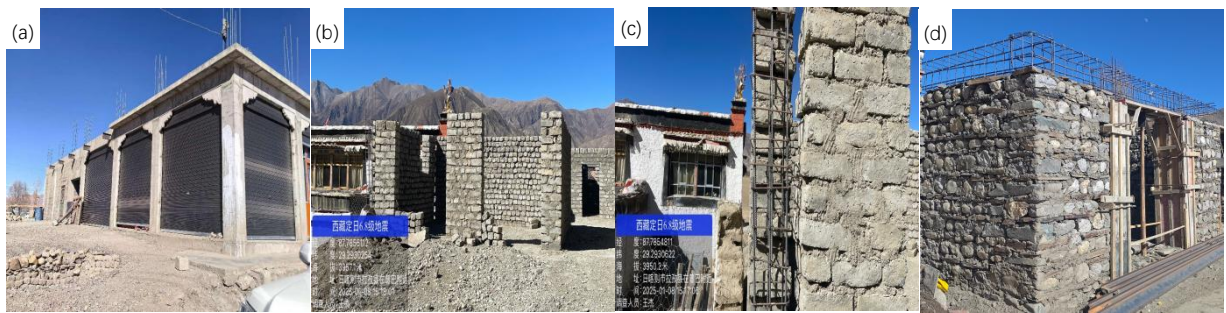


图 5 震区新建房屋；(a) 框架结构；(b) 砖混结构；(c) 砖混结构；(d) 石砌结构；

Fig.5 Newly buildings in earthquake area;(a)Frame structure;(b)Masonry structure;(c)Masonry structure;(d)Masonry structure using stone;

2 震害特征及分析

2.1 土木结构

土木结构在本次地震中震害最为严重，主要原因有两点：一是施工质量粗糙，如采用黄泥作砌筑砂浆，纵横墙交接处拉结薄弱，致使建筑整体性差；二是承重体系不合理，存在一二层承重构件不连续、一二层承重构件变化与楼层面积变化等构造缺陷。

2.1.1 倒塌

倒塌是极震区及高烈度区最常见的震害现象之一（图 6a, b）。在地震作用下，房屋一层与二层的承重构件均遭破坏，丧失承载能力，致使整体倒塌。除强震作用外，藏式土木结构的体系不利于抗震，尤其是一层与二层的结构变化、一层承重体系（木构件、土坯砖、承重墙）混乱，加上墙体松散，导致震中及高烈度区土木结构房屋在强震下大量倒塌。极震区中长所乡位于湖盆地区，有较大湖泊，周边的村庄会因软土造成的地震放大效应导致震害加重（朱红涛，2013）。

2.1.2 局部倒塌

局部倒塌也是震区常见的震害现象，一般表现为二层坍塌（图 6c）或单侧坍塌（图 6d）。

二层坍塌较为普遍，多因二层刚度变化，形成薄弱层。部分户型一层为矩形，二层变为“凹”字形（图 6e,f）；也有二层变为“L”型（图 6g）；还有些户型二层整体收进，一层屋顶预留部分作为二层走廊，从顶部俯视呈“日”字（图 6h），构件与平面面积变化使二层成为薄弱层，在地震中易遭破坏。

单侧坍塌通常是墙角坍塌，多由承重墙坍塌导致，如墙角严重受损导致墙角两侧墙体丧失承载能力，造成墙角部位一二层的坍塌。

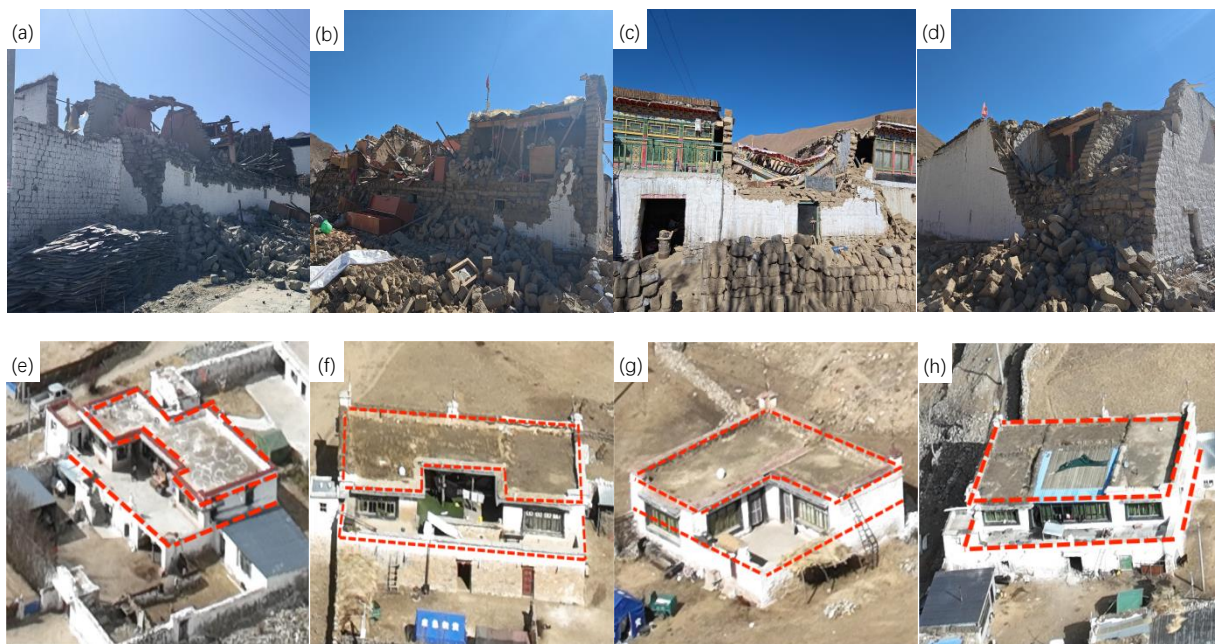


图6 倒塌、局部坍塌及二层面积减少现象；(a)倒塌(定日县长所乡森噶村，IX度区)；(b)倒塌(拉孜县芒普乡达龙村，VIII度区)；(c)二层倒塌(拉孜县芒普乡达龙村，VIII度区)；(d)单侧倒塌(定日县措果乡吉翁村，VIII度区)；(e)“凹”型；(f)“凹”型；(g)“L”型；(h)“日”字型

Fig.6 Collapse、partial collapse and reduced building area reduction of second floor;(a)Collapse(Sengga village,Changsuo Township,Dingri County,IX degree zone);(b)collapse(Dalong village,Mangpu Township,Lazi County,VII degree zone);(c)Collapse of second floor(Dalong village,Mangpu Township,Lazi County,VIII degree zone);(d)Side collapse(Jiweng village,Cuoguo Township,Dingri County,VIII degree zone);(e)“凹” form;(f)“凹” form;(g)“L” form;(h)“日” form

2.1.3 墙体的震害

墙体震害主要有纵横墙交接处的震害、墙梁交接处的震害、门窗洞角的震害、墙体平面的裂缝。

(1) 纵横墙交接处的震害

本次地震中，纵横墙交接处的震害以墙角处的震害最为常见。外纵墙与外横墙仅通过简单咬砌连接，无拉结柱，且砌块间以黄泥作为砌筑砂浆，强度不足，难以有效抵御地震（图 7a）。外墙与内墙的交接处构造更为简单，部分甚至不设拉结措施。地震时墙角受力复杂，致使内墙与外墙脱开的现象较为普遍（图 7b）。

(2) 墙梁交接处的震害

木梁是由木柱和承重墙共同支撑，木柱与木梁之间通常用暗梢或铁钉连接，但是与承重墙无拉结，通常平搁在承重墙上。木梁木柱承重体系属柔性构件，而承重墙为脆性构件，地震发生时，二者材料特性不同，对地震的反应也不同，木梁的一段连接木柱，在木柱带动下，木梁与墙体间发生相互作用，致使许多墙梁交接处出现墙体开裂（图 7c，d）。

(3) 门窗洞角的震害

门窗洞角部位易产生应力集中。传统土木结构通常在门窗洞口上方设置木过梁，木过梁与土墙之间无有效拉结措施，仅简单搁置于土墙上。在地震力作用与应力集中的双重影响下，门窗过梁边角处及窗洞下方角部极易产生裂缝（图 7e）。

(4) 墙体平面的震害

内墙和外墙多以土坯为砌块，土坯间用黄泥粘结，墙体虽厚重但是整体性不足。受剪力作用时，易沿土坯缝隙出现斜裂缝（图 7f）。部分墙体还会产生竖向裂缝（图 7g），竖向裂缝源于墙体砌筑方式形成的竖向通缝，其产生原理与斜裂缝的类似，均因墙体无法提供足够抗拉强度。此外，纵横墙连接薄弱，尤其是内墙，当地震力垂直于墙体平面作用时，墙体因缺少约束易歪斜，外承重墙甚至可能直接外闪倒塌（图 7h）。

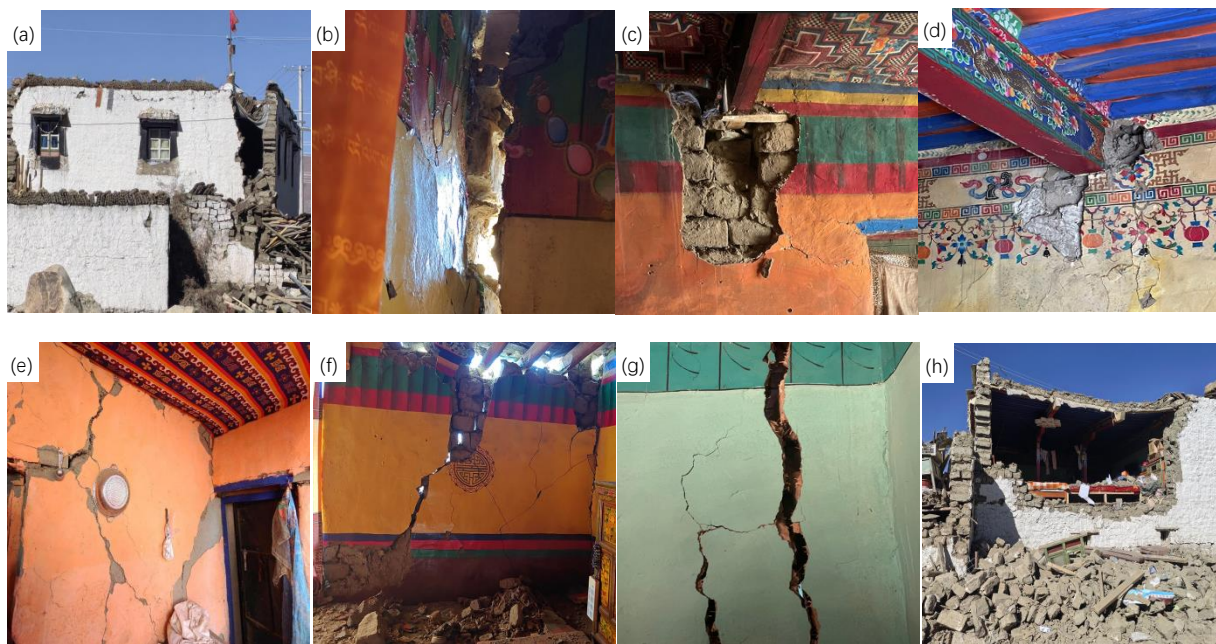


图7 墙体的震害；(a)墙角破坏(定日县曲洛乡吉翁村，Ⅷ度区)；(b)纵横墙脱开(定日县曲洛乡吉翁村，Ⅷ度区)；(c)梁下墙体开裂(Ⅶ度区拉孜县芒普乡达龙村，)；(d)梁下墙体开裂(拉孜县曲下镇耐莎，Ⅶ度区)；(e)门窗洞口开裂(拉孜县曲下镇曲下，Ⅶ度区)；(f)墙体斜向裂缝(拉孜县曲下镇耐莎，Ⅶ度区)；(g)墙体竖裂缝(定日县曲洛乡木队村，Ⅷ度区)；(h)墙体外闪坍塌(拉孜县芒普乡达龙村，Ⅷ度区)

Fig.7 Seismic damage of walls;(a)Damage of corner(Jiweng village,Quluo Township,Dingri County,Ⅷ degree zone);(b)Seprate of vertical and horizontal walls(Jiweng village,Quluo Township,Dingri County,Ⅷ degree zone);(c)Crack beneath the beam(Dalong village,Mangpu Township,Lazi County,Ⅶ degree zone);(d)Crack beneath the beam(Naisha village,Quxia Township,Lazi County,Ⅶ degree zone);(e)Crack on the corner of door(Quxia village,Quluo Township,Dingri County,Ⅶ degree zone);(f)Diagnoal crack on wall(Naisha village,Quxia Township,Lazi County,Ⅶ degree zone);(g)Vertical crack(Mudui village,Quluo Township,Dingri County,Ⅷ degree zone);(h)Collapse of wall(Dalong village,Mangpu Township,Lazi County,Ⅷ degree zone)

2.1.4 木构件的震害

木构件的最大薄弱环节在于梁柱节点。近年来新建房屋的二层梁柱节点建造方式简化，原本木柱、小弓木、大弓木与大梁均用暗梢连接，现在多数节点仅木柱与小弓木之间使用暗梢，其余采用简单钉装。该地区因干燥、温差大、居民缺乏维护意识等因素，常使木材有干缩开裂现象，如果此时打入铁钉，可能会造成木材内部出现细微裂缝，导致节点强度降低。同时，木梁木柱承重体系横向缺乏约束，地震时节点受力摇摆，极易出现震害（图8）。

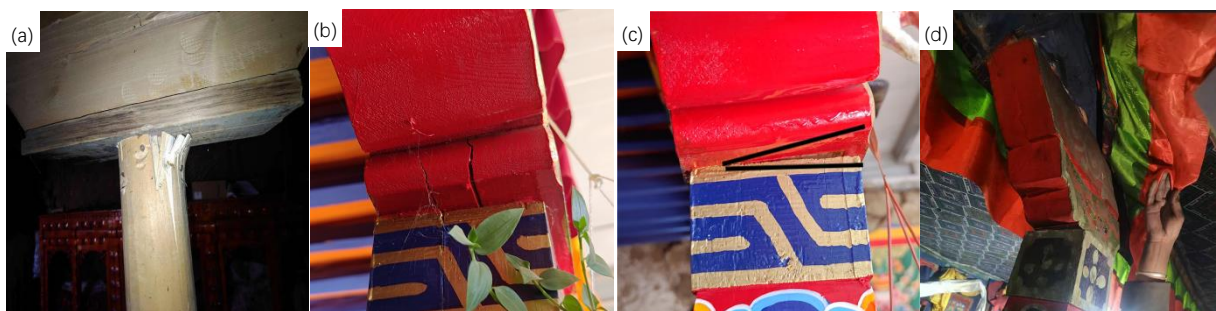


图8 节点震害；(a)柱头开裂(拉孜县芒普乡达龙村，Ⅷ度区)；(b)元宝木开裂(定日县曲洛乡曲洛，Ⅷ度区)；(c)拔榫(拉孜县芒普乡达龙村，Ⅷ度区)；(d)节点歪斜(昂仁县日吾其乡色米村Ⅵ度区)

Fig.8 Seismic damages of joints; (a)Crack on the top of column(Dalong village, Mangpu Township,Lazi County,Ⅷ degree zone);(b)Crack of Yuanbaomu(Quluo village,Quluo Township,Dingri County,Ⅷ degree zone);(c)Half-pulled tenon(Dalong

village,Mangpu Township,Lazi County,VIII degree zone);(d)Askew of joint(Semi village,Riwuqi Township,Angreng County,VIII degree zone);

2.1.5 附属结构的震害

土木结构院落主要的附属结构有院落围墙和独立厕所。围墙的建设一般不考虑抗震性能,因此不会设立构造柱等抗震措施,砌筑砂浆一般为黄泥,也有围墙不使用砌筑砂浆,只是简单堆叠干砌,导致大量围墙在地震中遭到破坏(图9a)。院落围墙大门也是薄弱构件,为起到装饰效果,一半会在门洞上方设置过梁,在过梁的上方堆叠土坯形成半米左右的墙体,土坯仅使用黄泥作为砌筑砂浆简单堆砌在门头过梁上,可以类比为脆弱的悬臂梁,因此门头上方垮塌的震害现象较为常见(图9b)。垮塌的土坯墙可能会对逃生人员造成阻碍,甚至威胁人生安全。此外,多数户主会单独搭建两层独立厕所,独立厕所构造相比主体结构更为简单,仅用土坯堆砌成方形空间,在四面承重墙上搭建屋盖,整体性极差,地震中大多出现开裂(图9c, d, e),在高烈度区也有出现厕所毁坏(图9f)。



图9 非承重构件及附属结构的震害;(a)围墙倒塌(拉孜县查务乡查务村Ⅶ度区);(b)围墙大门门头掉落(拉孜县查务乡查务村Ⅶ度区);

(c)厕所墙体开裂(拉孜县查务乡查务村Ⅶ度区);(d)厕所墙体开裂(拉孜县查务乡查务村Ⅶ度区);(e)厕所墙体开裂(拉孜县查务乡森坚村Ⅶ度区);(f)厕所墙体开裂(定日县加措门当岗村Ⅷ度区)

Fig.9 Seismic damages of accessory structure;(a)Collapse of wall(Chawu village,Chawu Township, Lazi County,VII degree zone);(b)Fall of the parts above the door(Chawu village,Chawu Township, Lazi County,VII degree zone);(c)Crack of the toilet wall(Chawu village,Chawu Township, Lazi County,VII degree zone);(d)Crack of the toilet wall(Chawu village,Chawu Township, Lazi County,VII degree zone);(e)Crack of the toilet wall(Sengjian Village,Chawu Township, Lazi County,VII degree zone);(f)Crack of the toilet wall(Mendanggang village,Jiacao Township,Dingri County,VII degree zone);

2.2 框架结构

此次地震中,框架结构的震害现象主要是底层倒塌、填充墙的破坏、墙梁及墙柱交接处的破坏。其中,在定日县、拉孜县等县城城区,可从外部直观看到许多框架结构填充墙出现的震害,尤其是墙梁、墙柱交接处。

2.2.1 底层倒塌

极震区框架结构出现底层倒塌(图10a,b)。现场勘查表明,倒塌建筑底层承重柱存在配筋率不足、箍筋间距过大等问题,且通过调查现场破碎的混凝土发现混凝土整体强度较低(图10c)。震区主干路两边多为框架结构商住两用楼房,楼下商用空间通常缺乏墙体,导致一层刚度被削弱,结构稳定性减弱,在地震作用下底层更易被破坏。



图 10 框架结构倒塌；(a) 底层倒塌(定日县曲洛乡嘎白村IX度区)；(b) 底层倒塌(定日县曲洛乡嘎白村IX度区)；(c) 柱子配筋率不足(定日县曲洛乡嘎白村IX度区)

Fig.10 Collapsed frame structure;(a)Collapse of bottom floor(Gabai village,Quluo Township,Dingri County,IX degree zone);(b)Collapse of bottom floor(Gabai village,Quluo Township,Dingri County,IX degree zone);(c)Low reinforcement ratio(Gabai village,Quluo Township,Dingri County,IX degree zone)

2.2.2 承重构件的震害

个别框架结构出现了承重构件受损的震害现象，主要是柱头开裂（图 11a）、梁端混凝土轻微剥落（图 11b）和梁中出现明显裂缝（图 11c）。图 11a 中柱子有两根，一根是挑檐上方的柱子（红线框），一根是房屋主体承重柱（黄线框），前者是因为填充短墙的存在导致柱子有效长度减少，出现“短柱效应”，柱子柱头和墙体顶端的柱子出现了明显的弯剪破坏；后者在梁柱节点处出现了破坏，钢筋露出，破坏沿柱体延展，不符合“强节点弱构件、强柱弱梁”的多层框架结构设计准则，可能是设计未考虑现浇楼板对梁体刚度或梁体跨度大导致设计刚度增大的影响。



图 11 承重构件的震害 (a) 柱体开裂(定日县曲洛乡嘎白村IX度区)；(b) 梁头混凝土剥落(拉孜县中心医院VII度区)；(c) 梁中开裂(拉孜县芒普乡幼儿园VII度区)

Fig.11 Seismic damages of load-bearing components;(a)Crack on the top of column(Gabai village,Quluo Township,Dingri County, IX degree zone);(b)Spalling Concret on the top of beam(Lazi central hospital Lazi County, VII degree zone);(c)Crack in the middle of beam(Mangpu kindergarten,Lazi County, VII degree zone)

2.2.3 填充墙的震害

填充墙并非承重构件，强度相对较低。由于震区框架结构的填充墙与框架基本采用刚性连接，地震时，柔性的钢筋混凝土框架产生形变，致使脆性填充墙随之变形而出现震害。

2.2.3.1 墙梁、墙柱交接处的震害

本次地震中，墙梁、墙柱交接处的震害具体表现为墙体与梁交接处出现水平裂缝，以及墙与柱交接处出现垂直裂缝，两种裂缝常常一起出现（图 12a, b），墙柱裂缝间距达 1cm，表明拉结措施较弱。调查发现，部分框架结构的填充墙未设置拉结钢筋（图 12d）；有的虽设置了拉结筋，但砂浆强度低且采用圆筋，导致拉结筋与墙体间的拉结强度不足（图 12c）。震区填充墙与框架多采用刚性连接的方式（图 12e），因此地震时填充墙极易与框架梁柱产生相互作用。当烈度不高、所受到的地震作用不强时，二者的交接处就极易出现震害。

2.2.3.2 门窗洞口处的裂缝

门窗洞口处的裂缝主要表现为洞口角部的斜裂缝或水平裂缝。由于门窗洞口处本身在地震时会产生应力集中，角部属于易损部位。具体情况如下：

（1）**单独的门窗洞角的裂缝：**因地震剪力产生的门窗洞角斜裂缝在此次地震中较为常见。此外，电表等墙面开口部位也出现明显震害（图 12f, g）。

（2）**门窗洞口间的裂缝：**在医院、学校、企事业单位办公楼房中，常能见到门窗洞口之间的墙体出现斜裂缝，当地震力方向与墙面平行时，剪切破坏更为严重（图 12h, i）。

（3）**门洞窗洞与墙梁、墙柱的裂缝：**当墙梁、墙柱连接处产生裂缝，且门窗洞口出现斜裂缝时，易在裂缝间形成通缝（图 12j）。

2.2.3.3 墙面开裂

填充墙刚度大，但抗剪和变形能力较差。在地震作用下，最常见的震害为填充墙受剪形成斜裂缝（图 12k），调查中也发现交叉裂缝与一字型裂缝结合的震害（图 12l），此时填充墙半高处形成沿水平灰缝的滑移裂缝，若地震作用加强，则可能在框架柱中部形成塑性铰，引起不期望出现的短柱现象。



图 12 填充墙震害；（a）交接处震害(拉孜县曲下镇曲下村Ⅶ度区)；（b）交接处震害(定日县曲洛乡左措村Ⅸ度区)；（c）交接处震害(定日县加措乡门当岗村Ⅶ度区)；（d）不设拉结筋(拉孜县芒普乡查普村Ⅶ度区)；（e）填充墙顶斜砌(拉孜县曲下镇

VII度区); (f) 洞口角部开裂(拉孜县曲下镇耐莎VII度区); (g) 电表口裂缝(拉孜县曲下镇耐莎VII度区); (h) 洞口间开裂(拉孜县曲下镇耐莎VII度区); (i) 洞口间墙体开裂(定日县曲洛乡左措村VII度区); (j) 墙体开裂(定日县曲洛乡左措村VII度区); (k) 斜裂缝(定日县曲洛乡左措村VII度区); (l) 交叉裂缝(定日县曲洛乡左措村VII度区);

Fig.12 Seismic damages of infilled wall;(a)Seismic damage of interface(Quxia village,Quxia Township,Lazi County,VII degree zone);(b)Seismic damage of interface(Zuocuo village,Quluo Township,Dingri County,IX degree zone);(c)Seismic damage of interface(Naisha village,Jiacuo Township,Dingri County,VII degree zone);(d)Lack of tie bar(Naisha village,Mangpu Township,Lazi County,VII degree zone);(e)Diagonal masonry on the top of wall(Naisha village,Quxia Township,Lazi County,VII degree zone);(f)Crack of the corner of door(Naisha village,Quxia Township,Lazi County,VII degree zone);(g)Crack of opening(Naisha village,Quxia Township,Lazi County,VII degree zone);(h)Crack between windows(Naisha village,Quxia Township,Lazi County,VII degree zone);(i)Crack between window and door(Zuocuo village,Quluo Township,Dingri County,VII degree zone);(j)Crack on wall(Zuocuo village,Quluo Township,Dingri County,VII degree zone);(k)Diagnoal crack(Zuocuo village,Quluo Township,Dingri County,VII degree zone);(l)Cross crack(Zuocuo village,Quluo Township,Dingri County,VII degree zone)

2.2.4 建筑间相互碰撞引起的震害

两栋毗邻建筑间空隙距离不足会导致地震中建筑产生相互碰撞，造成二次伤害，此现象多见于县城街道或是靠近路边主干道的村组居民商住两用房（图 13）。



图 13 建筑碰撞的震害

Fig.13 Seismic damages due to building collision

2.3 砌体结构

2.3.1 承重墙的损坏

地震作用下，震区砌体结构出现典型的窗洞口角部裂缝、竖向裂缝、交叉裂缝等震害现象（图 14a, b, c, d）。震区内的砌体结构普遍存在不设构造柱或构造柱设置数量不足、使用的砂浆强度较低等问题。虽然震区内砌体结构数量少，但墙体开裂现象仍比较普遍。

2.3.2 底框架砌体结构的震害

震中有两栋底框架砌体结构出现严重震害。其中一栋轻钢屋顶因上部承重构件受损而坍塌（图 14e）；另一栋的一层梁柱节点震害明显，边角柱出现混凝土崩落（图 14f），钢筋外露的现象，同时可以发现该建筑箍筋配置不足。

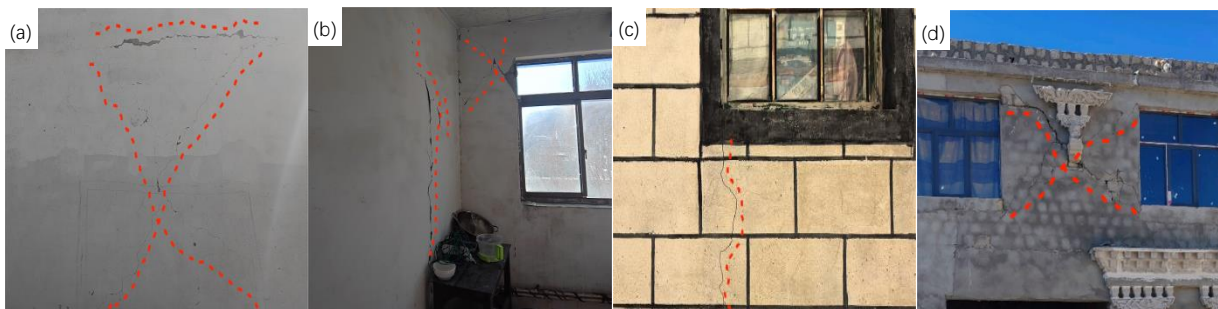




图 14 砌体结构震害；(a) 承重墙开裂(拉孜县拉孜镇拉龙村Ⅵ度区)；(b) 承重墙开裂(拉孜县拉孜镇拉龙村Ⅵ度区)；(c) 承重墙开裂(定日县加措乡拉龙村Ⅵ度区)；(d) 窗间墙受损(拉孜县查务乡查务村Ⅶ度区)；(e) 屋盖滑落(定日县曲洛乡噶白村Ⅸ度区)；(f) 节点受损(定日县曲洛乡噶白村Ⅸ度区)

Fig.14 Seismic damages of masonry structure;(a),(b) and (c)Crack on load-bearing wall(Lalong village,Lazi Township, Lazi County and Jiacao Township,Dingri County,Ⅶ degree zone);(d)Crack between windows(Chawu village,Chawu Township, Lazi County,Ⅶ degree zone);(e)Fall of roof(Gabai village,Quluo Township,Dingri County,Ⅸ degree zone);(f)Damage of joint(Gabai village,Quluo Township,Dingri County,Ⅸ degree zone)

2.4 其他非承重构件

2.4.1 女儿墙

土木结构女儿墙一般采用土坯砖,用黄泥做砌筑砂浆,简单砌筑于楼盖外围一圈,砌体结构及框架结构常设置 1.0~1.5m 高的女儿墙。女儿墙与主体结构拉结措施普遍薄弱,部分女儿墙虽设有拉结筋,但长度不足或数量不足且缺少构造柱。在地震作用下,较高的女儿墙易因“鞭梢效应”受损(图 15a, b, c)。部分居民由于生活习惯,将收集的牛粪制作成“牛粪砖”堆砌在屋顶充当女儿墙,这种简单堆砌在此次地震也常见散落现象(图 15d)。

2.4.2 室外民俗装饰物

各类结构(土木、框架、砌体)均保留了大量传统民俗装饰物,如装饰性斗拱及屋顶四角风旗插口处的高墙。装饰性斗拱一般设置在窗头或门头,土木结构多为木制,由于与土坯墙拉结弱常见斗拱因地震作用整体脱落(图 15e),框架及砖混结构一般采用混凝土制成的装饰性斗拱,虽不承重但作为屋面突出物,同样因拉结薄弱易在地震中开裂脱落(图 15f)。受民俗影响,当地民用建筑常在屋顶风旗插口处设置相互垂直的高墙或塔状结构,此类薄弱部位地震中也常见开裂、脱落等现象。

2.4.3 其他装饰物

其他装饰物如吊顶、墙面装修及管道包柱等震害显著。民用建筑吊顶多因石膏板仅简单搁置于轻钢龙骨架且连接薄弱,从而在地震中出现面板脱落、龙骨变形外露(图 15i);公用建筑因面板与龙骨有拉结措施,震害相对较轻(图 15j)。

墙面装修的震害主要表现为墙面装饰层脱落、瓷砖掉落等(图 15k),部分管道包柱部位也出现了装饰性瓷砖掉落的现象(图 15l)。

2.4.4 玻璃幕墙

少数建筑物的玻璃幕墙也出现了震害现象。钢框架柔性较大,地震中变形易挤压玻璃构件致其受损脱落(图 15m, n)。



图 15 非承重构件震害：(a) 女儿墙掉落(拉孜县拉孜镇拉龙村，Ⅵ度区)；(b) 女儿墙掉落(拉孜县拉孜镇拉龙村，Ⅵ度区)；(c) 女儿墙掉落(拉孜县曲下镇曲下村，Ⅶ度区)；(d) 牛粪砖散落(拉孜县曲下镇曲下村，Ⅶ度区)；(e) 装饰斗拱掉落(拉孜县拉孜镇拉孜村，Ⅵ度区)；(f) 装饰斗拱开裂((拉孜县拉孜镇拉孜村，Ⅵ度区)；(g) 风旗插台断裂(拉孜县拉孜镇拉孜村，Ⅵ度区)；(h) 风旗插台受损(拉孜县曲下镇曲下村，Ⅶ度区)；(i) 民用房吊顶损坏((拉孜县曲下镇市区，Ⅶ度区)；(j) 公用房吊顶损坏(拉孜县曲下镇市区，Ⅶ度区)；(k) 瓷砖掉落(拉孜县曲下镇市区，Ⅶ度区)；(l) 管道包柱受损(拉孜县曲下镇市区，Ⅶ度区)；(m) 玻璃受损(拉孜县曲下镇市区，Ⅶ度区)；(n) 玻璃受损(拉孜县曲下镇市区，Ⅶ度区)

Fig.15 Seismic damages of non load-bearing structure;(a) and (b)Fall of parapet(Lalong village,Lazi Township, Lazi County,Ⅵ degree zone);(c)Fall of parapet(Quxia village,Quxia Township, Lazi County,Ⅶ degree zone);(d)Fall of cow dung bricks(Quxia village,Quxia Township, Lazi County,Ⅶ degree zone);(e)Fall of decorative dougong(Lazi village,Lazi Township, Lazi County,Ⅵ degree zone);(f)Crack of decorative dougong(Lazi village,Lazi Township, Lazi County,Ⅵ degree zone);(g)Damage of socket for wind-flag(Lazi village,Lazi Township, Lazi County,Ⅵ degree zone);(h)Damage of socket for wind-flag(Quxia village,Quxia Township, Lazi County,Ⅶ degree zone);(i)Damage of suspend ceiling of residential building(County town,Quxia Township, Lazi

County,Ⅶ degree zone);(j)Damage of suspend ceiling of public building(County town,Quxia Township, Lazi County,Ⅶ degree zone);(k)Fall of ceramic tile(County town,Quxia Township, Lazi County,Ⅶ degree zone);(l)Damage of column wrapping pipeline(County town,Quxia Township, Lazi County,Ⅶ degree zone);(m) and (n)Damage of glass(County town,Quxia Township, Lazi County,Ⅶ degree zone);

2.6 结构震害对比与原因分析

通过资料梳理，从破坏形式、极震区破坏程度、结构分布三方面，总结本次各类建筑物的震害及分布特点（表 2）。同时根据现场调查，总结了本次地震中可能引起建筑震害的结构体系、施工和场地条件因素。

表. 2 结构震害对比与原因分析

Table.2 The comparison of seismic damage and the cause analysis			
总结	土木结构	框架结构	砌体结构
破坏形式	房屋倒塌	底层倒塌	
	房屋局部倒塌	墙梁墙柱交接处开裂	底框架砌体结构梁柱节点
	木构件受损	墙体交叉裂缝、斜裂缝	开裂
	女儿墙受损	门窗洞角开裂	轻钢屋顶坍塌
	纵横交接处墙开裂	填充墙倒塌	承重墙开裂
	墙梁交接处开裂	瓷砖剥落	女儿墙受损
	门窗洞角开裂	吊顶损坏	
	墙体平面开裂	女儿墙受损	
震害对比			
极震区破坏程度	大量土木结构倒塌，或是破坏严重无法居住	有两栋框架结构出现一层坍塌现象；绝大多数框架结构非承重构件受损	两栋底框架砌体结构梁柱节点受损严重；多数砌体结构出现承重墙开裂
结构分布	绝大多数存在于村镇地区，震区数量占比超过 80%	少数存在于乡镇，多数存在于城区，震区数量占比约 15%	数量较少，散落分布于城镇与村镇，震区占比约 5%
原因剖析	竖向刚度不连续，一二层承重构件变化，二层建筑缩进平面刚度不均匀，承重墙与木构件共同承重；整体性不强，使用黄泥作为承重墙砌筑砂浆，纵横墙拉结弱	承重柱配筋率低；墙体不设拉结筋或拉结措施较弱；砂浆强度低；女儿墙与主体拉结弱	砂浆强度低；女儿墙与主体拉结弱；底框架砌体结构竖向刚度不均匀
	施工	公用建筑基本经过正规设计，但个别建筑施工可能存在不足；民用建筑部分经过正规设计，少数未经正规设计，施工质量总体良莠不齐	多为自建或民间施工队，施工质量欠佳
	场地	村庄多位于谷地，受场地条件影响，出现地震放大效应，尤其震中所长乡位于湖边，软土沉积更易产生地震放大	

与区域历史震害情况相比，此次地震中土木结构房屋大量毁坏，这与历史震害记录中该类结构在强震下的典型破坏模式基本一致，反映了其自有的震害易损性。对于框架结构建筑，除填充墙严重受损这一常见震害特征外，本次调查中也发现框架结构倒塌的现象，而历史震害中框架结构在本地区高烈度区主要以严重破坏（非倒塌）为主。对于底框架砌体结构，发现轻钢屋顶坍塌和梁柱节点受损等现象，这在本地区历史震害中出现相对较少。

值得注意的是，本次地震产生了显著的同震地表破裂带（魏本勇等，2025）。而现场调查也发现，极震区离断层越近的建筑物破坏越严重，特别是完全倒塌（如土木结构）和关键构件严重失效（如底框架砌体结构的梁柱节点、轻钢屋顶）的现象较为普遍。如离地表破裂最近的长所乡古荣村（约 2km），由于初始地震动未经足够距离衰减就波及房屋建筑，造成该村大范围土木结构房屋倒塌，遇难 94 人，也成为此次地震受灾最为严重的地区（魏本勇等，2025）。

3 加固及重建建议

本次地震因房屋震害造成大量人员伤亡。经现场勘察与人员死因分析，土木结构震害是本次地震中导致伤亡的主因，土木结构整体性不强、承重体系混乱，难以有效抵御地震。框架结构存在配筋率不足、箍筋间距过大等问题；砌体结构普遍存在不设构造柱或构造柱设置数量不足、使用的砂浆强度较低等问题；另外，非承重构件受损虽大多不影响建筑稳定性，但会大幅增加后期修复成本。基于此，提出以下措施，为震后重建及现有房屋加固提供参考：

（1）加固土木结构房屋：建议在内部加设钢管框架，与现有梁柱体系形成以柔性框架为主的承重体系，改变承重方式，提升建筑冗余度，同时利用在外墙内外面增设钢丝网并用铁件拉结的方式增强墙体的整体性，防止大震时因脆性构件破坏引起房屋突然坍塌，造成人员伤亡。

（2）规范砌筑砂浆使用：建议使用 MU10 以上强度的砂浆作为建筑砌块砌筑砂浆，土木结构房屋尤应避免使用黄泥（现场多数坍塌墙体中土坯砖保存完好，表明墙体在土坯未达破坏强度时，就因黄泥粘结性差而散落）。

（3）排查加固框架结构：对现有的框架结构，尤其是民用框架结构，排查承重构件配筋率低等问题，可采用外包钢骨架或外包钢筋混凝土的方式进行加固。同时，对单跨框架结构，底层空旷的框架结构等可采用增设剪力墙等方式加固。

（4）规范框架填充墙施工：框架结构填充墙应严格按照规范设置拉结筋，避免使用圆筋；填充墙顶部与梁交接处尽量避免斜砌，若采用斜砌，需保证砂浆密实度，建议以柔性连接取代刚性连接。对防灾重点区域的医院、学校、体育场、重要建筑物 推广隔震措施，将会很大程度上提高灾区的自救能力，减少人员伤亡（李志强等，2013）。

（5）加强女儿墙拉结：应加强女儿墙与主体结构拉结，增设构造柱，特别是边角部位（如拉孜县中心医院，有楼房因女儿墙与纵横墙交接处连接不佳，导致整面墙体向外倒塌）。

（6）加强民俗装饰物与主体连接：此次地震中不少民俗装饰物出现震害，应加强它们自身的强度及与主体的拉结度，或是使用轻质材料的装饰性构件，消除安全隐患。

（7）强化宣传教育：加强宣传，提高当地居民建房防震减灾意识，在建房屋务必设置必要的抗震措施。

（8）合理选择重建区域：做好地震小区划，避免将建筑物沿着断裂带建设；避开次生地质灾害危险区；及时修缮加固现有住房（周军学等，2017）。

4 总结

本文基于对定日 6.8 级地震现场的实地考察，调查并总结了震区内主要的三类建筑物震害情况，同时从施工工艺角度剖析震害成因。震害现象表明，施工工艺落后、建材强度不足和震级较大是本次地震建筑物震害严重的主要原因。

（1）土木结构：震区传统的藏式土木结构拥有两种不同的承重体系，一种一层为墙承重，另一种一层为土坯柱、木柱、木梁和承重墙共同承重，两种承重体系的二层均为木梁木柱与承重墙共同承重，这样的承重模式导致结构整体的承重体系混乱，一二层承重构件不连续或承重构件变化；同时由于二层建筑面积的缩小，导致刚度出现变化，使得二层成为薄弱层。承重墙由于使用黄泥为砌筑砂浆，纵横墙无有效拉结，使得承重墙整体性差，较为松散，大震时承重墙易被破坏，显然这类建筑难以有效抵御地震作用。

（2）框架结构：本次地震中有个别框架结构倒塌，个别建筑出现承重构件开裂，多数震害主要体现于填充墙的破坏，主要是由于当地框架结构填充墙与框架均采用刚性连接，但使用的砂浆强度较低，部分建筑甚至缺少拉结筋，填充墙虽非承重构件，但其破坏影响居民心理且增加修复成本，应避免使用低强度空心砖与砌筑砂浆，严格按照规范增设拉结筋，采用 MU10 以上强度的砂浆作砌筑砂浆，可采用柔性连接的方式与框架进行连接。

（3）砌体结构：砌体结构在地震现场主要有两栋底框架砌体结构出现毁坏，梁柱节点破坏严重，其中一栋出现了局部倒塌，其余砌体结构的震害主要体现为墙体开裂，通过实地调查发现当地砌体结构多存在不

设构造柱或构造柱数量不足的问题。因其以砌体墙承重，更需应把控砌块和砂浆质量，并在墙角、纵横墙交接处及长度超五米的墙体中部设置拉结柱。

(4) 其他非承重构件及附属结构：受当地民俗传统影响，民用建筑多会加装风旗插口处的高墙和装饰性斗拱，土木结构的装饰性斗拱一般为木制，装在窗头或门头，砌体结构和框架结构的装饰性斗拱一般为混凝土制，女儿墙、风旗插口处的高墙与装饰性斗拱都与建筑主体拉结弱又处于建筑高位，在地震中易受“鞭梢效应”受损。同时，院落围墙由于不承重砌筑较为简单，独立旱厕也是采用简单的土坯砌筑结合木屋盖或轻钢屋盖较为松散，此次地震中也常见围墙与旱厕的破坏。

(5) 加固与新建建议：现存土木结构应加设钢管钢框架，改变承重体系，同时使用内外层钢丝网加固的方式提升墙体整体性。框架结构和砌体结构新建建筑应严格参照相关规范，需确保施工工艺合格、建材强度达标，以保障居民生命财产安全。

致谢

感谢中国地震局西藏定日地震现场工作队提供现场照片；感谢匿名评审专家的中肯宝贵的建议和意见。

Reference

- Bai, W. G., Sun, D. X., Wu, Z. H., et al., 2024. Overview of Historical Earthquake Disasters in Xizang Autonomous Region from 1949 to 2020. *Progress in Earthquake Sciences*, 54(10):712-720(in Chinese with English abstract).
- Basang, C. R., Guo, C. M., Deng, G. Y., et al., 2009. Analysis on Seismic Disaster Characteristics of Dangxiong M_s6.6 and Zhongba M_s6.8 Earthquake in Xizang. *Plateau Earthquake Research*, 21(03):64-69(in Chinese with English abstract).
- Cao, Z. Q., Huang, Q. J., Deng, G. Y., 1999. Estimation of Northern Xietongmen M_s6.1 Earthquake and Disaster. *Earthquake Research In Plateau*, (03):65-68(in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. K., Gao, W. P., Yao, X. Q., et al., 2012. Intensity Distribution and Tectonic Background Analysis of Sikkim 6.8 earthquake in Xizang, China. *Recent Developments in World Seismology*, (06):34(in Chinese with English abstract).
- Ciren, D. J., Wen, S. L., Zhang, J. L., 2017. Ananalysis on the Characteritics of Seismic Intensity and Seismic Damage about Dingqing M_s5.5 Earthquake in Xizang in 2016. *Plateau Earthquake Research*, 29(03):60-64(in Chinese with English abstract).
- Cui, Y., Yang, N., 2023. Structural Characteristics and Seismic Performance of Ancient Zang-style Architecture on Sloped Lands. *Journal of Building Structures*, 44(S2):20-31(in Chinese with English abstract).
- Du, Y. F., Li, F. Y., Han, B. D., et al., 2021. Earthquake Damage Analysis of Xizang Traditional Timber Frame Structures Subjected to the Xiahe 5.7 Earthquake. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 43(02):153-161(in Chinese with English abstract).
- Li, B. X., Wang, T. T., Zhao, K. P., et al., 2021. Typical Earthquake Damage of Traditional Xizang Dwellings and its Vulnerability. *Journal of Building Structures*, 42(S1):165-173(in Chinese with English abstract).
- Li, B. X., Zhao, K. P., Wang, T. T., et al., 2022. Structural Features and Seismic Performance of Xizang and Wellings in Amdo, Northwest Sichuan. *World Earthquake Engineering*, 38(02):21-28(in Chinese with English abstract).
- Li, J. J., Wang, X. K., Jin, H., et al., 2014. The Characteristics of Seismic Damage of Buildings Caused by 6.1 Earthquake in 2013 in Zuogong-Mangkang In Xizang. *Plateau Earthquake Research*, 26(02):49-54(in Chinese with English abstract).
- Li, Z. C., Wu, J., Li, C. L., 2018. Seismic Hazard Analysis of Building Structures for Milin M_s6.9 Earthquake, Xizang. *Recent Developments in World Seismology*, (12):2-9(in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Q., Hou, J. S., Li, Y., et al., 2013. Analysis on the Charateristics of the M_s7.0 Lushan, Sichuan Province, Earthquake Hazard on April 20, 2013. *Seismology and Geology*, 35(02):398-410(in Chinese with English abstract).

English abstract).

- Liu, K., Sun, B. T., Li, Y. G., et al., 2019. Study on the Relationship Between the Earthquake Damage Distribution and Geological Structure of the 2015 M_s8.1 Nepal Earthquake. *Journal of Natural Disasters*, 28(05):59-65(in Chinese with English abstract).
- Lou, Y. F., 2015. Seismic Behavior Analysis of Typical Single-Layer Masonry Structure in Xizang(Ph.D. Bachelor's thesis). Harbin :Harbin Engineering University(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Liu, A. W., Li, X. X., et al., 2021. Vulnerability Analysis of Typical Dwellings in Xizang Based on Earthquake Damage Data. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 16(02):245-252(in Chinese with English abstract).
- Wei, B. Y., Zhang, Y. M., Shi, F., et al., 2025. Analysis of Housing Damage and Casualties in the 2025 Xizang Dingri M_s6.8 Earthquake Based on Field Investigation. *Seismology and Geology*, 2025, 47(1): 64-79(in Chinese with English abstract).
- Wen, S. L., Tao, X. L., Cao, H. W., et al., 2010. Seismic Characteristic Analysis of Nima M_s5.6 Earthquake in Xizang. *Institute of Disaster-Prevention Science and Technology*, 12(01):36-39(in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. Q., Fei, M. L., Li, X., et al., 2008. The 2008 Dangxiong, Xizang, M_s6.6 Earthquake: Intensity and Disaster Characteristics. *Journal of Seismological Research*, 31(S2):575-584(in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. S., Wen, X. T., Xi, N., et al., 2025. Precise Positioning and Seismic Intensity of Aftershock Sequence of 2025 Dingri M_s6.8 Earthquake in Xizang. *Earth Science*, 1-16[2025-05-21](in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. L., Ni, M., Sijin, L. B., et al., 2021. Estimate of Seismic Intensity and Seismic Damage Analysis of M_s5.9 Earthquake in Dingri, Xizang. *Xizang Science and Technology*, (01):48-49+59(in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. X., Nie, G. Z., Tan, J. X., et al., Analysis on Disaster Characteristics of the M_s 5.4 Gangwu, Guangxi Earthquake, July, 31th, 2016. *Seismology and Geology*, 39(04):780-792(in Chinese with English abstract).
- Zhu, H. T., Yang, X. H., Zhou, X. H., et al., 2013. Analysis of Provenance Channel Characteristics of Continental Lacustrine Basin Based on Seismic Data: A Case Study of Dongying Formation on the Western Slope of Bozhong Sag. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2013, 38(01):121-129(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- 柏伟国, 孙东霞, 吴中海, 等, 2024. 西藏自治区 1949—2020 年历史地震灾害调查概要. 地震科学进展, 54(10):712-720.
- 巴桑次仁, 郭春明, 邓桂英, 等, 2009. 西藏当雄 6.6 级地震与仲巴 6.8 级地震震害特征分析. 高原地震, 21(03):64-69.
- 曹忠权, 黄庆江, 邓桂英, . 1999. 西藏谢通门县北 1998 年 7 月 20 日 6.1 级地震烈度及灾害损失评估. . 高原地震, (03):65-68.
- 陈宇坤, 高武平, 姚新强, 等, 2012. 印度锡金邦 6.8 级地震中国西藏地区烈度分布与构造背景分析. 国际地震态, (06):34.
- 次仁多吉, 文升梁, 张建龙, 2017. 2016 年西藏丁青 5.5 级地震烈度及震害特征分析. 高原地震, 29(03):60-64.
- 崔玥, 杨娜, 2023. 藏式山地古建筑结构特征及抗震性能. 建筑结构学报, 44(S2):20-31.
- 杜永峰, 李芳玉, 韩博登, 2021. 夏河 5.7 级地震藏式木构架房屋震害分析. 工程抗震与加固改造, 43(02):153-161.
- 李碧雄, 王甜恬, 赵开鹏, 等, 2021. 传统藏式民居的典型震害及易损性研究. 建筑结构学报, 42(S1):165-173.
- 李碧雄, 赵开鹏, 王甜恬, 等, 2022. 川西北安多藏式民居的结构特点及抗震性能. 世界地震工程, 38(02):21-28.
- 李佳辑, 王希康, 金花, 等, 2014. 2013 年西藏左贡与芒康交界 6.1 级地震的房屋震害特征. 高原地震, 26(02):49-54.
- 李宗超, 吴健, 李昌珑, 2018. 西藏米林 MS6.9 地震震害分析. 国际地震动态, (12):2-9.
- 李志强, 侯建盛, 李洋, 等, 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 MS 7.0 地震灾害特点分析. 地震地质, 35(02):398-410.
- 刘亢, 孙柏涛, 李亦纲, 等, 2019. 2015 年尼泊尔 M_s8.1 地震震害分布与地质构造关系研究. 自然灾害学报, , 28(05):59-65.

姜亚非, 2015. 西藏典型单层砌体民居抗震性能研究 (博士学士论文). 哈尔滨:. 哈尔滨工程大学.

王郁, 刘爱文, 李祥秀, 等, 2021. 基于震害资料的西藏地区典型民居易损性分析. 震灾防御技术, 16(02):245-252.

魏本勇, 张钰曼, 石峰, 等, 2025. 基于现场调查的 2025 西藏定日 Ms6.8 地震房屋震害与人员伤亡分析. 地震地质, 2025, 47(1): 64-79.

文升梁, 陶晓莉, 曹华文, 等, 2010. 西藏尼玛 5.6 级地震房屋震害特征分析. 防灾科技学院报, 12(01):36-39.

谢英情, 非明伦, 李西, 等, 2008. 2008 年西藏当雄 6.6 级地震烈度与震害特征. 地震研究, 31(S2):575-584.

徐志双, 文鑫涛, 席楠, 等. 2025 年西藏定日 Ms. 6.8 级地震余震序列精定位与地震烈度. 地球科学, 1-16[2025-05-21].

张建龙, 尼玛, 司金罗布, 等, 2021. 西藏定日 Ms5.9 地震烈度评定及震害特征分析. 西藏科技, (01):48-49+59.

周军学, 聂高众, 谭劲先, 等, 2017. 2016 年 7 月 31 日广西苍梧 5.4 级地震灾害特征分析. 地震地质, 39(04):780-792.

朱红涛, 杨香华, 周心怀, 等. 基于地震资料的陆相湖盆物源通道特征分析:以渤中凹陷西斜坡东营组为例. 地球科学(中国地质大学学报), 2013, 38(01):121-129.