

文章编号: 1007-6069(2018)03-0046-06

# 江西省既有生土结构房屋抗震性能及加固方法

陈宝魁<sup>1</sup>, 史雨萱<sup>1</sup>, 熊进刚<sup>1</sup>, 石岩<sup>2</sup>, 周强<sup>1</sup>, 陶文翔<sup>1</sup>

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 生土结构房屋具有取材方便以及造价低廉等特点,在我国村镇仍有使用。鉴于多次地震中生土结构民房震害严重,生土结构房屋的抗震安全问题显得尤为重要。首先,以江西省内村镇生土结构房屋为对象,结合震害分析和实地调研等,详细总结生土结构房屋的结构缺陷与抗震性能;其次,基于国内外研究现状及工程实例,概述生土结构房屋抗震性能的改进方法与加固手段。

**关键词:** 生土结构; 抗震性能; 加固方法; 村镇民居

中图分类号: TU361

文献标志码: A

## Seismic behavior and strengthening method of existing raw-soil structure houses in Jiangxi province

CHEN Baokui<sup>1</sup>, SHI Yuxuan<sup>1</sup>, XIONG Jingang<sup>1</sup>, SHI Yan<sup>2</sup>, ZHOU Qiang<sup>1</sup>, TAO Wenxiang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The raw-soil structure houses have been often used in our villages by the characteristics of convenient construction and low cost. In view of the serious earthquake damage of the raw-soil structure houses in many earthquakes, the seismic safety of the houses becomes especially significant. Firstly, based on the earthquake damage analysis and field investigation, the structural defects and seismic behavior of the raw-soil structure houses in Jiangxi Province were summarized. Secondly, based on the research status and engineering cases at home and abroad, the improved methods of seismic behavior and the seismic strengthening methods of raw-soil structure houses were summarized.

**Key words:** raw-soil structure; seismic behavior; strengthening method; village dwelling

## 引言

生土结构房屋具有就地取材、施工简便、热工性能好等优点,上世纪80年代前在我国很多地区被广泛使用。生土是一种低能耗建筑材料,没有废物处理问题,拆除后土坯墙体可以还原于耕地,不对环境造成危害,符合当前国家对建筑行业绿色发展的要求。另一方面,村镇传统民居一般具有鲜明的地方特色,有利于保护乡村的传统风貌,如江西省内生土结构传统民居具有明显的客家风格,更包括富含人文气息的客家围

收稿日期: 2018-02-07; 修订日期: 2018-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助(51608249); 住房和城乡建设部研究项目(建村[2017]1-18); 江西省教育厅青年科学技术研究项目资助(60221); 甘肃省高等学校科研项目

作者简介: 陈宝魁(1982-),男,博士,讲师,主要从事结构抗震研究。E-mail: baokui\_2000@163.com

通讯作者: 熊进刚(1970-),男,博士,教授,主要从事结构抗震研究。E-mail: xiongjingang@ncu.edu.cn

屋,白墙灰瓦与周围秀丽的乡村景色浑然天成。然而,从房屋的抗震性能角度考虑,生土结构房屋普遍存在墙体举架高、开间大以及材料强度低,房屋整体稳定性差等抗震安全隐患。

住房和城乡建设部村镇建设司于2010年组织国内多家单位调查(覆盖全国28个省、104个县、10.7万农户)发现,中国村镇生土结构房屋总量约3800万户,所占比例约为16.4%;其中危房占既有生土结构房屋的比例高达37.8%<sup>[1]</sup>。课题组近年对江西省内10个县90余个自然村展开调查发现,江西省内村镇生土结构房屋约占5%(赣州地区比例较高)<sup>[2]</sup>,多建于上世纪80年代以前,并且普遍存在使用和安全问题。由于村镇生土结构房屋存在年代久、材料强度低等问题,在历次地震中震害严重。如在2003年6.8级的新疆巴楚地震中,琼库恰克乡中土坯墙承重和屋面为硬山搁檩构造的生土房屋,因墙体碎裂导致此类房屋绝大多数倒塌破坏<sup>[3]</sup>。在2003年甘肃民乐-山丹地震中,生土结构房屋作为当地村镇的主要结构形式,震害非常严重,在极震区大部分生土结构房屋发生倒塌。房屋的震害形式主要表现为结构倒塌、屋盖坠落、墙体破裂、酥碎、倾斜、山墙与横墙分开、砖柱与墙体脱离,墙体与屋盖系统搭接处以及纵横墙的咬合处破坏严重等<sup>[4]</sup>。2005年发生在江西省的5.7级九江地震,造成较大人员伤亡与重大经济损失,共倒塌房屋1.8万间,其中生土结构房屋破坏严重<sup>[5-6]</sup>。在2008年汶川地震中,生土结构房屋存在较多墙体破坏情况,主要包括纵横墙连接破坏和山墙破坏等<sup>[7]</sup>。2011年3月11日在云南省盈江县发生的5.8级地震中,生土结构房屋受损严重,大部分土坯墙体倒塌<sup>[8]</sup>。在2016年甘肃岷县漳县6.6级地震中生土结构农房(土墙承重木结构屋盖),由于墙体强度低、屋面结构与墙体连接不牢固、屋顶铺设较厚草泥混合面层等原因,导致此类房屋大多倒塌或局部倒塌<sup>[9]</sup>。综上所述,通过现场调研与以往震害调查发现,生土结构房屋普遍存在结构整体性差、抗震能力低,特别是使用年代久的房屋存在较大地震安全隐患。因此,村镇生土结构传统民居的抗震性能研究应被予以重视,并及时加固维护。

近些年,随着对村镇房屋抗震性能的关注,国内外一些学者为了提高生土结构房屋的材料性能<sup>[10]</sup>,已在生土材料的化学改性和物理改性方面展开研究。并且,针对生土结构房屋的构造特点,就其抗震性能与加固方法展开研究,并取得较大进展<sup>[11-12]</sup>。考虑各地区的气候特点、建筑风貌各不相同,重点考察江西省村镇生土结构房屋的结构特点与抗震缺陷,针对性的提出合适的改进方法与加固手段。

## 1 江西省既有生土结构房屋抗震性能

### 1.1 房屋构造

江西省内生土结构房屋一般为2层,部分墙体中设有木柱,但大多未设;木楼板,屋盖为硬山搁檩,檩条上铺设木板条做椽子使用,冷摊瓦屋面,如图1-2所示。虽然房屋举架高以及开间大的特点,有利于使用与通风,但也降低了房屋的整体稳定性,进而影响房屋的抗震能力。肖梅玲等<sup>[13]</sup>利用数值模拟,对村镇房屋的地震反应进行分析,发现随墙高增加,结构的抗震能力明显降低,并提出减小层高的建议。另外,硬山搁檩的屋架结构形式,在山墙上直接放置木檩,这种结构虽然施工简易和节约材料,但对房屋的水平约束能力弱,导致结构整体性差,不利于抗震。阿肯江·托乎提等<sup>[14]</sup>研究发现木屋架和土坯墙体联结并不牢靠,相当于将墙体分割,在水平地震作用下易产生应力集中,降低土坯墙的受力变形能力。



图1 江西省某生土结构房屋

Fig. 1 Raw-soil structure houses in Jiangxi



图2 屋面构造

Fig. 2 Roof construction

此外,土坯砌体墙经常存在砖砌体与土坯砌体、石块与土坯砌体混合砌筑情况,由于不同墙体材料之间的连接性相对较差,将一定程度上削弱房屋的抗震性能。另外,生土结构房屋的门窗大多未设过梁,洞口位置墙体易产生裂缝,并且房屋未设置圈梁和构造柱等对墙体起拉结作用的构造,地震中土坯砌体易塌落,甚至墙体整体倒塌。

### 1.2 材料不耐侵蚀

土坯砖与砌筑泥浆均为生土材料,耐水性差。江西省村镇生土结构民房大多建于80年代以前,如果维护不当,生土墙体受雨水与风化侵蚀严重(如图3所示),如砖缝之间灰浆软化流失和墙脚位置碱蚀硝化等,造成墙体受力性能削弱。另外,传统屋面土瓦强度低,易损坏,可能导致屋顶木质构件和生土墙体被雨水侵蚀,应定期检查或更换耐久性更好的树脂瓦、琉璃瓦等。

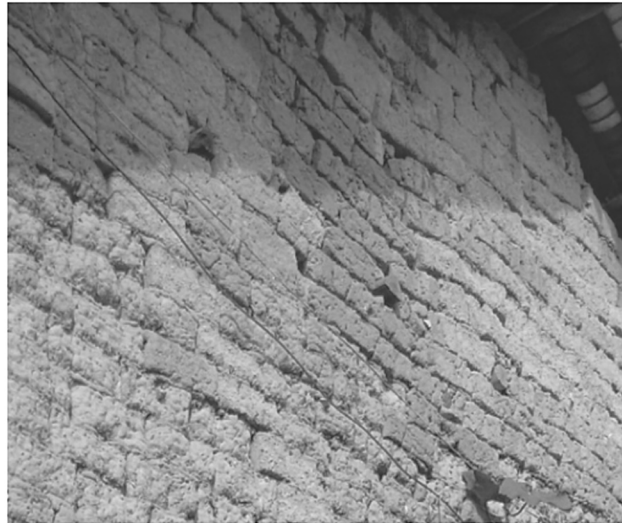


图3 生土砌体墙面被侵蚀风化

Fig. 3 Weathering erosion of raw-soil wall

### 1.3 选址与地基处理

村镇房屋修建缺乏规划与勘察,如选址不当,将造成安全隐患。生土结构农房的整体性较差,如直接建在回填土或其它软土地,易产生不均匀沉降,造成墙体开裂。另外,部分房屋选址未考虑水系季节变化或排水设施建设不当,在潮湿环境下,土坯墙体易被侵蚀。

## 2 生土结构房屋材料改良及抗震加固方法

国内外研究学者追根溯源,从抗震性能影响因素上寻求改善生土结构房屋抗震能力的方法。目前,主要研究集中于对生土材料与土坯砌体的改良,以及既有结构的抗震加固方法。

### 2.1 生土材料性能改良研究

作为生土结构房屋的主材,无论是从微观上改良材料性能,还是从宏观上改善土坯砌体的制作与砌筑方式,均可以直接改善承重墙体的受力性能,不同程度地提高生土墙体的抗震性能<sup>[15-16]</sup>。相关研究发现不同原料及掺料、不同掺量配比、颗粒级配、不同含水率均对土坯砖试件的力学性能和耐久性产生影响<sup>[17]</sup>。

生土结构房屋通常就地取材,使用天然土壤修建,工匠在制作土坯砌块的过程中已发现在生土中适量加入石灰、稻草、麦糠、粗砂和麦秸秆等材料,可以提高土坯砌体的强度。国内外学者从化学改性与物理改性方面加深研究,尝试在生土中加入不同材料,并研究其对土坯砌块和墙体受力性能的影响。如长安大学王毅红等<sup>[18]</sup>通过试验对改性后生土试件的受压受剪性能进行了测定,分析土的种类、掺料、含水率以及材料配合比等对生土砌体力学性能的影响,并提出在土坯砌体中加入传统掺料秸秆,可以提高砌体的变形能力及强度。另外,发现在生土中掺入灰土,可以提高砌块的抗剪承载能力,但脆性增大。新疆大学阿肯江·托乎提等<sup>[19]</sup>通过用湿法制作六块土坯试件(部分加入不等量的麦秸秆)并进行抗压强度试验,发现该掺料对湿制法所制作的土坯砌体抗压强度影响并不大;房彦山等<sup>[20]</sup>通过制作了4组24个双剪试件,通过抗剪试

验,发现生土料和砌筑泥浆加入秸秆后对试件抗剪性能有一定提高,并且建议对土坯砌体与泥浆进行同时改性,有利于增加二者的工作协同性,提升生土墙体的抗震和抗剪性能。刘俊霞等<sup>[21]</sup>也根据实验得出黄麻纤维、秸秆纤维的优化掺量;陶忠等<sup>[22]</sup>在土坯试件中掺入松针,并变化配合比,对试件进行抗压、抗剪与抗折实验,验证了松针可以提高土坯强度,并给出了松针的最优掺料量。

近年,随着研究人员对生土材料物理、化学改性方面研究的不断延伸,发掘出了更多创新实用的掺入材料,如生石灰、水泥、水玻璃、粉煤灰和废弃矿渣等。沈阳建筑大学马建飞<sup>[23]</sup>在生土坯中加入了水泥、石灰、植物纤维、工业废渣(煤渣、炉渣、粉煤灰等的组合)和珍珠岩保温剂等材料,并制作不同配合比的土坯试件,进行材料与力学性能试验,发现加入新型改性材料可以提高土坯砌体的力学性能;陈秋雨等<sup>[24]</sup>使用工业副产品磷石膏与粉煤灰、石灰、水泥等的单掺、双掺、复掺方式对生土材料进行改性,并发现生土中单掺水泥时,砌体的强度将随掺量增加而提高,复掺定量的上述材料也能使试件抗压强度增大;Degirmenci<sup>[25]</sup>同样提出向土坯中加入废磷石膏和天然石膏,并发现随掺料含量的增加,试样的干燥收缩量将减少,证明其是一种稳定的替代材料;周铁刚等<sup>[26]</sup>提出了一种新型绿色生土建筑,石膏-土坯墙生土结构民居,并对其做抗震性能试验研究。综上可见:现代生土结构房屋,应在传统建造工艺基础上,结合目前的研究成果,更合理地对生土材料进行改性,以提高土坯砌体的力学性能,以及生土结构房屋的抗震性能。

## 2.2 生土结构农房加固方法

目前,国内外已提出一些既有生土结构房屋抗震加固的方法。针对江西省内生土结构房屋的构造缺陷,从易施工、造价低以及效果好等方面考虑,总结适合本地区生土结构房屋的抗震加固方法。

针对土坯砌体墙稳定性差,墙体材料被侵蚀后强度下降的情况,可以通过钢筋网水泥砂浆层加固法、增设木圈梁和构造柱等方法,有效提高土坯墙体的整体性,增强房屋的抗震性能。如Yamin等<sup>[27]</sup>提出设置水平与竖向钢丝网带,或使用竖、横向木条加固生土墙体的方案,并证明了其对增强房屋抗震能力的有效性;Yorulmaz<sup>[28]</sup>提出在生土结构房屋外墙加设多道圈梁的方案,用于提高墙体的整体稳定性,在地震中可以有效防止砌体塌落或结构倒塌;朱伯龙等<sup>[29]</sup>对经钢筋网水泥砂浆加固后的横、纵墙做推压试验,发现加固后墙体的抗震能力明显提高,对质量差的房屋效果尤为显著;西南交通大学许浒等<sup>[30]</sup>提出采用薄壁型钢条带加固生土墙体、角钢加固屋盖和独立柱的方案。该方法具有成本低和易施工的优点,并通过数值计算证明了其有效性。

针对本地区生土结构房屋硬山搁檩式屋架与墙体连接不牢固、稳定性弱的问题,可通过增设扶壁柱和木圈梁的方法加固,并在木柱和屋盖间加设角钢等有效支撑等方法。张琰鑫等<sup>[31]</sup>提出应在夯土住宅中檩子与生土墙连接部位搁置弧形垫块,在山墙中部等结构薄弱部位外设扶壁柱和纵墙顶设木圈梁等,并且通过数值模拟等方法验证了这些加固方法的有效性;于文等<sup>[32]</sup>结合实际工程与振动台试验,针对生土结构房屋,提出了一些有效的加固方法:(1)沿生土墙体加设角钢带。(2)木柱和屋盖间加设角钢支撑。(3)木垫梁与木檩条用扒钉拉接。(4)屋盖增设扁钢带。

针对生土结构房屋的耐久性问题,首先,应根据当地气候与水文情况,正确选址;其次,应在房屋外设置散水和排水沟等设施,有效排水防潮;使用耐久好和强度高的屋面瓦,外墙粉刷防水涂料等也能有效的增强房屋的耐久性。此外,可以参考国内外相关研究成果,不断增进生土结构房屋的耐久性。Blondet等<sup>[33]</sup>探讨了生土结构耐久性的问题,以及对土坯结构抗震性能的影响,创新地提出了内部添置藤网、电线、PVC水管和塑料网等废弃工业原料的加固措施。兰州大学孙满利等<sup>[34]</sup>创新地提出,使用木质锚杆加固生土遗址的方法,并取得理想的应用效果;卜永红等<sup>[35]</sup>也提出了一种内置绳网的夯土墙体建造技术,并通过试验证明该新型墙体比生土墙体拥有更强的整体性和抗震能力。

另外,有研究者发现,生土墙体自身强度也与砌筑形式有关,相较于灰缝会出现无浆或少浆现象的立砌法砌筑,平砌法更能保证土坯墙体的抗剪强度和抗震性能。外墙表面使用防水材料、以及加强房屋屋面防水措施也可减缓墙体材料的老化与自然侵蚀。另有相关学者们也提出生土墙体使用草绳拉结、增设斜撑、新增抗震墙和配筋砂浆带等可行的生土结构民房抗震加固措施。

## 3 结语

村镇传统民居一般具有鲜明的地方特色,保留这些建筑形式,有利于保护乡村的传统风貌。目前,全国

各地仍有较多生土结构房屋被居住使用,其中部分房屋抗震性能过于薄弱。针对江西省内生土结构房屋的具体抗震问题,以及国内外现有研究成果,提出以下建议:

(1) 江西省内生土结构房屋存在举架高和开间大等不利于抗震构造,硬山搁檩屋面与土坯墙体搭接不牢,房屋整体稳定性弱,抗震能力较差,建议对当地既有生土结构房屋做必要抗震加固。

(2) 经调研发现,本地区生土料中常参入稻草和石灰等材料,土坯砌体强度尚可,但砌筑泥浆强度不足,且易被侵蚀和脱落,建议在砌筑泥浆中适量加入水泥等材料,提高泥浆的强度与耐久性。

(3) 新建生土结构房屋应使用改性后生土材料,适当设置木质圈梁和构造柱,并使用铁件等将屋面结构与墙体牢固连接。

## 参考文献

- [1] 周铁钢,段文强,穆钧,等. 全国生土农房现状调查与抗震性能统计分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(4): 487-492.  
ZHOU Tiegang, DUAN Wenqiang, MU Jun, et al. Statistical analysis and survey on the aseismic performance of the raw-soil building status in China's rural areas[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 2013, 45(4): 487-492. (in Chinese)
- [2] 周强,邵峰,孙柏涛. 江西村镇房屋抗震能力调查与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(6): 188-197.  
ZHOU Qiang, SHAO Feng, SUN Baitao. Investigation and analysis of seismic capacity of rural buildings in Jiangxi[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(6): 188-197.
- [3] 王亚勇,葛学礼,袁金西. 新疆巴楚 M6.8 地震房屋震害及经验总结[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(2): 172-175.
- [4] 石玉成,马尔曼,何文贵,等. 2003 年甘肃民乐一山丹 6.1、5.8 级地震震害特点及启示[J]. 世界地震工程, 2006, 22(3): 95-101.  
SHI Yucheng, MA Erman, HE Wengui, et al. The features and lessons learned from the Minle-Shandan 6.1, 5.8 tw in earthquakes in 2003[J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22(3): 95-101. (in Chinese)
- [5] 郭永恒,周云,吴从晓,等. 从九江地震看我国村镇房屋抗震设防[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(5): 26-33.  
GUO Yongheng, ZHOU Yun, WU Congxiao, et al. Seismic fortification capability of rural buildings in China in view of Jiujiang earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(5): 26-33. (in Chinese)
- [6] 王可,黄志广. 2005 年江西九江地震建筑震害与分析[J]. 建筑结构, 2006, 36(S1): 652-655.  
WANG Ke, HUANG Zhiguang. Analysis of building wreckage caused by 2005 earthquake in Jiujiang[J]. Building Structure, 2006, 36(S1): 652-655. (in Chinese)
- [7] 李钢,刘晓宇,李宏男. 汶川地震村镇建筑结构震害调查与分析[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 724-730.  
LI Gang, LIU Xiaoyu, LI Hongnan, et al. Seismic damage investigation and analysis on rural buildings in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(5): 724-730. (in Chinese)
- [8] 何彬. 云南盈江“3·10”地震房屋震害调查与分析[J]. 建材发展导向, 2011, 9(2): 52-58.
- [9] 石玉成,高晓明,谭明,等. 2013 年岷县漳县 6.6 级地震灾害损失评估[J]. 地震工程学报, 2013, 35(4): 717-723.  
SHI Yucheng, GAO Xiaoming, TAN Ming, et al. Disaster Loss Assessment of the Minxian-Zhangxian Ms 6.6 Earthquake, 2013[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 717-723. (in Chinese)
- [10] BUI Q B, MOREL J C, HANS S, et al. Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth[J]. Materials and Structures, 2009, 42(8): 1101-1116.
- [11] 阿肯江 托呼提,阿里木江 马克苏提,王墩. 生土坯建筑抗震加固研究综述[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2008, 25(2): 142-149.
- [12] 王毅红,樊琨,陈全杰,等. 村镇生土结构房屋抗震加固措施试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(6): 77-81.  
WANG Yihong, FAN Kun, CHEN Quanjie, et al. Experimental study on anti-seismic strengthening measures on raw-soil structure houses in villages[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(6): 77-81. (in Chinese)
- [13] 肖梅玲,叶燎原,刘本玉,等. 云南农村土木结构房屋有限元抗震分析[J]. 地震研究, 2012, 35(2): 276-281.  
XIAO Meiling, YE Liaoyuan, LIU Benyu, et al. Aseismic analysis of civil structure houses by finite element method in rural area of Yunnan[J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(2): 276-281. (in Chinese)
- [14] 阿肯江 托呼提,元国庆,陈汉清. 新疆南疆地区传统土坯房屋震害及抗震技术措施[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(Z1): 82-86.  
Akenjiang Tuohuti, QI Guoqing, CHEN Hanqing, et al. Seismic damage and seismic countermeasures of Xinjiang traditional adobe house[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(Z1): 82-86. (in Chinese)
- [15] 黄金胜,陶忠,陆琨,等. 云南农村居民生土建筑土坯砌体的力学性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(1): 94-98.  
HUANG Jinsheng, TAO Zhong, LU Kun, et al. Experiment on mechanics characteristics of adobe masonry of rural houses in yunnan province[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(1): 94-98. (in Chinese)
- [16] 王毅红,梁健,张项英,等. 我国生土结构研究综述[J]. 土木工程学报, 2015, 48(5): 98-107.  
WANG Yihong, LIANG Jian, ZHANG Xiangying, et al. Review of raw-soil structure in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48

- (5): 98-107. (in Chinese)
- [17] 王毅红, 卜永红, 刘挺. 生土结构房屋的承重土坯墙体抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2010(S1): 526-530.  
WANG Yihong, BU Yonghong, LIU Ting, et al. Study on the aseismic behavior of adobe walls of raw-soil structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2010(S1): 526-530. (in Chinese)
- [18] 王毅红, 王春英, 李先顺, 等. 生土结构的土料受压及受剪性能试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(4): 469-472.  
WANG Yihong, WANG Chunying, LI Xianshun, et al. Experiment on shear properties and compressive properties of earth material of raw-soil structure[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 2006, 26(4): 469-472. (in Chinese)
- [19] 阿肯江 托呼提, 沙吾列提 拜开依, 曹耿, 等. 土坯砌体抗压强度试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(3): 290-295.  
AKENJIANG Tuohuti, SAWULET Bekey, CAO Geng, et al. Experimental study on compressive strength of adobe masonry[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(3): 290-295. (in Chinese)
- [20] 房彦山, 哈斯亚提 哈里丁, 阿肯江 托呼提, 等. 土坯砌体抗剪性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(6): 10-12.
- [21] 刘俊霞, 海然, 张茂亮, 等. 植物纤维增强生土材料结构与性能[J]. 建筑材料学报, 2016(6): 1068-1072.  
LIU Junxia, HAI Ran, ZHANG Maoliang, et al. Structure and properties of stabilized earth materials modified by plant fiber[J]. Journal of Building Materials, 2016(6): 1068-1072. (in Chinese)
- [22] 陶忠, 徐红杰, 陈志寿. 土坯中添加松针对其力学性能影响的试验研究[J]. 世界地震工程, 2011, 27(3): 180-186.  
TAO Zhong, XU Hongjie, CHEN Zhishou. Experimental research on mechanical properties of adobe with pines[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(3): 180-186. (in Chinese)
- [23] 马建飞. 改性生土坯及其砌体基本力学性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.
- [24] 陈秋雨, 刘宁. 磷石膏改性生土材料试验研究[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(2): 18-22.  
CHEN Qiuyu, LIU Ning. Experimental study on properties of modified raw soil material added with phosphogypsum[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2017, 39(2): 18-22. (in Chinese)
- [25] DEGIRMENCI N. The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(6): 1220-1224.
- [26] 周铁钢, 杨华, 胡昕. 石膏-土坯墙民居抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2009, 25(3): 130-134.  
ZHOU Tiegang, YANG Hua, HU Xin. Experimental research on seismic behavior of gypsum-adobe wall dwellings[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(3): 130-134. (in Chinese)
- [27] YAMIN L E, PHILLIPS C A, REYES J C, et al. Seismic behavior and rehabilitation alternatives for adobe and rammed earth building [c] // 13th World Conference on Earthquake Engineering. Bccanada, Vancouver, 2004.
- [28] YORULMAZ M. Turkish standards and codes on adobe and adobe constructions [C] // Proceedings International Workshop: Earthen Buildings in Seismic Areas. University of New Mexico, Albuquerque, 1981.
- [29] 朱伯龙, 吴明舜, 蒋志贤. 砖墙用钢筋网水泥砂浆面层加固的抗震能力研究[J]. 地震工程与工程振动, 1984(1): 70-81.
- [30] 许许, 李勇志, 雷敏, 等. 群落生土建筑的抗地震倒塌加固措施[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(1): 135-143.  
XU Hu, LI Yongzhi, LEI Min, et al. A strengthening measure for seismic collapse resistance of the residential raw-soil building group[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(1): 135-143. (in Chinese)
- [31] 张琰鑫, 童丽萍. 夯土住宅结构性能分析及加固方法[J]. 世界地震工程, 2012, 28(2): 72-78.  
ZHANG Yanxin, TONG Liping. Performance analysis and strengthening method of rammed earth buildings[J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(2): 72-78. (in Chinese)
- [32] 于文, 葛学礼, 朱立新. 新疆喀什老城区生土房屋模型振动台试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29(3): 24-29.  
YU Wen, GE Xueli, ZHU Lixin. Experimental study on shaking table test of adobe building model of Kashi, Xinjiang[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(3): 24-29. (in Chinese)
- [33] BLONDET M, GARCIA G V. Earthquake resistant earthen buildings [C]. 13th World Conference on Earthquake Engineering 2004: 1-8.
- [34] 孙满利, 王旭东, 李最雄, 等. 木质锚杆加固生土遗址研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2156-2159.  
SUN Manli, WANG Xudong, LI Zuixiong, et al. Study on immature earthen sites reinforced with wood anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2156-2159. (in Chinese)
- [35] 卜永红, 王毅红, 韩岗, 等. 内置绳网承重夯土墙体抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(1): 38-42.  
BU Yonghong, WANG Yihong, HAN Gang, et al. Study on seismic behavior of the rammed earth walls with built-in rope nets[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 2013, 45(1): 38-42. (in Chinese)