

生土结构预应力加固抗震试验研究

高 幸¹, 王维玉²

(1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁, 大连 116024; 2. 河北省建筑科学研究院, 河北, 石家庄 050021)

摘 要: 生土结构预应力加固技术是针对窑窑结构缺陷提出的新型抗震加固技术。预应力加固主要分为预应力穿墙螺栓拉结、预应力钢拱圈支撑和预应力钢绞线拉结 3 大类型。对加固后的窑窑进行原位爆破试验, 试验结果表明: 预应力加固结构体系对窑身 y 方向的抗震性能提升显著; 预应力穿墙螺栓在爆破激励下对窑脸起到明显的拉结作用; 窑窑内部门洞处应力集中, 加固设计时应重点关注。该加固技术适合在窑窑民居危房加固改造项目中推广应用, 具有重要的科学理论价值、现实意义与应用前景。

关键词: 生土结构; 预应力加固; 抗震性能; 爆破; 动力放大系数

中图分类号: TU398+2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.05.S042

EXPERIMENTAL STUDY ON EARTHQUAKE RESISTANCE OF PRESTRESSED REINFORCED RAW-SOIL STRUCTURE

GAO Xing¹, WANG Wei-yu²

(1. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Research Institute of Architecture Science of Hebei, Shijiazhuang, Hebei 050021, China)

Abstract: The prestressed reinforcement technology of raw-soil structure is a new aseismic reinforcement technology for the defects of arch kiln structure. The prestressed reinforcement technology is mainly divided into three types: prestressing wall piercing bolt, prestressing steel arch ring and prestressing steel strand. In situ blasting test of reinforced arch kiln structure shows that the seismic performance of the arch kiln in y direction is improved more significantly. The prestressed wall piercing bolt plays an obvious role in drawing the kiln face under the blasting excitation. The stress concentration in the side doors of arch kiln should be paid more attention in reinforcement design. The reinforcement technology can be promoted and applied in the reinforcement and reconstruction project of dilapidated houses. The technology has important scientific theoretical value, practical significance and application prospects.

Key words: raw-soil structure; prestressed reinforcement; seismic performance; blast; dynamic amplification coefficient

生土民居作为我国建筑文化瑰宝, 广泛分布于西北、云贵、甘陕等地区的各个村落。河北省怀安境内的窑窑民居则是古语所言“南方垒木为巢, 北方抔土而居”中北方生土建筑的典型代表。窑窑多为村民自建, 未经正规结构设计, 不具备抗震能力, 所以小震致灾甚至小震大灾成为窑窑民居的致命缺陷^[1]。

近些年, 国家大力推进农村危房加固改造工作, 科研人员积极响应国家号召, 肩负起危房改

造的科研任务, 针对生土民居提出了多种可行的加固措施。孙满利等^[2]提出木制锚杆加固生土结构措施, 并实践证实加固措施效果显著。Hu Rongrong等^[3]提出铁丝网加固夯土墙的方法, 并利用振动台试验证实加固措施有效。张琰鑫等^[4]提出檩条下设置弧形垫块、墙外侧设置扶壁柱和纵墙顶面设置木圈梁的加固方法。卜永红等^[5]提出内置绳网增强生土结构房屋整体性能, 提高抗震能力的技术。胡晓峰等^[6]针对黄土窑洞特有的结构形

收稿日期: 2020-05-25; 修改日期: 2020-11-13

基金项目: 河北省建设厅项目(2018-2010)

通讯作者: 王维玉(1964—), 男, 河北人, 教授级高工, 硕士, 副院长, 主要从事基坑支护设计及结构抗震加固研究 (E-mail: weiyu_wang@163.com).

作者简介: 高 幸(1992—), 男, 河北人, 工程师, 博士生, 主要从事生土结构房屋可靠性及抗震加固研究 (E-mail: gaoping_19921025@163.com).

式，分析窑洞常见破坏原因，提出设置型钢支架、砖砌拱券等一系列加固措施。周铁钢等^[7-9]针对传统生土民居的抗震缺陷提出了墙体内外设置水平、竖向配筋砂浆带，X形配筋砂浆带，竹胶板加固等一系列生土建筑加固方法。

但是，不同地区的生土建筑，其结构类型不尽相同，加固方案要根据建筑结构特点切实制定。经走访调研和查阅文献，汇总碛窑常见病害，借鉴已有加固方法^[10]，提出一套针对碛窑结构缺陷的预应力加固方案。

1 试验概况

1.1 场地概况

试验场地位于张家口市怀安县，场地抗震烈度为7度，设计基本加速度为0.15g，根据钻探揭露土层估算该范围内等效剪切波速为223.00 m/s~315.00 m/s，场地覆土厚度小于50 m，根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)判定场地属于中软土，建筑场地类别为Ⅱ类，场地特征周期0.40 s^[11]。场地土层物理力学性能指标如表1所示。

表1 土层物理力学性能指标
Table 1 Physical and mechanical performance index of soil layer

土层名称	土层厚度/ m	重度 γ / (kN/m ³)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 ϕ / (°)	压缩模量/ MPa
细砂	6.4	17.8	0.0	18.0	4.1
中砂	5.7	18.4	0.0	24.0	8.1
粗砂	3.5	19.1	0.0	26.0	9.1
粉质粘土	0.9	18.0	24.1	25.0	7.2
中砂	4.2	18.5	0.0	26.0	7.9

1.2 生土结构预应力加固

拟加固生土建筑属于传统碛窑结构，其构造如图1、图2所示。走访调研过程中，发现老旧民居结构破坏主要为3大类型：1)窑脸与窑身分离，严重者发生窑脸倾覆；2)夯土墙与土坯拱脚处出现横向裂缝，且向两端持续延伸；3)土坯拱顶出现纵向贯通裂缝，严重者拱顶发生塌落。

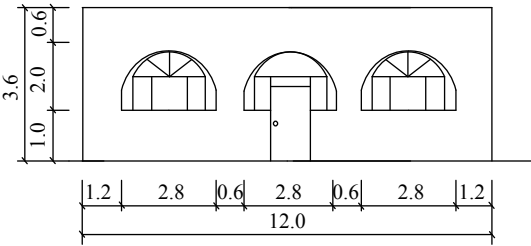


图1 碛窑立面示意图 /m
Fig. 1 Vertical sketch of arch kiln

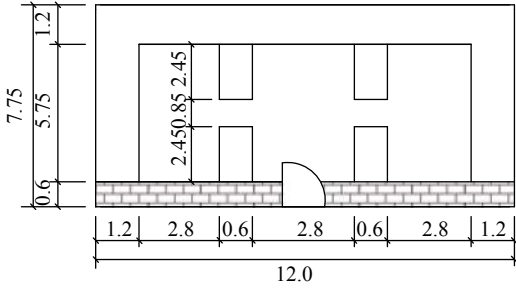


图2 碛窑平面示意图 /m
Fig. 2 Plan of arch kiln

借鉴已有混凝土预应力加固方法^[12-13]，针对碛窑结构缺陷，提出预应力穿墙螺栓拉结、预应力钢拱圈支撑和预应力钢绞线拉结3类加固措施，如图3~图5所示。预应力穿墙螺栓加固窑脸方式：穿墙螺栓一端与窑脸外侧矩形钢板紧固，另一端与位于窑脸内侧且与夯土墙连接的L形钢板紧固，通过松紧螺母对螺杆施加预应力，达到

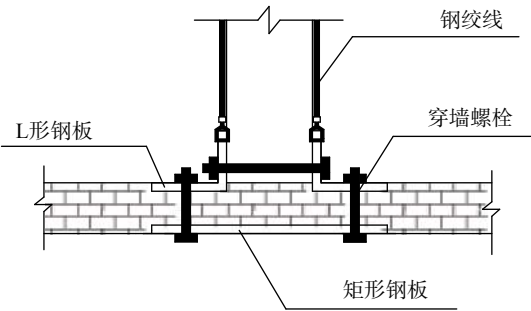


图3 预应力螺栓拉结示意图
Fig. 3 Schematic diagram of prestressed bolt connection

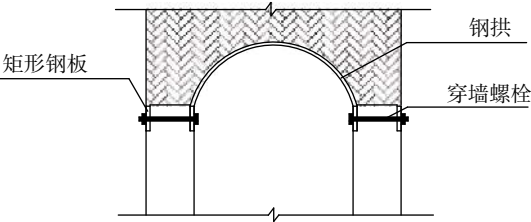


图4 预应力钢拱圈支撑示意图
Fig. 4 Schematic diagram of prestressed steel arch support

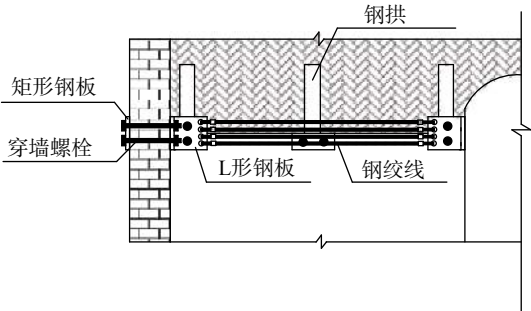


图5 预应力钢绞线拉结意图
Fig. 5 Schematic diagram of prestressed steel strand connection

拉结窑脸,防止倾覆的作用。预应力钢拱圈加固土坯拱顶方式:钢拱圈两端固定于夯土墙顶部,安装时,通过挤压钢拱圈两侧端部,对其施加沿拱圈向上的预应力,达到支撑拱顶防止土坯塌落的作用。预应力钢绞线加固窑身方式:钢绞线穿过相邻加固钢板端部,施加指定预应力后锁定,达到增强建筑整体性能、增加结构刚度的作用。

1.3 试验方案

试验采用爆破激振模拟震源^[14],沿窑窑中轴线,距窑脸2.0 m、3.0 m、7.2 m,深度1.6 m处实施爆破,爆破位置如图6所示。本次试验选用941B型超低频振动传感器,频率为0.25 Hz~200 Hz,所测加速度最大量程为 20 m/s^2 ,与941型放大器配接后的加速度分辨率为 $5 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$,信号采集选用G01USB32型数据采集系统,采样频率可达400 kHz,设备连接方式如图7所示。

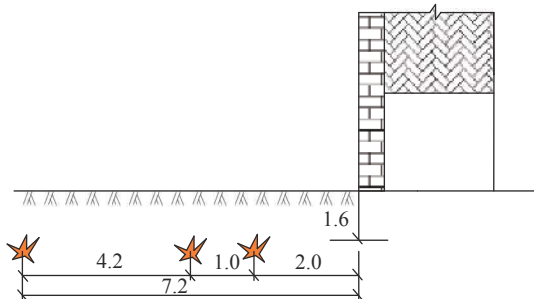


图6 爆破位置示意图 /m

Fig. 6 Schematic diagram of blasting location

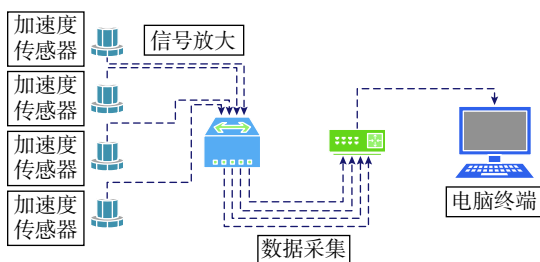


图7 数据采集设备连接示意图

Fig. 7 Connection diagram of data acquisition equipment

2 预应力加固结构动力响应分析

为分析生土结构预应力加固后的动力响应,沿窑身设置加速度传感器并提取爆破荷载下峰值加速度数据,加速度传感器位置如图8、表2所示。图9为窑身的动力放大系数曲线,由图9可见 x 方向动力放大系数自墙底至拱顶先增大后减小。夯土墙 x 方向动力放大系数自下而上持续增大,说明夯土墙在动力荷载作用下 x 方向的整体性能良好,随着传感器布置高度增加,土坯拱脚

处的动力放大系数出现转折,呈现衰减现象,其主要原因在于生土窑修建时,土坯拱券直接码放于夯土墙体之上,两者之间无有效连接,仅靠土坯拱顶重力提供 x 方向约束,以至于激振作用下,动力放大系数呈衰减趋势。拱脚至拱顶范围,动力放大系数持续衰减,由于拱顶修建时,土坯码放不可避免存在间隙,加速度向上传递时,土坯相互作用吸收部分能力,造成动力放大系数减小。

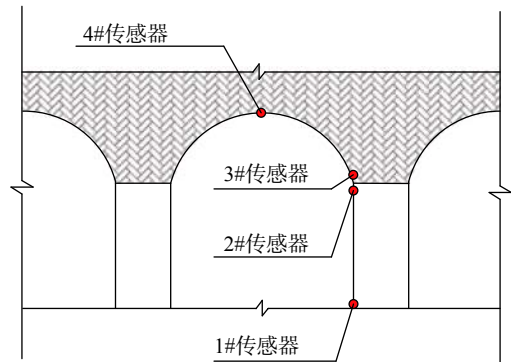


图8 窑身传感器布置图

Fig. 8 Layout of kiln body shaft sensor

表2 传感器位置表

Table 2 Sensor locations

传感器编号	安装位置	与地面距离/m
1#	夯土墙底部	0
2#	夯土墙顶部	1.3
3#	土坯拱脚部	1.7
4#	土坯拱顶部	3.0

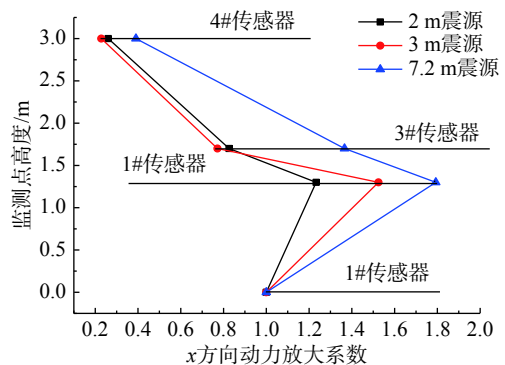


图9 窑身 x 方向的动力放大系数曲线

Fig. 9 Dynamic amplification coefficient curve of kiln body in x direction

图10为窑身 y 方向动力放大系数曲线,如图10所示夯土墙 y 方向动力放大系数随高度增加而持续增大,且 y 方向动力放大系数大于 x 方向,由此可见,夯土墙 y 方向的整体性更好。土坯拱脚处的 x 方向动力放大系数减小,但 y 方向动力放大系

数持续增大,主要由3方面原因造成:其一,窑脸与后墙对夯土墙与土坯拱顶存在 y 方向的约束作用;其二,加固钢板设置于夯土墙与土坯拱顶交界部位,并通过预应力钢绞线沿 y 方向拉结,增强结构整体性能;其三,土坯拱顶在自身重力下,形成夯土墙与土坯拱顶的 y 方向约束。

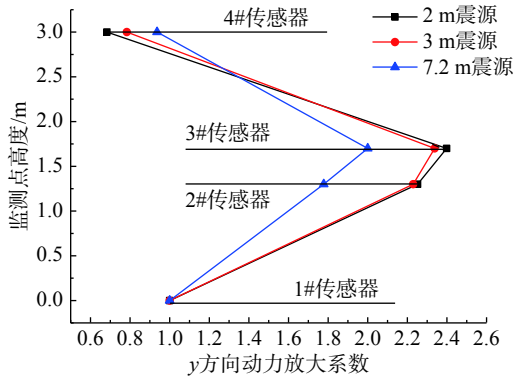


图 10 窑身 y 方向动力放大系数曲线
Fig. 10 Dynamic amplification coefficient curve of kiln body in y direction

窑脸部位自下而上布设加速度传感器,传感器位置如图 11 所示。采集传感器峰值加速度绘制如图 12 所示的动力放大系数曲线。排除位于加固

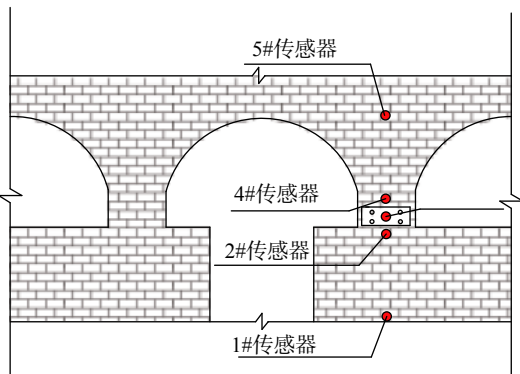


图 11 窑脸传感器布设图
Fig. 11 Layout of kiln face sensor

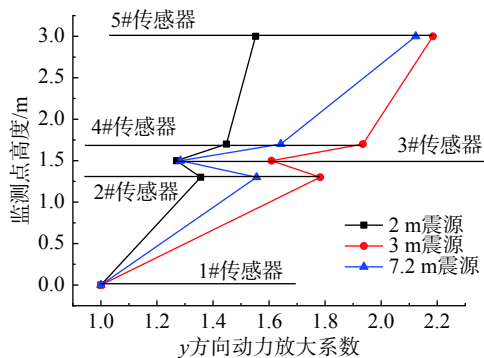


图 12 窑脸 y 方向动力放大系数曲线
Fig. 12 Dynamic amplification coefficient curve of kiln face in y direction

钢板的 3#传感器,窑脸 y 方向动力放大系数自下而上呈变大趋势,与现代建筑放大系数变化规律相同,呈“倒三角”形态分布,由此说明,窑脸整体性能良好,动力荷载下不易发生坍塌破坏,与调研发现的破坏规律吻合,即窑脸多发生倾倒破坏而不发生塌落破坏。预应力穿墙螺栓拉结作用下,加固钢板动力放大系数突变减小,证明预应力穿墙螺栓可有效防止窑脸发生倾倒破坏。

图 13 为拱顶传感器布设图,1#传感器位于窑脸拱顶处,2#~7#传感器位于加固钢拱圈顶部,8#传感器位于后墙处。图 14 为沿拱顶纵深方向分布的峰值加速度曲线图,从图 14 可以看出,随着震源远离建筑,传感器峰值加速度逐渐减小。1#传感器与 2#传感器位置临近但峰值加速度相差很大,因为 1#传感器位于土坯窑脸,2#传感器位

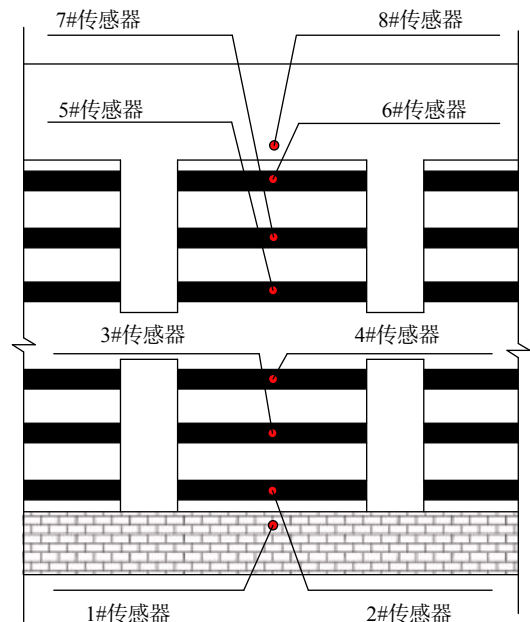


图 13 拱顶传感器布设图
Fig. 13 Layout of arch crown sensors

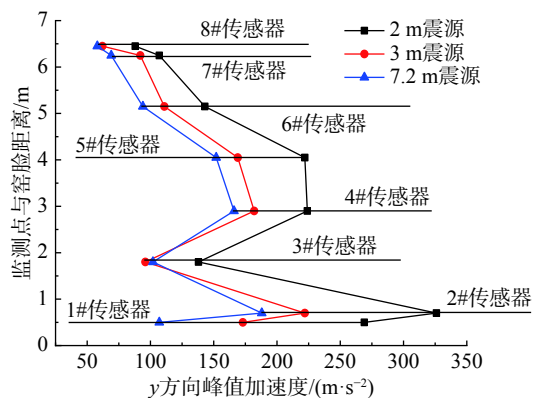


图 14 拱顶 y 方向峰值加速度曲线
Fig. 14 Peak acceleration curve of arch crown in y direction

于钢制拱圈, 钢拱圈的动力放大作用大于土坯。3#传感器峰值加速度衰减后, 4#传感器峰值加速度再次增强, 其原因是 4#拱圈两端靠近门洞, 爆破激振下, 门洞处应力集中, 致使 4#传感器峰值加速度增大。位于后墙 8#传感器的峰值加速度最小, 因为房屋北侧有高度大约为 1.5 m 的土堆紧靠在后墙上, 从而增加了 y 方向的刚度。

为分析加固结构抗震效果, 加固钢板板面设置 1#~4#加速度传感器, 其位置如图 15 所示。1#、2#传感器布设于窑脸外部加固钢板, 3#、4#传感器布设于窑脸内部加固钢板, 分析如表 3 所示传感器数据可知, 不同爆破距离, 窑脸外部钢板的峰值加速度与内部钢板的峰值加速度极为接近, 说明预应力穿墙螺栓对窑脸起到较好的拉结作用。对应位置处窑脸外部加固钢板峰值加速度小于内部加固钢板, 因为窑脸在爆破激励下, 加固钢板间土坯发生挤压变形, 达到“减震”效果。

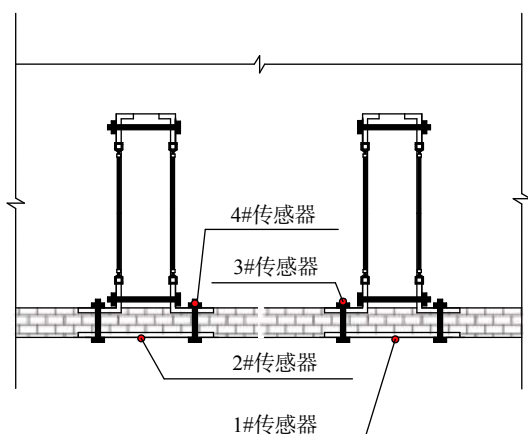


图 15 加固钢板位置传感器布设图
Fig. 15 Layout of reinforced steel plate position sensors

表 3 加固钢板位置传感器采集数据 $/(m/s^2)$
Table 3 Reinforced steel plate position sensors

震源/m	1#传感器	2#传感器	3#传感器	4#传感器
2	211	207	236	243
3	157	153	171	164
7.2	96	85	103	107

3 结论

本文深入研究了预应力加固窑窑民居在爆破荷载下的动力响应, 得到以下结论:

(1) 对比加固后 x 、 y 方向的窑身动力放大系数曲线发现, 预应力加固结构体系对窑身 y 方向的抗震性能提升更加明显。

(2) 窑脸动力放大系数曲线自下而上总体呈“倒三角”分布, 加固钢板处动力放大系数发生突减, 说明预应力穿墙螺栓在爆破激励下起到明显的拉结作用。

(3) 窑窑内部门洞附近钢拱圈顶部峰值加速度较大是由门洞处应力集中造成的, 加固设计时应重点关注此部位。

本文提出的预应力加固技术所用构件常见易得, 成本低廉, 工艺简单, 适合在窑窑民居危房加固改造项目中推广、应用, 具有重要的科学理论价值、现实意义与应用前景。

参考文献:

- [1] 王毅红, 梁捷, 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)
- [2] 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(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(12): 2156 — 2159. (in Chinese)
- [3] Hu Rongrong, Yu Jiangdong. Shake table test on rammed earth wall panels [J]. Advanced Materials Research, 2010(133/134): 795 — 799.
- [4] 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)
- [5] 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 & Technology, 2013, 45(1): 38 — 42. (in Chinese)
- [6] 胡晓峰, 张凤亮, 薛建阳, 等. 黄土窑洞病害分析及加固技术[J]. 工业建筑, 2019, 49(1): 6 — 13.
Hu Xiaofeng, Zhang Fengliang, Xue Jianyang, et al. Disease analysis and reinforcement measures of loess caves [J]. Industrial Construction, 2019, 49(1): 6 — 13. (in Chinese)
- [7] 周铁钢, 朱瑞召, 朱立新, 等. 土坯墙承重民居抗震加固振动台试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2): 181 — 187.
Zhou Tiegang, Zhu Ruizhao, Zhu Lixin, et al. Shaking table test study on a seismic strengthening of adobe wall bearing dwellings [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 181 — 187. (in Chinese)

- Chinese)
- [8] 周铁钢, 袁一鸣, 赵祥. 配筋砂浆带加固土坯墙体的抗震性能研究与实践[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(11): 58 — 64.
Zhou Tiegang, Yuan Yiming, Zhao Xiang, et al. Experimental study on seismic performance of adobe wall with reinforced mortar strips and application [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(11): 58 — 64. (in Chinese)
- [9] 周铁钢, 张晓昌, 赵祥, 等. 土坯墙体抗震加固的试验研究[J]. 世界地震工程, 2018, 34(4): 1 — 7.
Zhou Tiegang, Zhang Xiaochang, Zhao Xiang, et al. Experimental study on seismic reinforcement of the adobe walls [J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(4): 1 — 7. (in Chinese)
- [10] 曹万林, 张勇波, 董宏英, 等. 村镇建筑抗震节能结构体系研究与应用[J]. 工程力学, 2015, 32(12): 1 — 12.
Cao Wanlin, Zhang Yongbo, Dong Hongying, et al. Research and application on aseismic energy-saving structural system for rural buildings [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(12): 1 — 12. (in Chinese)
- [11] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
GB 50011—2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Construction Industry Publishing House, 2016. (in Chinese)
- [12] 彭晖, 尚守平, 金勇俊, 等. 预应力碳纤维板加固受弯构件的试验研究[J]. 工程力学, 2008(5): 142 — 151.
Peng Hui, Shang Shouping, Jin Yongjun, et al. Experimental study of reinforced concrete beam with prestressed CFRP plate [J]. Engineering Mechanics, 2008(5): 142 — 151. (in Chinese)
- [13] 杨勇, 李辉, 陈伟, 等. 预应力钢带加固钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(10): 53 — 60.
Yang Yong, Li Hui, Chen Wei, et al. Experimental study on seismic behavior of reinforced concrete frame structure retrofitted by pre-stressed steel strips [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(10): 53 — 60. (in Chinese)
- [14] 王维玉, 赵拓, 丁继辉. 夯实水泥土桩复合地基动力特性和时程响应影响因素分析[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊 2): 187 — 191.
Wang Weiyu, Zhao Tuo, Ding Jihui. Effects on dynamic characteristics and response of rammed soil-cement pile composite foundation [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(Suppl 2): 187 — 191. (in Chinese)

(上接第 208 页)

- [15] 杜永峰, 李春峰. 阻尼连廊位置对高层连体结构地震响应的影响[J]. 建筑科学, 2018, 40(6): 48 — 53, 76.
Du Yongfeng, Li Chunfeng. Influence of the damper corridors position on seismic response of the connected high-rise building [J]. Building Science, 2018, 40(6): 48 — 53, 76. (in Chinese)
- [16] 李亚娥, 张丁. 考虑行波效应的层间隔震高位连体结构动力响应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2018, 40(6): 48 — 53, 76.
Li Ya'e, Zhang Ding. Dynamic response analysis of the story isolation high level connected structure considering traveling wave effects [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2018, 40(6): 48 — 53, 76. (in Chinese)
- [17] 周福霖, 张颖, 谭平. 层间隔震体系的理论研究[J]. 土木工程学报, 2009(8): 1 — 8.
Zhou Fulin, Zhang Ying, Tan Ping. Theoretical study on story isolation system [J]. China Civil Engineering Journal, 2009(8): 1 — 8. (in Chinese)
- [18] 祁皓. 层间隔震技术评述[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(6): 114 — 120.
Qi Ai. State-of-the-art of story isolation system [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(6): 114 — 120. (in Chinese)
- [19] 包世华, 王建东. 大底盘多塔楼连体结构的振动计算和动力特性[J]. 建筑结构, 1997(6): 40 — 44.
Bao Shihua, Wang Jiandong. Vibration calculation and dynamic characteristics of multi-tower connected structure with enlarged base [J]. Building Structure, 1997(6): 40 — 44. (in Chinese)
- [20] 卞朝东, 李爱群, 娄宇, 等. 高层连体结构振型及其参与系数的分析[J]. 建筑科学, 2002, 18(4): 20 — 24.
Bian Chaodong, Li Aiqun, Lou Yu, et al. Analysis of vibration modes and participating coefficients for high-rise connecting structure [J]. Building Science, 2002, 18(4): 20 — 24. (in Chinese)
- [21] Zhu H P, Ge D D, Huang X. Optimum connecting dampers to reduce the seismic responses of parallel structures [J]. Journal of Sound & Vibration, 2011, 330(9): 1931 — 1949.
- [22] 朱宏平, 杨紫健, 唐家祥. 利用连接装置控制两相邻结构的地震动响应[J]. 振动工程学报, 2003, 16(1): 56 — 61.
Zhu Hongping, Yang Zijian, Tang Jiaxiang. Control of the seismic response of two adjacent structures using a damped link [J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(1): 56 — 61. (in Chinese)