

DOI:10.11918/202112134

超高延性混凝土加固砖木结构抗震性能试验

董方园¹, 蒋芳明¹, 余江滔¹, 朱奇云², 王汉鹏¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市房地产科学研究院, 上海 200031)

摘要: 为研究超高延性混凝土 (ultra-high ductile concrete, UHDC) 面层加固立贴式砖木结构的可行性, 以及探究 UHDC 面层对砖木结构抗震性能的影响, 以一栋缩尺比为 1/2 的立贴式砖木结构模型为研究对象, 进行了未加固和 UHDC 面层加固两种情况下的振动台试验, 比较未加固结构和 UHDC 加固结构的动力特性、破坏模式、位移响应、扭转效应和基底剪力等抗震性能。结果表明: 在选定台面激励下, 未加固砖木结构不能满足现行规范的抗震设防要求, 需要进行抗震加固后方可继续使用; UHDC 面层显著提高了砖木结构的刚度, 降低了结构的刚度退化, 从而有效控制了大震作用下的结构损伤, 提升了结构的抗震性能; 9 度罕遇地震作用下, UHDC 加固砖木结构的 x 向层间位移角为 3.96‰; UHDC 面层减小了砖木结构由于结构不对称造成的扭转效应; UHDC 面层加固结构比碳纤维布加固结构的抗震性能更好。UHDC 面层加固砖木结构能够满足中国 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》规定的 8 度抗震设防要求, 初步证明了 UHDC 用于震损结构修复和现存建筑房屋加固是切实可行的。

关键词: 立贴式砖木结构; 超高延性混凝土; 刚度; 抗震性能; 扭转效应

中图分类号: TU362; TU371.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)10-0130-11

Seismic performance of timber-framed masonry structure strengthened with ultra-high ductile concrete

DONG Fangyuan¹, JIANG Fangming¹, YU Jiangtao¹, ZHU Qiyun², WANG Hanpeng¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Real Estate Science Research Institute, Shanghai 200031, China)

Abstract: To investigate the feasibility of timber-framed masonry structure reinforced with ultra-high ductile concrete (UHDC) layer and explore the influence of UHDC layer on the seismic performance of timber-framed masonry structure, shaking table tests were performed on 1/2 scaled timber-framed masonry structure model under conditions of original un-strengthened structure and UHDC strengthened structure. The seismic properties of un-strengthened structure and UHDC strengthened structure including dynamic characteristics, failure modes, displacement response, torsional effect, and base shear were compared and discussed. Test results show that the un-strengthened structure could not meet the seismic fortification requirements of the current code under the selected table excitation, and it could only be used after seismic reinforcement. The UHDC layer significantly improved the stiffness and reduced the stiffness degradation of the structure, so as to effectively control the structural damage under large earthquake and improve the seismic performance of the structure. Under rare earthquake of 9 degree, the x -direction inter-story drift of UHDC layer strengthened structure was 3.96‰. The UHDC layer reduced the torsional effect of the structure caused by structural asymmetry. The seismic performance of UHDC layer strengthened structure was better than that of CFRP strengthened structure. The structure strengthened with UHDC layer could meet the requirements of 8 degree seismic fortification intensity as stipulated in GB 50011—2010, which preliminarily proved that UHDC was feasible to repair the earthquake damaged structure and strengthen the existing buildings.

Keywords: timber-framed masonry structure; ultra-high ductile concrete; stiffness; seismic performance; torsional effect

震害调查发现, 砌体结构的抗剪强度低, 刚度大
而整体性差。在小震作用下, 砌体墙易开裂。在大

震作用下, 砌体结构的刚度会急剧下降, 容易发生脆
性整体破坏^[1-4]。

立贴式砖木结构是江南和西南地区民居中最为
常见的结构形式, 其主要受力构件为木梁、木柱, 而
填充墙多采用粘土砖砌筑而成。然而, 这类建筑一
般施工质量较差, 且结构构件常由于年久失修而老

收稿日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(51978504)

作者简介: 董方园(1992—), 女, 博士研究生;

余江滔(1975—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 余江滔, yujiangtao@tongji.edu.cn

化损坏,因此需要后期的改建、加固来延长其使用寿命^[5-7]。由于早期建造的砖木结构在当时尚无抗震设计要求,所以这类建筑普遍抗震性能较弱。除此之外,这类传统建筑具备优良的历史文化价值,在对其改建、加固的同时也要经济、有效地保护其原有的建筑外形与风貌。传统的水泥砂浆钢筋网加固、碳纤维布粘贴等方式在经济性和外观保护上都无法完全满足以上要求,因此对新加固方式的需求已迫在眉睫。

李晓琴等^[8]对具有高延性的混凝土材料进行了探索性研究。邓明科等^[9]亦指出高延性混凝土材料能够提升砌体墙的抗震性能。同济大学的 Yu 等^[10]在 2017 年研发出了一种极限拉伸应变可达 8%、抗拉强度可达 17 MPa 的新型工程用纤维增强水泥基复合材料,并将其命名为超高延性混凝土 (ultra-high ductile concrete, UHDC)。UHDC 具有高抗拉强度、应变硬化和细密裂缝开展等优势,实现了高强度与高延性的匹配^[11-12]。这些突破性的研究成果解决了混凝土脆性特征明显的问题,证明 UHDC 有应用于结构加固和无筋建造的潜质^[13-17]。

为探究典型砖木结构的抗震性能及 UHDC 加固砖木结构的可行性,笔者所在研究团队对缩尺比为 1/2 的未加固立贴式砖木结构模型和 UHDC 面层

加固震损结构模型进行了振动台试验,对比分析了结构的动力特性、破坏模式、位移响应和基底剪力等抗震性能,验证了 UHDC 加固砖木结构的有效性。

1 试验概况

1.1 模型设计与制作

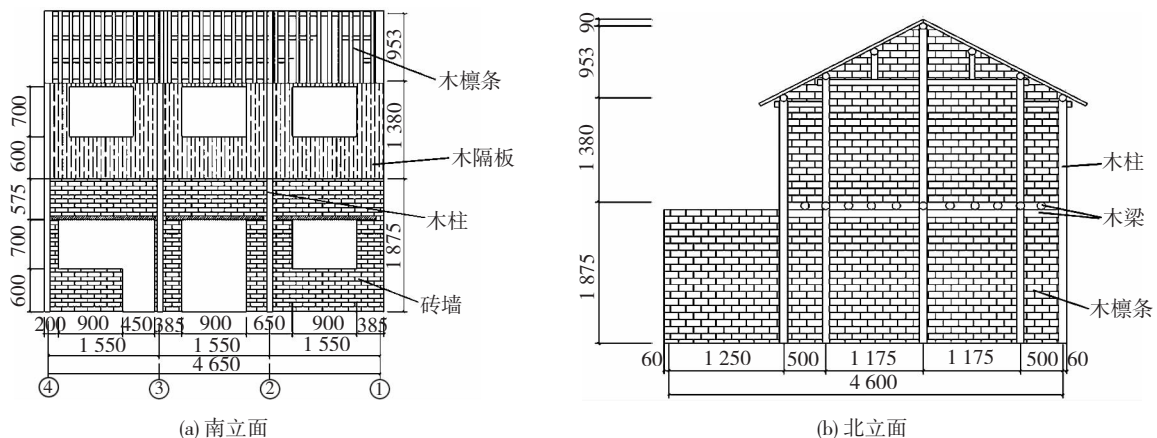
本文试验模型为三开间,七柱五落地,两层立贴式砖木结构带后楼亭子间(见图 1)。考虑振动台尺寸和台面承重,确定模型结构的缩尺比为 1:2,尺寸和详细信息见图 2,平面布置见图 3。图中 x 向和 y 向分别为结构的纵向和横向。

结构设计外墙厚度 120 mm,内墙厚度 60 mm,框架柱采用直径 100 mm 的圆木,框架梁采用 40 mm × 100 mm 的方木,檩条为直径 90 mm 的圆木,椽为 50 mm × 50 mm 的方木。门洞尺寸 450 mm × 1 050 mm,窗洞尺寸有 600 mm × 750 mm 和 750 mm × 750 mm 两种。场地类别为 III 类,设计分组为第一组。模型砖采用 MU10 青砖切割加工而成,切割后的尺寸为 240 mm × 120 mm × 53 mm 和 120 mm × 60 mm × 48 mm,砂浆采用石灰水泥砂浆,实测抗压强度为 3.2 MPa。试验模型在同济大学地震工程馆制作完成。



图 1 立贴式砖木结构

Fig. 1 Timber-framed masonry structure



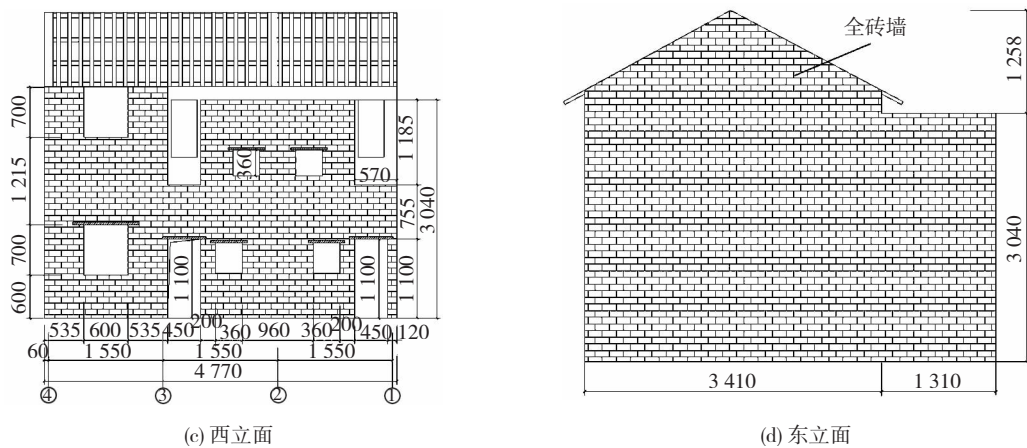


图 2 模型结构的尺寸 (mm)

Fig. 2 Dimensions of model structure (mm)

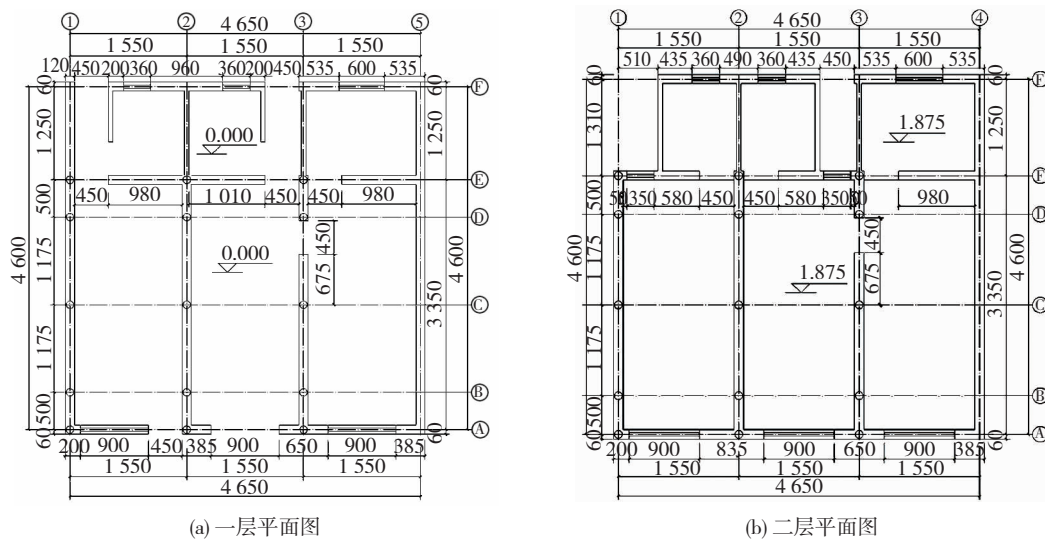


图 3 模型结构的平面布置 (mm)

Fig. 3 Layout of model structure (mm)

1.2 相似关系

模型结构的缩尺比为 1/2, 即长度相似系数为 1/2, 材料弹性模量和应力相似系数为 1, 加速度相似系数为 1, 由此确定其他的相似系数, 见表 1。缩尺后的模型结构总质量为 22.15 t, 为了准确模拟实际结构的惯性力和重力, 需要在模型构件上附加适

表 1 相似常数

Tab. 1 Similarity constants

物理参数	量纲	相似常数(模型/原型)
长度	L	1/2
应力	FL ⁻²	1
重力加速度	LT ⁻²	1
弹性模量	FL ⁻²	1
荷载	F	1/4
质量	FT ² L ⁻¹	1/4
周期	T	$\sqrt{2}/2$
频率	T ⁻¹	$\sqrt{2}$
加速度	LT ⁻²	1

当的分布质量。本试验模型附加质量均匀分布在楼面和屋面, 依据结构情况和楼屋面的有效面积, 在楼面和屋面的附加总质量分别为 16.43 t 和 5.67 t, 模型的总重为 44.25 t。

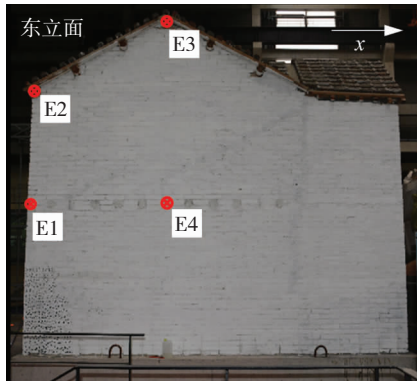
1.3 测点布置

由于篇幅限制, 本文主要分析布置在西面和东面的 8 个测点上由传感器测得的位移响应及相关结果, 即图 4 中的 W1 ~ W4 和 E1 ~ E4 点。在 W1 ~ W3 和 E1 ~ E3 的 6 个测点分别设置 *x* 向和 *y* 向的加速度计和水平位移计, 在 E4 和 W4 测点仅布置 *y* 向加速度计和位移计。未加固结构、CFRP 布加固结构和 UHDC 面层加固结构的测点布置方式相同。

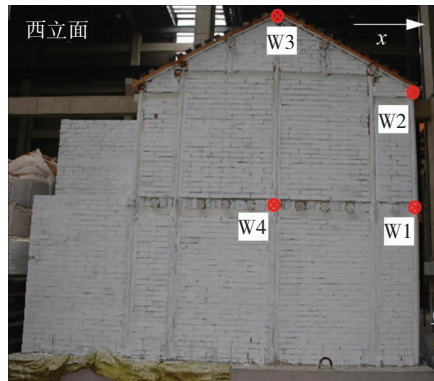
1.4 模型加固方案

在试验前和每次输入地震动后, 对模型进行峰值加速度为 0.03 *g* 的白噪声扫频。第一阶段, 对未加固结构进行振动台试验, 结构的基本情况见 1.1 节。地震动峰值加速度依据上海市工程建设规范 DGJ 08-9-2013《建筑抗震设计规程》^[18] 确定。

未加固结构依次经受了 7 度多遇(峰值加速度 = $0.035 g$)、7 度设防($0.100 g$)、7.5 度设防($0.150 g$)地震动。在设定的地震烈度下,由台面依次输入 El Centro 波、汶川波和上海人工地震波,下文相同,



(a) 东立面



(b) 西立面

图 4 东、西面的测点布置

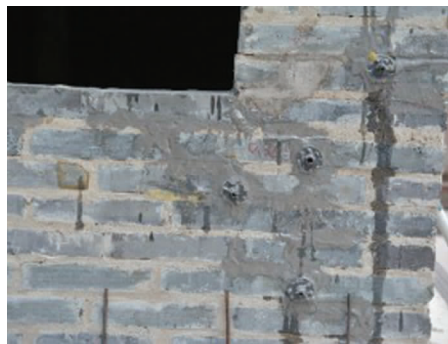
Fig. 4 Measuring points on east and west facades

第二阶段,采用 CFRP 加固震损砖木结构,结构在第一阶段震损开裂后,对开裂的木柱进行套箍加固,套箍的间距为 240 mm;对出现滑移和剪切开裂的砌体墙,通过粘贴碳纤维布进行加固,纤维布条等间距布置,条带宽度和净间距为 10 cm。对 CFRP 加固模型结构进行第二次振动台试验,在振动台台面依次输入 7 度多遇($0.035 g$)、7 度设防($0.100 g$)、7.5 度设防($0.150 g$)、7 度罕遇($0.200 g$)、7.5 度罕遇($0.280 g$)、8 度罕遇($0.360 g$)和 8.5 度罕遇($0.460 g$)地震动^[19]。

第三阶段,拆除碳纤维布,使用 UHDC 对二次震损的模型结构进行加固,为满足提高抗震性能和保持原有建筑风貌的双重要求,仅对外墙的内表面采用 UHDC 面层加固,面层设计厚度为 15 mm;内墙采用厚度为 10 mm 的 UHDC 面层进行双面加固;为了增强模型结构的完整性,在二楼铺设了厚度为

不再赘述。由于该结构模式的原型房屋处于上海郊区,因此本文在第 3 节进行试验数据分析时,主要以输入上海人工波时的相关数据进行分析,从而更加贴近房屋实际可能经受的荷载效应。

20 mm 的 UHDC 层。加固流程如下:1)在墙体中的明显开裂处进行注浆灌封处理,见图 5 (a);2)墙面钻孔、植抗剪销栓,每隔四皮砖抠水平灰缝,抠缝深度 1 cm;在墙体高度范围内,每隔 200 mm 高度布置一排抗剪销栓,抗剪销栓的水平间距设计为 900 mm,对于双面加固的内墙,抗剪销栓穿墙布置;3)采用快速喷射技术,在墙面喷射 UHDC 面层,结合人工抹面进行抹平处理,见图 5 (c);4)在自然环境下养护 28 d 后开展振动台试验。在振动台台面一次输入 7 度多遇、7 度设防、7.5 度设防、7 度罕遇、7.5 度罕遇、8 度罕遇和 8.5 度罕遇和 9 度罕遇以上的地震动,相应的峰值加速度分别为 $0.035 g$ 、 $0.100 g$ 、 $0.150 g$ 、 $0.200 g$ 、 $0.280 g$ 、 $0.360 g$ 、 $0.460 g$ 、 $0.560 g$ 和 $0.600 g$ 。文中仅给出了未加固结构和 UHDC 加固后结构的试验结果。



(a) 灌缝



(b) 喷射 UHDC



(c) 人工抹平

图 5 UHDC 面层加固模型结构的过程

Fig. 5 Strengthening process of UHDC strengthened model structure

1.5 UHDC 力学性能

本文所用 UHDC 的组分均为国产原材料,包括 P·O 52.5 普通硅酸盐水泥、石英砂、粉煤灰、聚乙

烯纤维、水和化学外加剂等。UHDC 的配合比如下,水泥:粉煤灰:砂:水 = 1 000: 429: 429: 580,聚乙烯纤维的体积掺量为 1.4%。UHDC 的拉伸应力-应

变曲线见图 6, 平均峰值抗拉强度达 6.7 MPa, 对应应变为 9.93%, 大于 GB 1499.2—2018 规定的钢材应变下限值。在单轴拉伸荷载下, UHDC 表现出多裂缝开展和应变硬化的特征, 其破坏模式和裂缝见图 6, 抗压试验采用的是 70.7 mm × 70.7 mm ×

70.7 mm 的立方体试块, 试验采用位移控制加载, 测得 28 d 龄期的抗压强度为 37.4 MPa。此外, 成型了 100 mm × 100 mm × 300 mm 的棱柱体试件, 在 7 个月龄期时的应力-应变曲线和破坏模式见图 7, 其抗压弹性模量为 17.9 GPa。

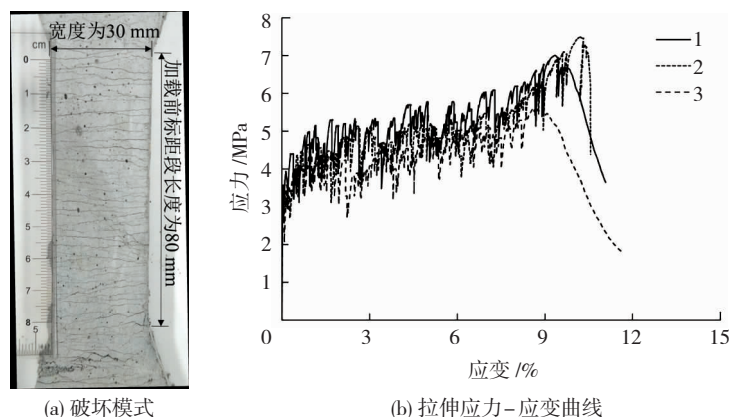


图 6 UHDC 的拉伸破坏模式和应力-应变曲线

Fig. 6 Failure mode and stress-strain curves of UHDC under tensile load

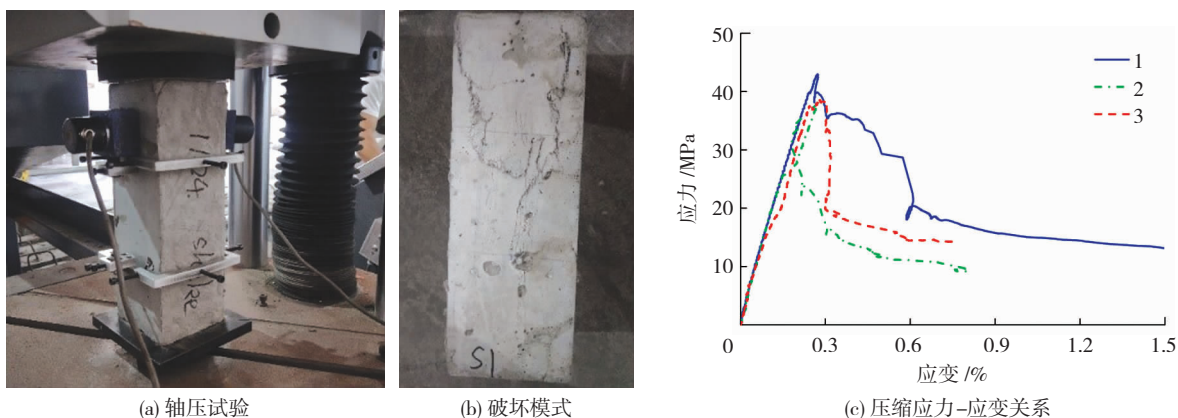


图 7 UHDC 轴压破坏模式和应力-应变曲线

Fig. 7 Failure mode and stress-strain curves of UHDC under axial compression

2 试验结果及讨论

2.1 破坏模式

对于未加固模型结构, 输入峰值加速度为 0.150 g 的地震动后, 木柱裂缝扩展明显, 砌体墙出现明显的滑移裂缝, 同时, 山墙顶的相对位移突然增大。有一面填充墙丧失与木柱、梁的可靠连接, 轻拍墙体顶部会出现轻微晃动, 说明墙体在地震作用下有发生平面外倒塌的可能性。

对于 CFRP 修复模型结构, 当输入峰值加速度为 0.460 g 的地震动时, CFRP 加固结构受到严重破坏。正立面门窗洞口角部有损伤, 出现砖块松动、墙柱节点处砂浆剥落等破坏, 见图 8 (a)。此外, 二层东立面出现沿灰缝开展的剪切斜裂缝, 东立面山墙上纵横墙相交处出现竖向通缝, 见图 8 (b)。结构西立面的破坏模式见图 8 (c), 木柱与墙连接处的砂浆有少量剥落, 一层部分墙体发生剪切破坏。

对于 UHDC 加固结构, 在 9 度罕遇地震下, 墙柱节点处砂浆剥落, 结构仍具有良好的完整性。结构的破坏模式见图 9, 只有在门窗角部的 UHDC 面层上出现一些细小的裂缝, 二层东立面的 UHDC 层出现了一些细小的剪切裂缝。试验结束后, 结构仍保持良好的整体性。

2.2 结构的自振频率和周期

未加固结构和 UHDC 加固结构的固有频率和自振周期见表 2。振动台试验前, 未加固结构 x 向频率为 7.41 Hz, y 向频率为 3.27 Hz。 x 向的墙体数量比 y 向的多, 所以 x 向的刚度比 y 向的刚度高, 见图 3。由于 UHDC 的强度、刚度和延性均高于砌体, 因此 UHDC 面层提高了模型结构的双向刚度。结果表明, UHDC 加固结构的 x 向和 y 向自振频率分别是未加固结构的 1.78 倍和 1.65 倍。

每级地震动输入结束, 通过白噪声扫描得到了结构自振周期变化, 见图 10。UHDC 加固结构的周期随

台面输入地震动的峰值加速度增加而增加,但增加幅度远小于未加固结构,表明 UHDC 加固结构在地震作

用下的刚度退化较小。此外,由于 y 向的结构刚度远小于 x 向,故 y 向的自振周期增幅大于 x 向。

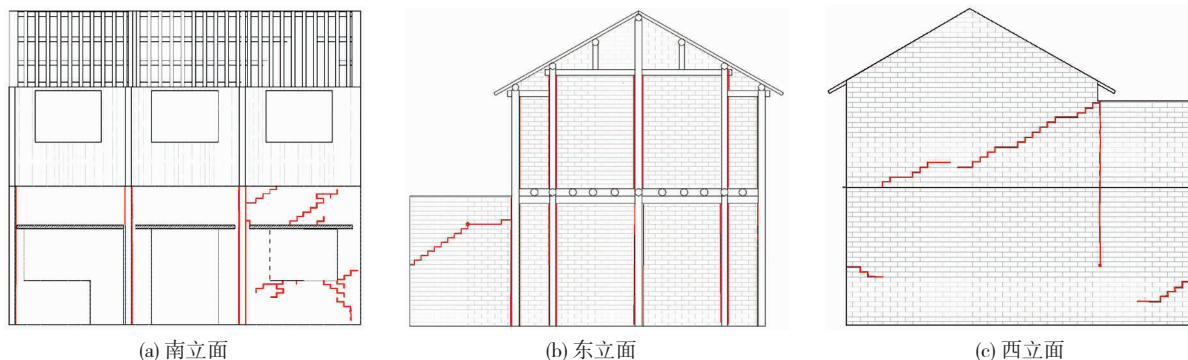


图 8 未加固结构的破坏形态

Fig. 8 Failure mode of un-strengthened structure

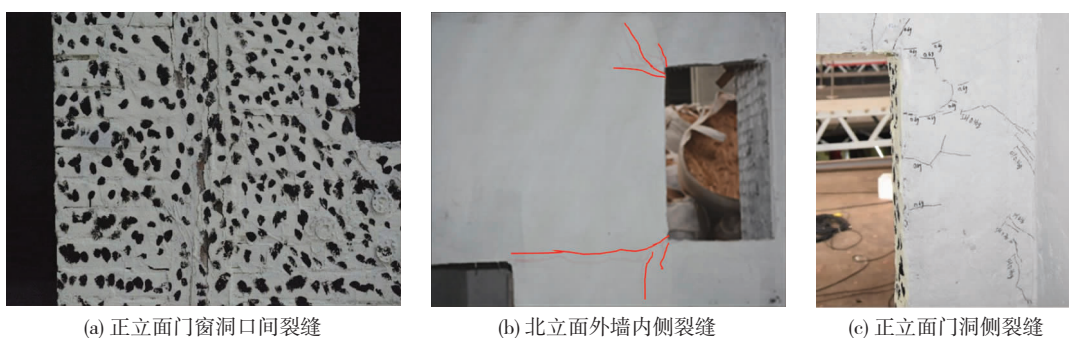


图 9 UHDC 加固结构的破坏模式

Fig. 9 Failure mode of UHDC strengthened structure

表 2 未加固结构和 UHDC 加固结构的自振频率和周期

Tab. 2 Natural frequency and period of un-strengthened structure and UHDC strengthened structure

地震峰值 加速度/ g	地震水准	未加固结构				UHDC 加固结构			
		x 向		y 向		x 向		y 向	
		频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s
加载前		7.41	0.135 0	3.27	0.305 5	13.17	0.075 9	5.38	0.186 0
0.035	7 度多遇	7.18	0.139 3	2.91	0.344 1	13.10	0.076 3	5.25	0.190 5
0.100	7 度设防	6.61	0.151 3	2.87	0.348 8	13.06	0.076 6	4.77	0.209 5
0.150	7.5 度设防	6.18	0.161 8	2.48	0.402 5	13.19	0.075 8	4.77	0.209 5
0.200	7 度罕遇					13.20	0.075 8	4.76	0.210 2
0.280	7.5 度罕遇					12.61	0.079 3	4.15	0.241 1
0.360	8 度罕遇					12.38	0.080 8	3.83	0.261 2
0.460	8.5 度罕遇					11.65	0.085 8	3.52	0.283 8
0.560	9 度罕遇					11.70	0.085 4	2.99	0.334 2
0.600	9 度罕遇 +					11.73	0.085 2	2.98	0.336 0

2.3 位移反应

结构中各个测点的相对位移值等于绝对位移减去振动台台面在相同方向的绝对位移。第一层的位移为 E1 点和 W1 点实测相对位移平均值,第二层的位移为 E3 点和 W3 点的实测相对位移平均值。由于结构模型的原型处于上海郊区,所以本文以台面输入上海人工地震动时的结构的位移反应的相关数据进行分析。不同水准地震作用下,未加固模型结

构和 UHDC 面层加固模型结构的 x 向和 y 向相对位移见图 11 和图 12。一层的层间位移角为 W1 和 E1 测点的相对位移均值与一层层高(基础顶面到 E1 测点的高度)的比值,二层的层间位移角为 W3 和 E3 测点的相对位移均值减去 W1 和 E1 测点的相对位移均值后与二层层高(E1 与 E3 测点的高度差)的比值。在台面输入上海人工地震动的峰值加速度从 0.035 g 增加到 0.600 g ,未加固结构和 UHDC 面

层加固结构的层间位移角见图 13。随台面输入地震动强度的增加,未加固结构和 UHDC 加固结构的层间位移角增大。

7.5 度设防地震作用下,未加固结构和 UHDC 加固结构在 W3 测点的 x 向水平位移分别为 71.12 mm 和 1.21 mm,在 E3 测点的 x 向水平位移分别为 71.55 mm 和 1.34 mm。未加固结构 x 向的最大层间位移角为 31.07‰,而 UHDC 加固结构 x 向的最大层间位移角仅为 0.56‰,且 UHDC 层未出现明显裂缝。即使在 9 度罕遇地震作用下,UHDC 加固结构在 W3 和 E3 测点的 x 向水平位移分别为 7.42 mm 和 6.32 mm,最大层间位移角为 3.96‰。远小于 GB 50011—2011《建筑抗震设计规范》中对底部框架砌体房屋的弹塑性层间位移角限值 1/100^[20]。

对于结构的 y 向,在 7.5 度设防地震作用下,

未加固结构和 UHDC 加固结构在 W3 测点的平面外位移分别为 19.70 mm 和 4.18 mm,在 E3 测点的平面外位移分别为 19.44 mm 和 4.20 mm,UHDC 结构的最大层间位移角仅为 1.78‰。在 8 度罕遇地震作用下,加固后结构的最大层间位移角为 20‰。

在 9 度罕遇地震作用下,UHDC 加固结构 x 向最大层间位移角远小于 GB 50011—2011《建筑抗震设计规范》中对底部框架砌体房屋的弹塑性层间位移角限值 1/100^[20]。可见,UHDC 面层修复后的立贴式砖木结构具有良好的抗震性能,能够满足中国抗震设计规范的抗震要求。相同水准地震作用下,未加固模型结构的 x 向和 y 向相对位移均明显大于 UHDC 加固结构模型中相同测点的相对位移,表明 UHDC 面层不仅起到修复震损结构的目的,还提升了结构的抗侧刚度,使模型结构能够抵抗更强的地震作用。

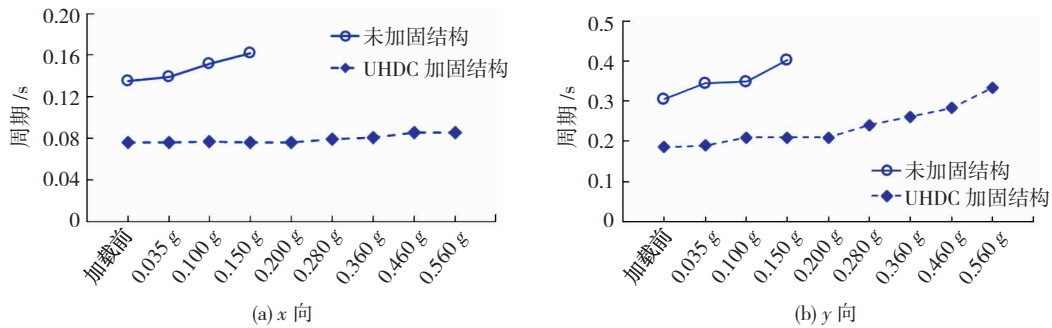


图 10 未加固结构和 UHDC 加固结构的周期变化

Fig. 10 Periodic variation of un-strengthened structure and UHDC strengthened structure

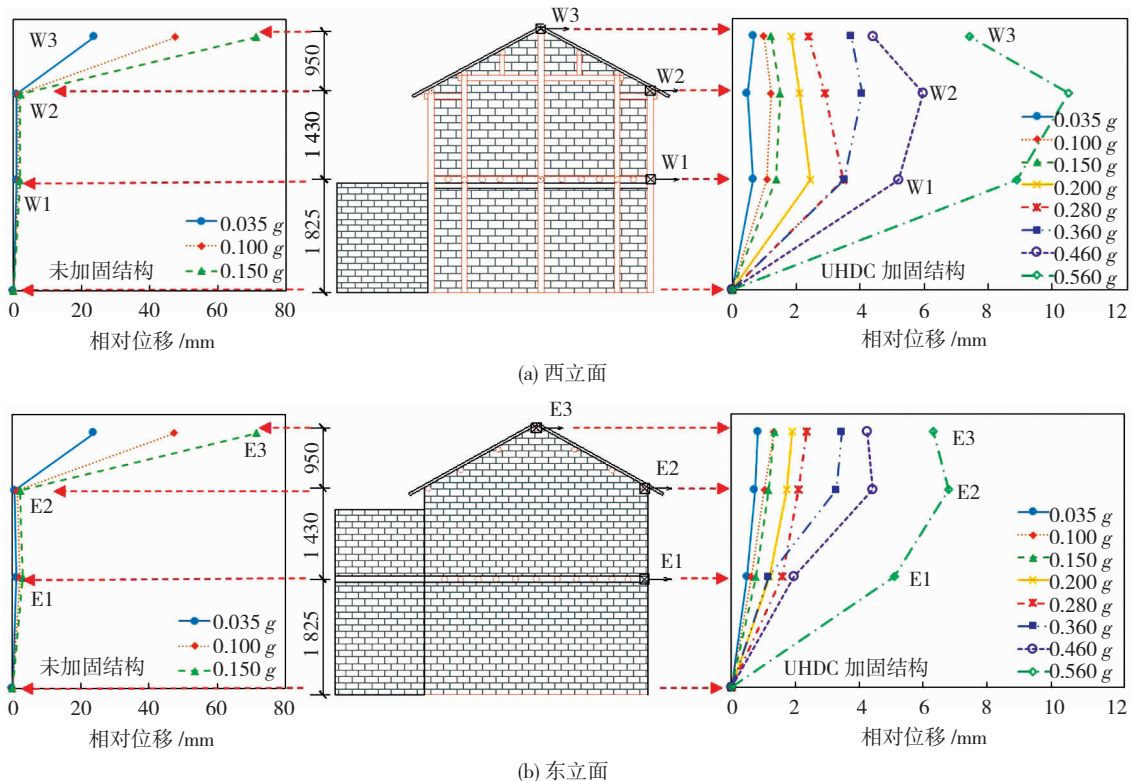


图 11 结构的 x 向相对位移 (台面输入上海人工地震动时)

Fig. 11 Relative displacement of structure in x direction (under Shanghai ground motion)

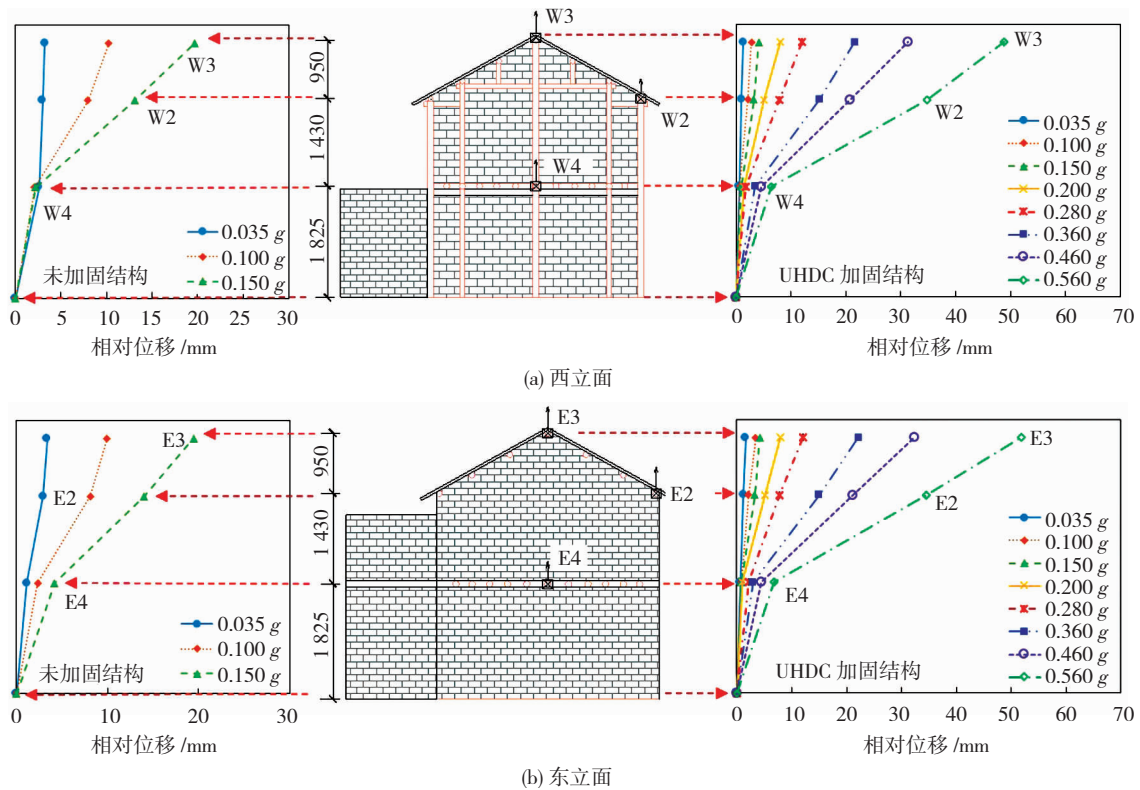


图 12 结构的 y 向相对位移 (台面输入上海人工地震动时)

Fig. 12 Relative displacement of structure in y direction (under Shanghai ground motion)

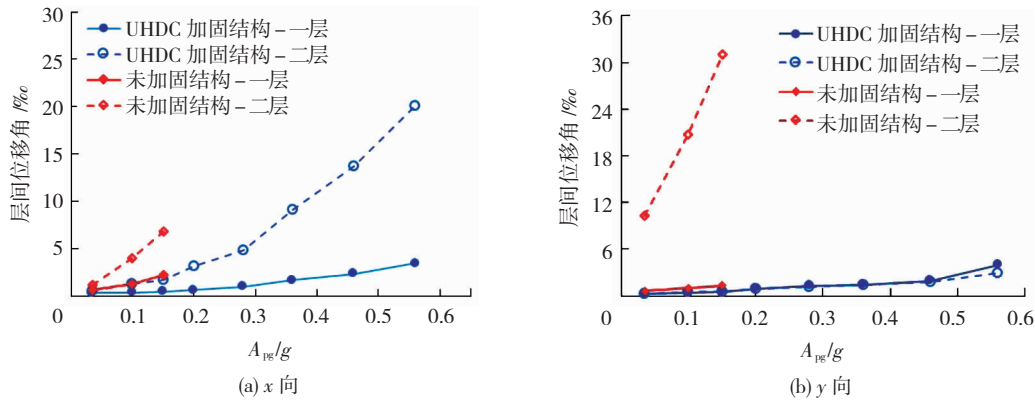


图 13 x 向和 y 向的层间位移角 (台面输入上海人工地震动时)

Fig. 13 Drift ratio in x and y directions (under Shanghai ground motion)

2.4 扭转效应

由于结构的不对称,以及东立面和西立面结构形式的差异,结构的刚度分布不均匀,两个立面相同高度处测点的相对位移不同。因此,依据式 (1) 和式 (2) 计算了屋顶处的扭转位移 $d_{t,x}$ 和扭转位移角 $\theta_{t,max}$ 。台面输入峰值加速度 = 0.150 g (7.5 度设防) 和峰值加速度 = 0.600 g (9 度罕遇) 的上海人工地震动时,结构的扭转位移时程曲线见图 14。

$$d_{t,x} = d_e - d_w \quad (1)$$

$$\theta_{t,max} = \max\left(\frac{|d_e - d_w|}{l_x}\right) \quad (2)$$

式中: d_e 和 d_w 分别是 E3 测点和 W3 测点获得的相对位移; l_x 是模型结构在 x 向上的长度。

结构在强震作用下发生了一定程度的扭转,结构的一层、二层和山墙顶处的 x 向扭转位移见表 3。由此可见,在 7 度多遇、7 度设防和 7.5 度设防地震作用下,UHDC 面层加固结构的山墙顶处 x 向扭转位移明显小于未加固结构的。当加载至 7.5 度设防时,未加固结构和 UHDC 加固结构的屋顶处最大扭转位移分别为 1.54 mm 和 1.34 mm,相应的扭转位移角分别为 1/3 010 和 1/3 480。

8 度罕遇,9 度罕遇和 9 度罕遇 + 地震作用下,UHDC 面层加固结构的屋顶处最大扭转位移分别为 5.15 mm、10.59 mm 和 13.02 mm,对应的扭转位移角为 1/661、1/439 和 1/357。结构扭转效应随着地震动作用的增大而增大,结构在强震作用下的扭转

效应是不能忽略的,虽然 UHDC 层不能完全防止扭转变形,但这种加固措施有效地提高了结构的抗震

性能(包括抗扭转性能)和整体性。

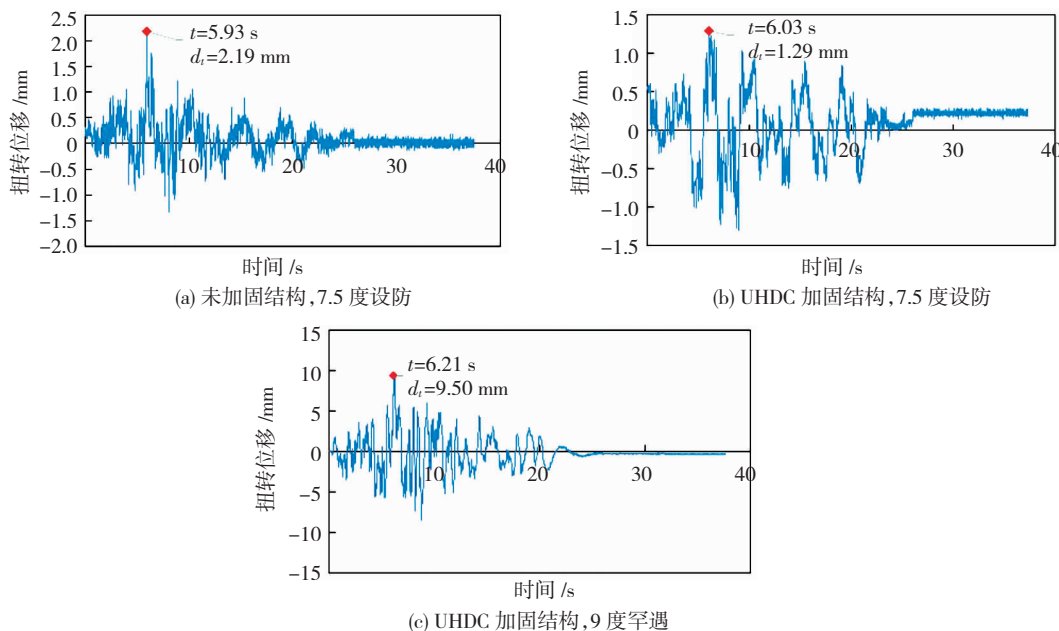


图 14 扭转位移时程曲线

Fig. 14 Time history curves of torsional displacement

表 3 未加固结构和 UHDC 面层加固结构山墙顶处的 x 向扭转位移

Tab. 3 Torsional displacement at top of gable of un-strengthened structure and UHDC strengthened structure in x direction mm

地震水准	未加固结构			UHDC 加固结构		
	El Centro 波	汶川波	上海波	El Centro 波	汶川波	上海波
7 度多遇	0.68	0.52	0.84	0.47	0.61	0.63
7 度设防	0.84	0.82	1.22	1.22	0.76	1.06
7.5 度设防	1.54	1.51	2.19	1.34	1.18	1.29
7 度罕遇				1.95	1.80	2.53
7.5 度罕遇				2.90	3.56	3.11
8 度罕遇				4.25	2.79	5.15
8.5 度罕遇				6.46	3.61	7.03
9 度罕遇				10.59	6.46	9.50
9 度罕遇 +				13.02		

2.5 基底剪力

在上海人工地震动作用下,未加固结构和 UHDC 加固结构一层的滞回曲线(基底剪力(V_b)与 x 向相对位移的关系曲线)见图 15。 W 为结构总质量,包括模型结构质量和配重。加载至 7 度设防和 7.5 度设防时,未加固结构的峰值基底剪力分别为 72.2 kN 和 88.7 kN。此时未加固结构的墙体受损严重,无法再承受更大的地震作用。而在相同强度的地震作用下,UHDC 加固结构的极限位移较小,但抗剪承载力远高于未加固结构。可见,UHDC 层显

著提高了模型结构的刚度和抗剪承载力。

图 16 对比了未加固结构和 UHDC 加固结构的基底剪力随地震动的变化规律。峰值加速度为 0.150 g 和 0.560 g 的上海人工地震动下,加固结构的峰值基底剪力分别达到 79.5 kN 和 460.8 kN。结构水平承载力随着输入地震动峰值加速度的增加而增大。在第三阶段,虽然 UHDC 加固结构在地震作用下遭受了累积损伤,但其基底剪力未出现下降趋势,加固后结构未达到极限状态,表明 UHDC 加固结构具有良好的抗震性能。

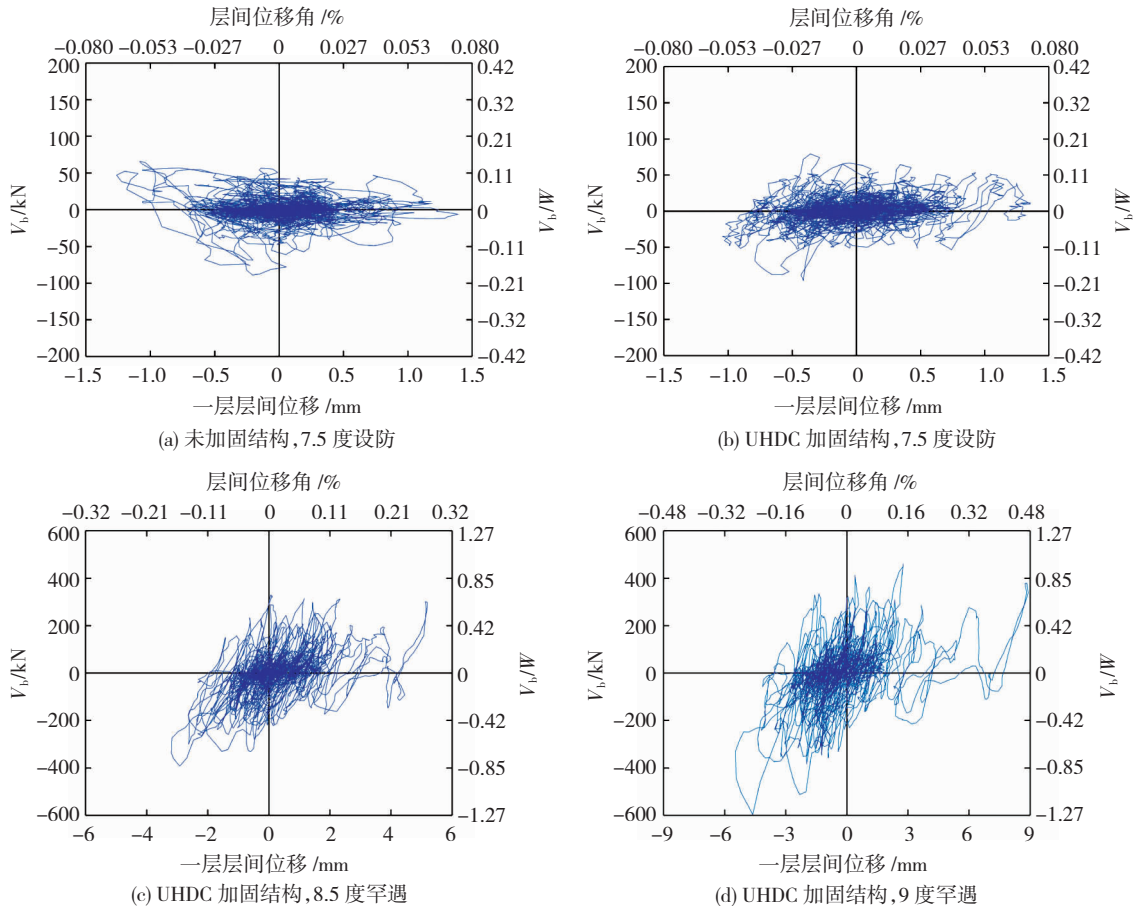


图 15 结构的滞回曲线

Fig. 15 Hysteresis curves of structure

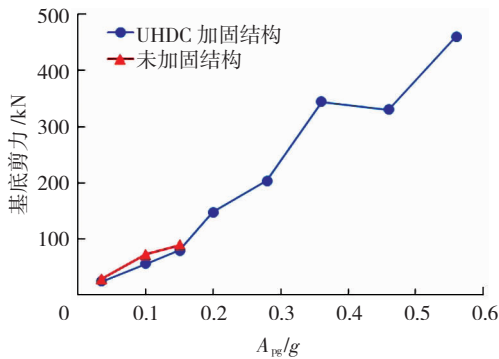


图 16 基底剪力随台面输入地震动的峰值加速度的变化

Fig. 16 Variation of base shear with peak ground motion acceleration

3 结论

对未加固和 UHDC 面层修复后的立贴式砖木结构开展了振动台试验,在振动台台面输入 El Centro、汶川和上海人工地震动,且针对房屋原型地处上海郊区的实际情况,主要选取输入上海人工地震动时的相关数据,对结构加固前后的动力特性、位移反应、结构扭转和抗震承载力进行了对比分析,主要结论如下:

1) 在遭受 7.5 度设防地震作用后,未加固结构损坏严重,整体性能差,已不能抵抗较强的地震,需

要进行专门加固设计才能满足结构的安全性要求。在 9 度罕遇地震作用后,UHDC 加固结构的面层仅出现细密裂缝,未出现脆性破坏,且结构保持了良好的完整性。

2) 在相同强度的地震作用下,UHDC 加固结构在 x,y 方向的相对位移均显著低于未加固结构。由于模型结构在西向和东向的结构形式不同,结构不可避免地发生了扭转,UHDC 面层显著提高了结构的抗扭性能和变形能力。

3) UHDC 面层显著提升了结构的水平抗震承载力,在 9 度罕遇地震作用下,UHDC 面层加固结构的基底剪力达到 460.8 kN。UHDC 面层加固技术能有效地提高砖木结构的抗震性能。

UHDC 加固结构的抗震性能可以基本恢复到地震损伤前的状态,结构整体满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标,UHDC 面层对立贴式砖木结构的加固效果良好,且施工简单,是一种经济可行的加固方式。

参考文献

[1] LIU Hongbiao, GUO Xun, YU Yuanyuan. Analysis of seismic resistance capability of masonry structure [J]. Advanced Materials Research, 2011, 255/256/257/258/259/260: 2380. DOI: 10.

- 4028/www.scientific.net/AMR.255-260.2380
- [2] LIU Wei, TONG Liping, LI Jingyu. Damage analysis of masonry structure based on Wenchuan earthquake [C]//International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Wuhan: IEEE, 2010
- [3] 戴必辉,陶忠,叶燎原,等.墨江 M5.9 地震农危改房屋震害调查与分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(11):121
DAI Bihui, TAO Zhong, YE Liaoyuan, et al. Investigation and analysis of seismic damage to the renovated rural dilapidated residences in Mojiang M5.9 earthquake [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(11):121. DOI:10.16339/j.cnki.hdxzbk.2021.11.012
- [4] 潘毅,陈建,包韵雷,等.长宁 6.0 级地震村镇建筑震害调查与分析[J].建筑结构学报,2020,41(增刊1):297
PAN Yi, CHEN Jian, BAO Yunlei, et al. Seismic damage investigation and analysis of rural building in Ms6.0 Changning earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(S1):297. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2020.S1.033
- [5] 王满生,杨威,陈俞,等.北京地区农村砖木结构振动台试验研究[J].地震工程与工程振动,2012,32(1):128
WANG Mansheng, YANG Wei, CHEN Yu, et al. Shaking table test on a typical brick-timber structure model in rural areas of Beijing[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012,32(1):128
- [6] 曹颖,姚新强,李龙飞,等.天津近代典型砖木结构建筑基于安全鉴定的抗震性能评价[J].地震工程学报,2019,41(4):880
CAO Ying, YAO Xinqiang, LI Longfei, et al. Seismic performance evaluation of typical modern brick-wood structures in Tianjin based on safety assessment[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019,41(4):880. DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.880
- [7] KOURIS L, TRIANTAFILLOU T C. State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM) [J]. Construction and Building Materials,2018,188:1221
- [8] 李晓琴,周旭,李世华,等.硅灰改性高韧性水泥基材料性能试验研究[J/OL].土木与环境工程学报(中英文)[2021-01-29].https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210128.1539.006.html
LI Xiaoqin, ZHOU Xu, LI Shihua, et al. Experimental study on high toughness cement-based materials modified by silica fume[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering[2021-01-29].https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210128.1539.006.html. DOI:10.11835/j.issn.2096-6717.2021.012
- [9] 邓明科,张伟,李宁.高延性混凝土加固砌块砌体墙抗震性能研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(9):85
DENG Mingke, ZHANG Wei, LI Ning. Study on seismic behavior of concrete block masonry walls strengthened with high ductile concrete[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020,47(9):85. DOI:10.16339/j.cnki.hdxzbk.2020.09.010
- [10] YU Kequan, WANG Yichao, YU Jiangtao, et al. A strain-hardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8% [J]. Construction and Building Materials, 2017, 137: 410. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.060
- [11] WANG Yichao, LIU Feichi, YU Jiangtao, et al. Effect of polyethylene fiber content on physical and mechanical properties of engineered cementitious composites [J]. Construction and Building Materials, 2020,251:118917. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118917
- [12] 王义超,侯梦君,余江滔,等.聚乙烯纤维制备超高延性水泥基复合材料的试验研究[J].材料导报,2018,32(20):50
WANG Yichao, HOU Mengjun, YU Jiangtao, et al. Experimental study on mechanical properties of ultra-high ductile cementitious composites[J]. Materials Review, 2018, 32(20):50. DOI:10.11896/j.issn.1005-023X.2018.20.008
- [13] YU Jiangtao, YE Junhong, ZHAO Bin, et al. Dynamic response of concrete frames including plain ductile cementitious composites [J]. Journal of Structure Engineering, 2019, 145(6):04019042. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002292
- [14] DONG Fangyuan, WANG Hanpeng, JIANG Fangming, et al. In-plane shear behavior of masonry panels strengthened with ultra-high ductile concrete (UHDC) [J]. Engineering Structures, 2022,252:113609. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.113609
- [15] YU Kequan, LI Lingzhi, YU Jiangtao, et al. Feasibility of using ultra-high ductility cementitious composites for concrete structures without steel rebar [J]. Engineering Structures, 2018, 170:11. DOI:10.1016/j.engstruct.2018.05.037
- [16] 陆洲导,林晨旭,余江滔,等.可用于无钢筋建造的超强超韧水泥基复合材料[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(6):94
LU Zhoudao, LIN Chenxu, YU Jiangtao, et al. High strength ultra-high ductile cementitious composite developed for steel-free construction [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017,45(6):94. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2017.06.014
- [17] 俞可权,余江滔,李凌志,等.可用于无筋建造的超高延性水泥基复合材料力学性能研究[J].建筑结构,2019,49(2):29
YU Kequan, YU Jiangtao, LI Lingzhi, et al. Research on mechanical property of ultra-high ductility cementitious composites in construction without steel reinforcement[J]. Building Structure, 2019,49(2):29. DOI:10.19701/j.jzjg.2019.02.006
- [18] 建筑抗震设计规程:DGJ 08-9-2013[S].上海:上海市建筑建材业市场管理总站,2013
Code for seismic design of buildings: DGJ 08-9-2013 [S]. Shanghai: Shanghai City Construction and Building Materials Industry Market Management Station,2013
- [19] CUI Cunyu, LI Zhanong, CHEN Yang, et al. Seismic performance and repair of Chuan-dou timber-framed masonry building [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 118:104941. DOI:10.1016/j.engfailanal.2020.104941
- [20] 建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010
Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010

(编辑 赵丽莹)