

# 青海玉树地震村镇建筑震害分析及减灾措施

白国良<sup>1,2</sup>, 薛 冯<sup>1</sup>, 徐亚洲<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 2010年4月14日青海玉树发生7.1级地震, 造成大量建筑物损坏和倒塌。对玉树地震灾区各类建筑结构的震害进行了初步分析, 总结了此次地震的经验教训, 针对地震灾区村镇建筑提出了建议: (1)从结构抗震的概念设计着手, 合理的选择场地、结构类型和抗力构件布置; (2)“就地取材, 结合传统, 提高性能”, 研究适合当地的适宜性建筑结构抗震体系; (3)针对当地的地形地貌及地质条件、材料来源、建筑的传统性与民族性等特点, 整体规划, 编制适宜当地的建筑抗震设计标准图集; (4)培训施工人员, 规范村镇建筑施工; (5)加强村镇学校和医院等重要性建筑的抗震性能。

**关键词:** 玉树地震; 震害分析; 村镇建筑; 适宜性建筑结构

中图分类号: P315; TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)03-0309-07

北京时间2010年4月14日7时49分青海省玉树藏族自治州玉树县发生7.1级强震, 震中位于东经96.6度, 北纬33.2度, 震源深度14 km。截至4月25日17时, 地震造成2 220人遇难, 失踪70人, 受伤12 135人, 其中重伤1 434人。

据中国地震信息网提供, 截至2010年5月03日12时00分共记录到余震总数为1 652次, 3.0级以上余震15次, 其中6.0~6.9级地震1次, 5.0~5.9级地震0次, 4.0~4.9级地震4次, 3.0~3.9级地震10次, 最大余震为6.3级。

从地质构造上看, 青海玉树属于巴颜喀拉块体(图1)。1996年喀喇昆仑山发生的7级地震, 1997年西藏玛尼发生的7.5级地震, 2001年青海昆仑山口西发生的8.1级地震, 2008年3月新疆于田发生的7.3级地震, 以及2008年5月12日的汶川地震和这次玉树地震, 都是围绕巴颜喀拉块体的边界发生的<sup>[1]</sup>。而且玉树地处青藏高原块体(亦称其为“三江地震带”)的中部, 该板块的地质活动较为强烈, 中强度以上的地震在历史上持续不断。

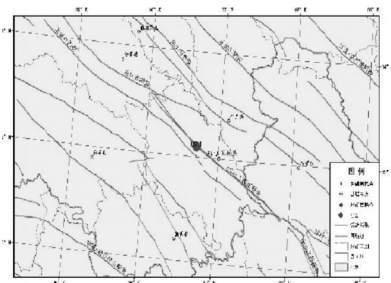
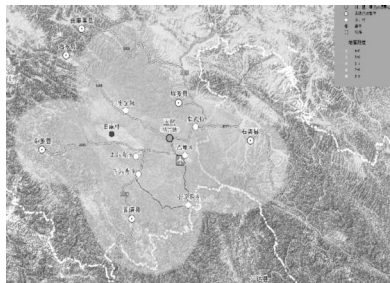
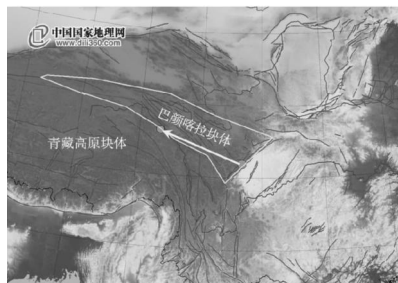


图1 玉树所处板块示意图<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Plate chart

图2 玉树地震烈度分布图<sup>[2]</sup>

Fig. 2 Map of seismic intensity

图3 震区断裂分布图<sup>[3]</sup>

Fig. 3 Seismic fracture distribution

这次地震发生在玉树州的州府所在地结古镇, 震中位于玉树县上拉秀乡日麻村。玉树地震基本是直立走滑断层, 即垂直于地面错动。而震中的错动, 几乎垂直于地表面, 且震中离地面约14 km, 所以震中

收稿日期: 2010-05-04 修改稿日期: 2010-07-12

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAK48B05); 陕西省自然科学基金重点研究基金重点项目(2009JZ012)

作者简介: 白国良(1955), 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 博导, 主要从事结构工程抗震方面的研究。

上拉秀乡日麻村全村无一伤亡,只是几家民房出现墙体裂缝.另外玉树地震的破裂方向沿东南方向走滑,地块的错动不再是垂直运动的,而是发生了一定角度的倾斜运动<sup>[4]</sup>.

从地理位置上看,玉树城区恰好位于震中东南方,其震害是沿着活动断裂呈带状分布(图 3),穿过了州政府所在地的结古镇,烈度达到了 IX 度(图 2);而玉树地区抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度值为 0.15 g.此次地震波及范围约 3 万 km<sup>2</sup>,主要造成玉树县的结古镇、隆宝镇、仲达乡和称多县及四川甘孜州受灾,受灾人口约 20 万,重灾区面积约 4 000 km<sup>2</sup>,极重灾区约 900 km<sup>2</sup>,主要集中在玉树州府所在地的结古镇.由于震区各地海拔高,交通不便,经济条件落后,当地建筑主要采用生土、木、砖石、砌块等建造的土木结构、砖木结构、砖混结构房屋,砂浆含泥量大,甚至全用泥来粘接,使砖、砌块之间粘结力差,受剪、受弯、受扭能力差.房屋大都未经过建筑设计和抗震设计,凭借经验建造,甚至没有必要的抗震构造措施,加上施工质量差,这些类型结构的震害最为严重.很多房屋在地震瞬间化为废墟.玉树县第三完全小学 18 间平房教室全部倒塌了,占了全部教室的 80%,仅剩的两栋教学楼没有倒塌,但也出现严重裂缝<sup>[5]</sup>;扎西大通村几乎被夷为平地(图 4);玉树州职业学校,校舍倒塌亦很严重.

### 1 各类建筑物震害情况

玉树地震灾区房屋结构类型主要有土木结构、砖混结构、钢筋混凝土框架结构等,其中农村地区大部分为土木结构房屋,城镇房屋土木结构占 70%以上,砖木结构和砖混结构约占 20%左右,钢筋混凝土框架结构约占 10%.地震造成大量房屋被破坏,重灾区垮塌的房屋主要是土木、砖木结构的房屋,极灾区结古镇的土木、砖木结构房屋几乎全部倒塌或严重破坏,砖混结构房屋 80%以上倒塌,框架结构房屋约 20%倒塌<sup>[6]</sup>.

#### 1.1 土木结构房屋

在玉树地震区,农村地区大部分为土木结构房屋,城镇房屋土木结构占 70%以上,这种房屋采用土墙支撑木屋架.墙体为土坯、土块砌墙,或土夯墙(干、湿打垒墙);屋盖及梁为木质结构(图 5).这类房屋由于屋架放置在外纵墙上,整个屋面和屋架在水平晃动时所产生的横推力靠外墙承担<sup>[7]</sup>,而土墙抗剪和抗扭能力差,梁、柱不能和土墙很好地连接.在地震力的作用下,墙体产生竖向裂缝或塌落(图 6),纵横墙体的交接处极易产生竖向裂缝、靠近山墙处出现斜裂缝(图 7),强震时会变为废墟.地震时屋盖系统与土坯墙体之间连接很弱或无连接,很容易错位,导致斜坡屋面易滑落、倒塌(图 8).



图 4 扎西大通村满目疮痍  
Fig. 4 The Village devastated



图 5 震前的土木结构房屋  
Fig. 5 The preseismic adobe timber structure



图 6 房屋倒塌  
Fig. 6 Houses collapsed

#### 1.2 砖木结构

砖木结构是指以砖作外墙,木质门窗、屋顶构成的房屋.其结构刚度较小,柔性较好,承受竖向地震力的能力较强.砖木结构房屋的梁与柱的节点及柱的跟部是房屋结构受力较大的部位,这些部位的牢固程度和结构整体的强度,是砖木结构房屋抗震性能和抗震效果好坏的关键<sup>[8]</sup>.

在玉树震区,多数砖墙因砌筑砂浆含泥量高,造成砂浆的胶结能力差,墙体的抗剪能力低下,在地震中遭到毁灭性的破坏(图 9).纵横墙连接不牢,甚至在施工时未留马牙槎、无拉接措施等,且屋盖与墙体

连接较差或基本无连接, 纵墙外闪使屋架塌落(图 10). 由于墙体水平剪切破坏, 在靠近屋盖的墙体出现水平裂缝. 未设置圈梁-构造柱等连接构造措施, 房屋整体性差, 容易遭受破坏.



图 7 气象局旁山墙开裂

Fig. 7 Gable craze



图 8 屋架檩条坠落

Fig. 8 Roof purlin fell



图 9 变成废墟

Fig. 9 Ruins

1.3 砖混结构民宅

近年来由于经济发展, 当地少部分富裕起来的居民兴建了低层砖混结构住宅, 主体结构以砖砌体为主, 楼板、屋盖用预制板或现浇制作. 在地震的反复作用下, 在较薄弱的窗下墙出现“X”状裂缝(图 11). 当水平地震力的方向垂直于纵墙时, 纵墙的墙面向外弯曲, 沿墙体下方易出现贯穿性水平裂缝. 楼板及屋盖多采用预制预应力圆孔板拼装, 预制板内钢筋太少, 在地震作用下被剪断(图 12). 而且只浮搁在砖墙上, 未采取任何与墙体的连接构造措施, 在地震作用下层层叠加压下来, 杀伤力极强(图 13、18), 俗称死人板. 平面布局不合理, 角部由于应力集中发生破坏(图 14). 局部突出或附属结构如烟囪、女儿墙等, 由于连接薄弱、刚度突变、鞭梢效应影响严重, 容易产生破坏. 部分房屋有圈梁而无构造柱, 致使地震时墙体失去围箍约束而倾覆、倒塌, 圈梁也脱落下坠<sup>[9]</sup>(图 15). 在节点处受力复杂, 出现破坏(图 16). 部分建筑因功能需要, 开间大, 门窗面积设置过大, 使(门)窗间墙过窄发生剪切破坏(图 17).



图 10 房屋外纵墙外闪倾倒

Fig. 10 Vertical wall flash dump



图 11 窗下墙出现 X 形裂缝

Fig. 11 X cracks under the window wall



图 12 预制楼板被折断

Fig. 12 Damage of the precast slab



图 13 预制楼板下坠

Fig. 13 Damage of the precast slab



图 14 L 型房屋角部破坏

Fig. 14 Damage of the L-houses



图 15 墙体倒塌后圈梁下坠

Fig. 15 Ring beam fall after wall collapse



图 16 节点发生破坏  
Fig. 16 Damage of the joints



图 17 底层窗间墙破坏  
Fig. 17 Damage of the bottom wall  
between windows



图 18 预制板叠压  
Fig. 18 Overlying the precast slab

1.4 混凝土空心砌块结构

在震区混凝土空心砌块结构的房屋分布也较广.砂浆含泥量较大,强度很低(图 21),砌体墙内及纵横强之间没有设置拉结钢筋、或拉接强度低于竖向拉应力时,墙体就会发生水平裂缝,甚至产生酥裂、乃至散落,引起屋顶局部塌落或倒塌(图 19、图 20).在该类结构中,也很少设置圈梁-构造柱,使墙体产生斜向裂缝(图 22).采用现浇钢筋混凝土屋盖时(图 23),楼盖较厚,其自重较大,水平地震作用大,而墙体受剪、受拉性能较差,发生墙倒而屋盖整体下坐.



图 19 未设构造柱导致破坏  
Fig. 19 Damage without tie column



图 20 气象局办公室墙面出现裂缝  
Fig. 20 Damage of the wall



图 21 用泥土堆砌砌块  
Fig. 21 Pile masonry with mud



图 22 墙体的斜向裂缝  
Fig. 22 Inclined crack



图 23 墙倒导致楼盖塌落  
Fig. 23 Damage of the wall



图 24 上部砌体出现裂缝  
和破坏  
Fig. 24 Damage of the upper  
masonry structure

1.5 框架-砌体混合结构

由于经济原因,当地建筑结构很少采用混凝土框架结构,只在城镇繁华地段的临街部位较常见,底层用于商店或门房,上层则为住宅或其他用途.框架和砌体承重墙抗侧力构件的承载能力和变形能力很不协调,两部分刚度相差大,有头重脚轻的弱点,主要震害有:底部框架柱承受巨大的压、弯、剪作用而破坏,甚至二层直接变为一层,或上部砌体出现不同程度的破坏(图 24).

2 震害原因分析

2.1 地震特点

此次地震为 7.1 级强震,震源深度 14 km,属浅源地震,地震能量释放迅速,建筑物的反应强烈;另外余震多持时长,最大余震为 6.3 级,加重了对建筑物的破坏.玉树属于高海拔地区,地形以山地为主,平均海拔 4 493 m,位于甘孜-玉树-风火山断裂带,属于巴颜喀拉地块南边界,该板块的地质活动较为强烈.

2.2 抗震概念设计及构造设计

由于处于偏远山区,交通不便利导致水泥等建材价格较外地高出一倍多,按抗震设计,其造价远远高出当地居民的经济能力,加上本身的经济条件落后,导致当地人们在建房很少进行建筑规划和结构抗震设计,造成的工程质量和抗震设防隐患.结构布局不合理:村镇房屋中相当一部分是根据经验自行设计和施工的,往往造成建筑平面布置不规则,竖向布置上有突出,导致结构刚度突变<sup>[10]</sup>(图 25),再加上房屋本身没有进行抗震设计,地震时受扭转效应的不利影响,从而导致房屋容易发生破坏倒塌.许多砌体结构未设构造柱和圈梁,从而降低房屋的整体性和刚度.部分结构设置了构造柱和圈梁,但其布置和构造不合理.部分门窗洞口处未设置过梁,在地震作用下极易发生破坏.另外在梁下未放置垫块,应力集中使墙体破坏.

2.3 场地的影响

玉树属于高海拔地区,地形以山地为主,大多房屋依山而建,但还有部分房屋选址建在山顶或地形变化剧烈的不利地方(图 26),由于地形对地震波的放大作用使地震作用加强,房屋更易遭受破坏.另外建在地震断裂带上的建筑破坏较严重.

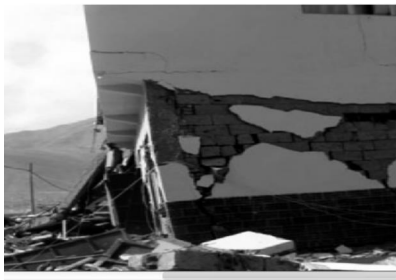


图 25 二层外挑  
Fig. 25 Overhung

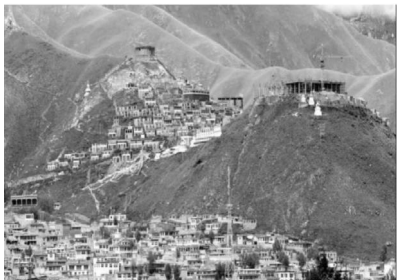


图 26 在山顶选址建房  
Fig. 26 Buildings on the hilltop

2.4 施工质量差

由于村镇建筑施工队伍的技术水平不高,质量意识差,质量达不到房屋质量抗震设防要求.凭经验确定砂浆配合比,使砂浆强度低于砖的强度,墙体的承载力就主要取决于砂浆强度;混凝土的配制不做计量,水灰比过大,强度降低,大大降低了结构的抗震性能;部分震区采用泥来沾结砖体、空心砌块,甚至干砖上墙,墙体整体性差.砌墙过程中,砂浆只涂在砖边沿,未填饱满,有的墙面砌筑很不平整,形成鼓包墙<sup>[11]</sup>;砌筑方法不正确,特别是砖墙转角处、纵横墙交接处没有咬槎砌筑(如采用马牙槎)和无拉结钢筋的现象极为普遍.

3 结论和建议

(1)抗震概念设计.首先应慎重选择建筑场地:好的场地可以缓解地震波的冲击,减轻震害.不要在山顶、山脊上选址建房,避开不稳定的斜坡、陡崖及断裂带<sup>[11]</sup>.其次选择合适的结构外形.震害表明体型

简单规则的工程结构,在地震中破坏较轻,所以工程结构的平面布置应尽量简单规则,竖向布置和质量应均匀与连续,尽量避免刚度突变或结构不连续。

(2)大多数村镇建筑结构未进行抗震设计或设计不合理,在地震中破坏严重.加强村镇建筑结构的抗震设防管理,通过合理的结构设计,慎重选择结构类型,确定合理的结构布局,即注意刚度协调,防止发生局部的过刚过柔、互相矛盾而产生薄弱层;加强抗侧力结构构件,增强结构变形能力;重视节点和连接构造的设计,提高建筑结构的整体性。

(3)保证建筑材料质量.当地有可用于建筑的砂石等,应就地选用,但要保证其杂质含量符合一定标准.对于夯土墙应掺入麦秸、竹杆等以增强黏结,提高强度,这样可适度提高结构的抗震性能,但受到较大震级时,依然会倒塌甚至变成废墟.因此,充分利用当地的建筑材料,研究出适合当地特色的新型结构抗震体系,已经成为必然需求.例如在土木结构、砖木结构中增加圈梁-构造柱体系,增强房屋的整体性,提高结构的抗震性能。

(4)学校、医院等生命线工程的建筑,因其功能需要,一般选用大开间的结构体系,抗震能力被削弱.应严格按照抗震规范进行抗震设计,必要时将其抗震设防烈度提高一度,并采取必要的抗震构造措施,保证施工质量,让其成为地震中的庇护所.对已有结构应研究给出相关的抗震鉴定加固规定,提出适宜的抗震加固方法<sup>[12]</sup>。

(5)政府给予适当建房补贴.由于道路闭塞,部分建材成本翻倍,在玉树,水泥价格约 40 多元,在西宁不到 20 元;在玉树,工人日工资为 80 元,在西宁约 40 元.近两年玉树房屋的造价还在提高,每平方米需要 1 200 多元<sup>[6]</sup>.价格高昂,超过当地居民的经济承受能力,给予他们经济补助,提高其住房的抗震性能。

(6)改善或改变传统不合理建筑方式,提高结构抗震性能.根据当地经济及资源等,研究和制定针对当地适宜性建筑结构类型和标准抗震图集,建造“抗震样板房”,并全面推广应用。

(7)村镇房屋的抗震不单是一个工程技术课题,而是一个包括经济、管理、政策、技术等多方面内容的综合性课题.政府应加大对施工人员的培训与管理,加强对地震活动高危区居民的防范意识进行有效的教育,并整体规划当地建筑布局,严格加强村镇建筑设计、施工和工程质量的监督管理。

本文中的部分图片来自于中新网、凤凰网等,在此对图片的拍摄者表示感谢。

## 参考文献 References

- [1] 孙自法,周兆军.玉树所在巴颜喀拉块体地震比较活跃[N/OL].[2010-04-14].<http://chinanews.com/gn/news/2010/04-14/2226029.shtml>.  
SUN Zi-fa,ZHOU Zhao-jun. In Yushu BaYanKaLaBlock earthquake is more active[N/OL].[2010-04-14].<http://chinanews.com/gn/news/2010/04-14/2226029.shtml>.
- [2] 中国国家地理网.青海玉树县 7.1 级地震[EB/OL].[2010-04-15].<http://bbs.dili360.com/thread-169977-1-1.html>.  
Chinese National Geography Network. The 7.1 earthquake in Yushu County of Qinghai Province[EB/OL].[2010-04-15].<http://bbs.dili360.com/thread-169977-1-1.html>.
- [3] 中国地震信息网.震区活动断裂分布图[EB/OL].[2010-04-14].[http://www.csi.ac.cn/manage/html/4028861611c5c2ba0111c5c558b00001/\\_content/10\\_04/1271221655504.html](http://www.csi.ac.cn/manage/html/4028861611c5c2ba0111c5c558b00001/_content/10_04/1271221655504.html).  
Chinese Earthquake Information Network. Seismic fracture distribution[EB/OL].[2010-04-14].[http://www.csi.ac.cn/manage/html/4028861611c5c2ba0111c5c558b00001/\\_content/10\\_04/1271221655504.html](http://www.csi.ac.cn/manage/html/4028861611c5c2ba0111c5c558b00001/_content/10_04/1271221655504.html).
- [4] 佚名.震中地块垂直错位破坏小[N].新快报,2010-04-21(A10).  
Anon. Small vertical displacement damage in epicenter plot[N]. The New Dispatch, 2010-04-21(A10).
- [5] 陆海峰,于佳.玉树县第三完小已有 35 人遇难[N].青年时报,2010-04-15(A4).  
LU Hai-feng,YU Jia. 35 people have been killed in the third elementary school of Yushu[N]. Youth Times, 2010-04-15(A4).
- [6] 曾向荣,张强.最牛房屋扛住 7.1 级地震[N].广州日报,2010-04-22(A8).

- ZENG Xiang-rong, ZHANG Qiang. The house carry 7.1 earthquake [N]. Guangzhou Daily, 2010-04-22(A8).
- [7] 魏英祖, 郭金贵. 西北地区农村房屋抗震设防现状及对策 [J]. 西北地震学报, 2005, 27(4): 351-356.  
WEI Ying-zu, GUO Jin-gui. Present situation and countermeasures of earthquake resistance protection for village houses in northwestern China [J]. NORTH WESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL, 2005, 27(4): 351-356.
- [8] 石盛昌, 曹 阳. 沈阳市农村民居建设现状及抗震设防对策 [J]. 东北地震研究, 2008, 24(3): 77-80.  
SHI Sheng-chang, CAO Yang. Seismic fortification countermeasure for Shen Yang rural buildings [J]. Seismological Research of Northeast China, 2008, 24(3): 77-80.
- [9] 徐有邻. 汶川地震震害调查及对建筑结构安全的反思 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 11-47.  
XU You-lin. Damage investigation and analysis of engineering structures of safety in the Wen chuan earthquake [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009: 11-47.
- [10] 杨海丽. 提高村镇建筑抗震设防能力的基本对策 [J]. 邢台职业技术学院学报, 2006, 23(3): 91-92.  
YANG Hai-li. The Basic Countermeasures of improving the ability of earthquake resistant building in the country [J]. Journal of Xingtai Polytechnic College, 2006, 23(3): 91-92.
- [11] 刘 莹, 杨 柳. 我国村镇房屋抗震设计分析与研究 [J]. 中外建筑, 2009(9): 181-182.  
LIU Ying, YANG Liu. Analysis and research on seismic design of China's town housing [J]. Chinese and Overseas Architecture, 2009(9): 181-182.
- [12] 李英民, 韩 军, 刘立平, 等. “5·12”汶川地震砌体结构房屋震害调查与分析 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(5): 606-611.  
LI Ying-min, HAN Jun, LIU Li-ping, et al. Investigation and analysis of masonry building damage caused by the 5·12 Wenchuan earthquake, Sichuan Province [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 41(5): 606-611.

## Seismic damage analysis and reduction measures of buildings in village and town in the Yushu Earthquake

B AI Guo-liang<sup>1,2</sup>, XUE Feng<sup>1</sup>, XU Ya-zhou<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

**Abstract:** On April 14, 2010, a 7.1 magnitude earthquake occurred in Yushu, Qinghai Province, causing the collapse and damage of a large number of buildings. Based on the relative reports and information, the seismic damage cases for the different structural types in this earthquake are analyzed. While the lessons and experiences are summarized, several suggestions are presented: starting the project with the conception design, and choosing the most appropriate site and structure layout; obtaining material from local resources to improve performance and researching a proper local building a seismic system; observing the local topography and geological conditions, source of materials, building traditions and nationality, etc. Making an overall plan, drawing up a standard local seismic atlas, training the construction workers, specifying the construction of buildings in villages and towns; reinforcing the seismic performance of buildings of great importance such as village schools and hospitals.

**Key words:** Yushu earthquake; seismic damage investigation; buildings in villages and towns; appropriateness of structures