

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230313004

# 超高延性混凝土加固砌体墙抗震性能研究\*

吴孝鑫, 谢群, 赵鹏, 井玉炜, 林明强

(济南大学土木建筑学院, 山东 济南 250022)

**摘要:**为研究超高延性混凝土(Ultra-High Ductile Concrete, UHDC)加固砌体墙的抗震效果,对两个实心墙和两个空斗墙进行了低周反复加载试验。结果表明,与未加固墙相比,加固后实心墙承载力提升31%,峰值位移降低了30%;加固后空斗墙承载力提升了223%,峰值位移提高了471%。利用OpenSees软件对UHDC加固砌体墙进行了建模,分析了不同加固层厚度、加固方式及竖向压应力等因素对抗震性能的影响。结果表明:对于实心墙,加固层厚度为10、20、30 mm时,峰值承载力分别提高16.0%、36.2%、56.1%,峰值位移分别降低了28.3%、26.7%、26.7%;对于空斗墙,加固层厚度为10、15、20 mm时,峰值承载力分别提高117.4%、179.5%、243.4%,峰值位移分别提高345.5%、522.7%、506.1%。当竖向压应力为0.6 MPa和0.9 MPa时,实心墙峰值承载力较0.3 MPa时分别提高16.8%和33.0%,峰值位移分别降低12.0%、16.0%;空斗墙峰值承载力较0.15 MPa时提高6.5%和10.5%,峰值位移分别提高2.8%、0.0%。当分别采用整面加固、斜交条带加固、正交条带加固时,实心墙峰值承载力分别提高36.2%、12.0%、5.4%,峰值位移分别降低26.7%、28.3%、28.3%;空斗墙峰值承载力分别提高179.5%、80.1%、39.3%,峰值位移分别提高522.7%、203.0%、203.0%。最后提出了UHDC加固砌体墙抗剪承载力计算公式,与试验和模拟结果比较,具有较好的精度,可为加固设计提供理论支持。

**关键词:** 超高延性混凝土; 加固; 砌体; 抗震性能; OpenSees

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0859-11

## Study on Seismic Performance of Masonry Walls Reinforced with Ultra-high Ductile Concrete

WU Xiaoxin, XIE Qun, ZHAO Peng, JING Yuwei, LIN Mingqiang  
(School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, China)

**Abstract:** To investigate the seismic performance of masonry walls reinforced with ultra-high ductile concrete (UHDC), low-cycle repeated loading tests were conducted on two solid walls and two cavity walls. The results showed that, compared to unreinforced walls, the load-bearing capacity of the solid walls and cavity walls increased by 31% and 223%, respectively, while the peak displacement decreased by 30% and 471%, respectively. The UHDC-reinforced masonry walls were modeled using OpenSees software to assess the impact of various factors on seismic performance, including re-

\* 收稿日期:2023-03-13;修回日期:2023-05-15

**基金项目:**国家自然科学基金(52108214)、山东省住房城乡建设科技计划项目(2020-K5-18)、建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室开放课题(MEKL202006)资助

**作者简介:**吴孝鑫(1999—),男,硕士研究生。主要从事结构加固方面的研究。E-mail:1753485701@qq.com

**通讯作者:**谢群\*(1979—),男,教授,博士生导师,博士。主要从事结构工程方面的研究。E-mail:cea\_xieq@ujn.edu.cn

inforcement layer thickness, reinforcement mode, and axial compressive stress. The results indicated that, for solid walls, when the reinforcement layer thickness was 10, 20, and 30mm, the peak load-bearing capacity increased by 16.0%, 36.2%, and 56.1%, respectively, while the peak displacement decreased by 28.3%, 26.7%, and 26.7%, respectively. For cavity walls, the peak load-bearing capacity increased by 117.4%, 179.5%, and 243.4%, respectively, and the peak displacement increased by 345.5%, 522.7%, and 506.1%, respectively, when the reinforcement layer thickness was 10, 15, and 20mm. When the axial compressive stress was 0.6 MPa and 0.9 MPa, the peak load-bearing capacity of solid walls increased by 16.8% and 33.0%, respectively, compared to 0.3 MPa, while the peak displacement decreased by 12.0% and 16.0%, respectively. Compared to 0.15 MPa, the peak load-bearing capacity of cavity walls increased by 6.5% and 10.5%, with peak displacement increasing by 2.8% and 0.0%, respectively. When full-surface, oblique strip, and orthogonal strip reinforcement methods were used, the peak load-bearing capacity of solid walls increased by 36.2%, 12.0%, and 5.4%, respectively, with peak displacement decreasing by 26.7%, 28.3%, and 28.3%, respectively. For cavity walls, the peak load-bearing capacity increased by 179.5%, 80.1%, and 39.3%, respectively, with peak displacement increasing by 522.7%, 203.0%, and 203.0%, respectively. Finally, a formula for calculating the shear bearing capacity of UHDC-reinforced masonry walls was proposed, which showed reliable accuracy when compared with experimental and simulation results. The formula provides theoretical support for reinforcement design.

**Keywords:** ultra-high ductile concrete; reinforcement; masonry; seismic performance; OpenSees

## 0 引言

砌体结构在我国既有建筑中占有相当大的比例,其整体性和抗震性能较差,需要对其进行加固。传统加固方式施工繁琐,对既有建筑使用空间和功能影响大,因此近年来具有轻质高强、空间占用少、施工便捷等特点的高性能混凝土或水泥基材料成为砌体加固材料的研究热点和方向。寇佳亮等<sup>[1]</sup>采用高延性混凝土(High Ductile Concrete, HDC)加固砌体结构,建立了三折线恢复力模型。A.N. Niasar等<sup>[2]</sup>, L. Tong等<sup>[3]</sup>,王卓琳等<sup>[4]</sup>研究发现高延性纤维混凝土面层与砖墙具有良好的粘结性能,能有效限制墙体的开裂和破坏,提高砖砌体墙的延性和耗能能力。邓明科等<sup>[5-7]</sup>研究发现, HDC加固砌体结构能有效抑止墙体的开裂和破坏,改善墙体的脆性破坏特征,并提出了有构造柱的空斗墙抗剪承载力计算公式。部分学者借助有限元软件对新材料加固砌体墙的抗震性能进行分析。王亭等<sup>[8]</sup>用ANSYS模拟了加固砖砌体试件的低周反复加载,得出结论:将钢筋网水泥砂浆抹面加固技术应用于历史风貌建筑的低强度砂浆砖砌体,抗剪承载力明

显提高,抗震性能有较大改善。田颖等<sup>[9]</sup>利用ABAQUS对喷涂聚氨酯弹性体加固砖墙抗震性能进行建模,发现双面加固有利于提高承载力,而单面加固则更有效提高变形与耗能能力,最佳加固厚度为6 mm。杜德润等<sup>[10]</sup>采用ABAQUS建立不同交叉加固方式对砌体墙进行加固的模型,发现采用斜腹杆桁架截面形式加固效果最好。

相比于聚乙烯醇(PVA)纤维和玄武岩纤维,聚乙烯(PE)纤维具有更高的抗拉强度和弹性模量,更有利于发挥桥接作用,使材料的强度和延性得到提高<sup>[11-12]</sup>。因此,本文采用PE纤维制备了一种超高延性混凝土(Ultra-High Ductile Concrete, 简称UHDC)用于砌体结构抗震加固, UHDC具有高抗拉强度,裂缝开展细密等特点,高强度和高延性同时具备<sup>[13]</sup>。通过试验、有限元模拟和理论分析,研究了不同加固层厚度、加固方式和竖向应力水平对实心墙和空斗墙抗震加固的影响。

## 1 试验概况

试件设计考虑实心墙和空斗墙两种代表性砌体,每一个试件分为三部分,分别为顶梁、墙体和底

梁。顶梁用于平均分配竖向荷载,底梁通过高强螺栓与地面连接,墙体与顶梁、底梁之间采用高强砂浆进行连接。空斗墙采取三斗一眠的砌筑方式,均采用黏土砖砌筑,墙体的设计尺寸如图1所示,为避免试验过程中墙体局部压溃,在墙体四角设计混凝土块替代砖。墙体砌筑时通过抠缝的方式增强UHDC与既有墙体表面粘结。共进行了四片墙体的低周反复加载试验,其中UHDC加固墙2片,作为对比的未加固墙2片,试件信息与加固方案见表1。

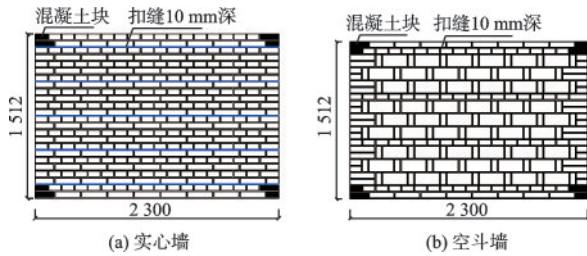


图1 试验墙体示意  
Fig.1 Schematic diagram of test walls

表1 试件信息

Table 1 Specimen information

试件名称	墙体类型	压应力/MPa	加固方式	加固厚度/mm	砂浆等级/MPa
WS	实心墙	0.6	不加固	—	M1
WH	空斗墙	0.3	不加固	—	M1
WS-R	实心墙	0.6	单面	20	M1
WH-R	空斗墙	0.3	双面	15	M1

UHDC的组分包括P·O 52.5普通硅酸盐水泥、粉煤灰、聚乙烯纤维、水和化学外加剂等。UHDC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%<sup>[14]</sup>。实测黏土砖抗压强度为9.9 N/mm<sup>2</sup>,UHDC抗压强度为45 N/mm<sup>2</sup>,抗拉强度为5.4 N/mm<sup>2</sup>,砂浆强度为1.0 N/mm<sup>2</sup>。

### 1.1 加载装置与制度

采用2 500 kN MTS作动器施加往复水平荷载,竖向恒定压力由电液伺服作动器提供。水平加载采用位移控制,开裂前每级荷载循环一次,开裂后加载每级荷载循环三次,位移如下:0.5、1、2、3、4、5、6、7、8、10、12、14、16、20、24、30、40 mm。加载装置如图2所示。

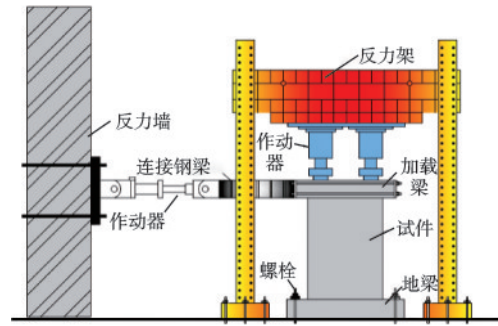


图2 拟静力试验加载示意  
Fig.2 Schematic of quasi-static loading test

## 2 实验结果及分析

### 2.1 破坏过程

裂缝分布如图3所示。实心墙加固试件WS-R在加载过程中角部首先出现微小裂缝,随着荷载的增加,裂缝数量增多,且大多沿45°方向延伸。至最终破坏时,UHDC面层未出现贯穿型主裂缝多为细密裂缝。UHDC面层有效延缓了墙体裂缝形成和发展,使得墙体刚度变大,至最终破坏仍具有良好的整体性。未加固的实心墙体试件WS在破坏时出现沿对角线方向的两条阶梯状主裂缝,最大裂缝宽度达到2 mm以上。

空斗墙加固试件WH-R也是在角部首先出现裂缝,随后沿45°方向发展延伸,裂缝宽度增加不明显。最终破坏时形成两条平行的45°主裂缝,与WS-R类似,UHDC面层裂缝数量虽然较大,但以短细裂缝为主。未加固的空斗墙体试件WH的破坏

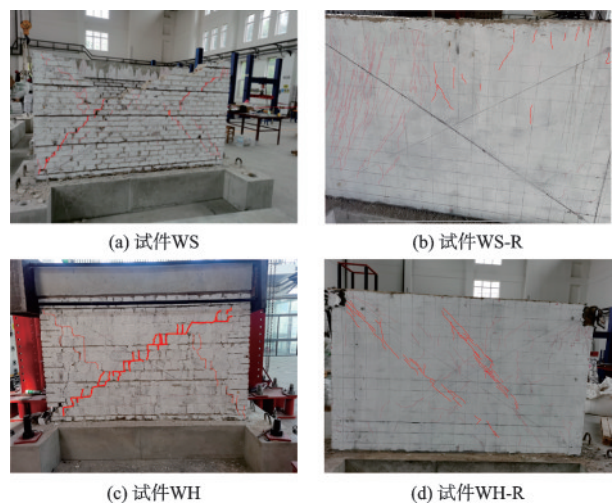


图3 试件的裂缝分布

Fig.3 Crack distribution in specimens

形态与试件 WS 相近,沿墙体对角线形成贯通型主裂缝,多处砂浆与砖体出现粘结破坏。

各试件主要试验结果见表 2。表中数据以推为正,拉为负,加固后的实心墙体峰值荷载较未加固墙提高显著,但峰值位移变化不大,极限荷载和位移也有明显提高,说明采用 UHDC 加固后砌体墙的抗震性能和变形能力明显改善。

表 2 主要试验结果  
Table 2 Main experimental results

试件	加载方向	峰值荷载/kN	峰值位移/mm	极限荷载/kN	极限位移/mm
WS	推	263	10	230	12
	拉	-244	-10	-212	-12
WH	推	117	7	87	14
	拉	-111	-4	-64	-14
WS-R	推	346	7	228	15
	拉	-374	-10	-267	-15
WH-R	推	367	40	367	40
	拉	-360	-40	-360	-40

## 2.2 滞回曲线

加固前后实心墙和空斗墙的滞回曲线对比如图 4 所示。UHDC 加固后,墙体的峰值承载力、峰值位移得到有效提高,滞回环面积增大,能够有效地

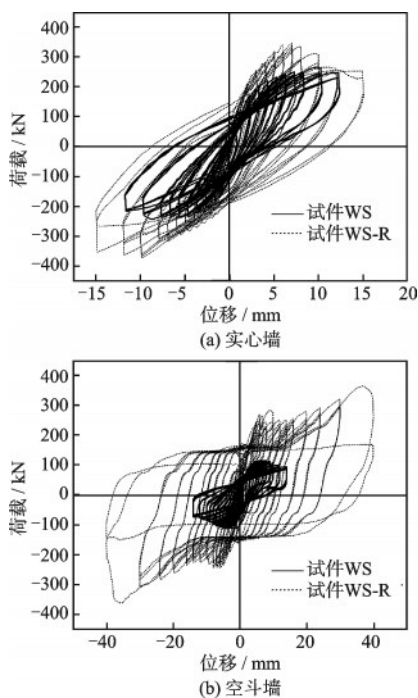


图 4 滞回曲线  
Fig.4 Hysteresis curves

增加砌体墙的耗能性能。试件 WS-R 采用单面加固方式,对墙体形成的约束作用不如双面加固,且加载过程中试件底座产生一定滑移,故本试验过程中,试件 WS-R 的加固效果不如试件 WH-R。

## 3 有限元分析

为进一步了解 UHDC 对砌体墙的抗震加固性能,采用 OpenSees 软件对砌体墙进行有限元分析。将砌体墙看作连续均匀各向同性材料,忽略砌块与砂浆之间的相互作用和材料差异<sup>[15]</sup>。

### 3.1 模型选取

砌体和 UHDC 均选用 Concrete04 本构模型,它是基于 Popovics 模型发展而来单轴混凝土本构模型<sup>[16]</sup>,如图 5 所示。

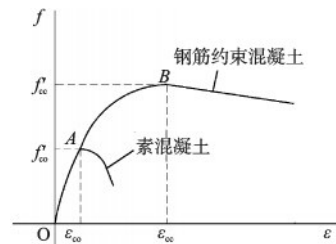


图 5 Concrete04 应力-应变关系  
Fig.5 Stress-strain relationship of Concrete 04

$$f = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

式中, $f$ 为混凝土应力; $f'_{cc}$ 为钢筋混凝土峰值应力。

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right]} \quad (2)$$

式中, $\epsilon$ 为混凝土应变; $\epsilon_{co}$ 为素混凝土峰值应变; $f'_{co}$ 为素混凝土峰值应力。

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (3)$$

式中, $E_c$ 为混凝土初始弹性模量; $E_{sec}$ 为应力达到峰值时的割线模量,其余参数见文献[16]。

对于砌体的抗压强度、极限压应变和 UHDC 材料性能则根据实测数据取值。

### 3.2 模型验证

将数值模拟得到的滞回曲线、骨架曲线和刚度退化曲线等抗震特征指标与试验结果进行对比,如图 6~8 所示。总体来看,模拟结果与试验

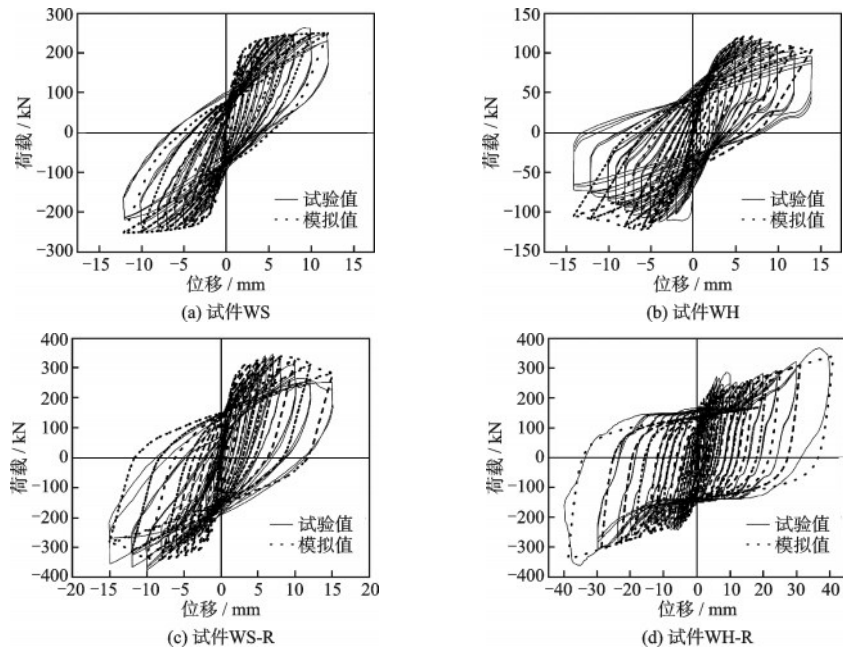


图6 滞回曲线对比图

Fig.6 Comparison of hysteresis curves

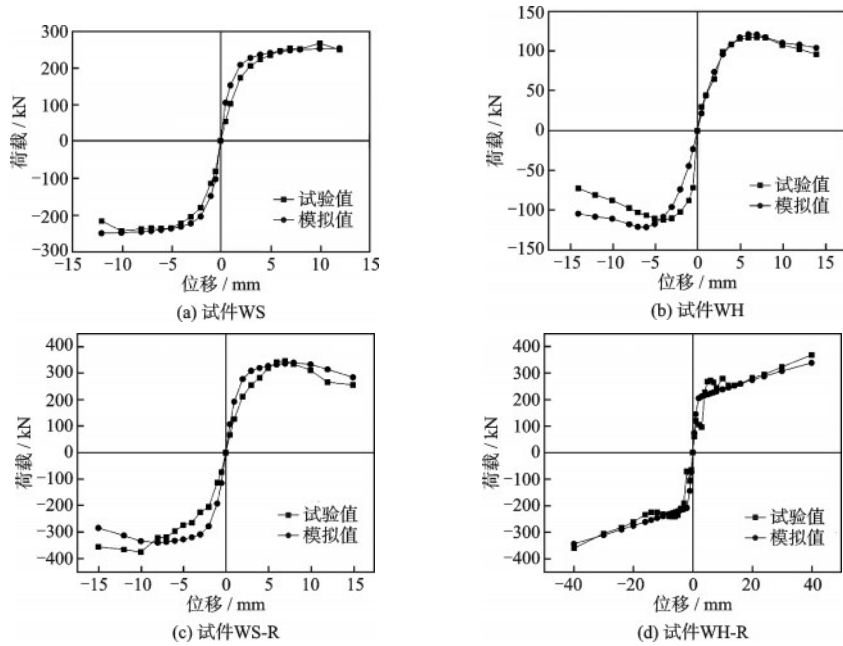


图7 骨架曲线对比图

Fig.7 Comparison of skeleton curves

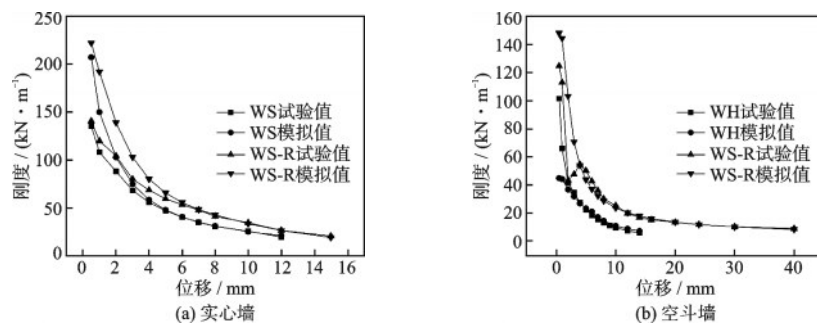


图8 刚度退化曲线对比图

Fig.8 Comparison of stiffness degradation curves

吻合较好,由于砖与砂浆的粘结失效和裂缝发展,造成加载后期二者有一定的误差。峰值荷载对比见表3,模拟值相对于试验值的误差均在10%以内,证明OpenSees有限元分析结果具有较好精度,适用于实体墙与空斗墙的抗震加固分析。

表3 模拟值与试验值对比

Table 3 Comparison of simulated and experimental values

试件名称	加载方向	试验峰值荷载/kN	模拟峰值荷载/kN	误差/%
WS	推	263.5	250.3	-5.0
	拉	-244.0	-250.3	2.6
WH	推	117.0	121.7	4.0
	拉	-111.8	-121.7	8.9
WS-R	推	346.4	340.8	-1.6
	拉	-374.3	-340.8	-8.9
WH-R	推	367.0	340.2	-7.3
	拉	-360.3	-340.2	-5.6

### 3.3 参数分析

利用所建立的有限元模型,分别考虑不同加固厚度、加固方式和竖向应力大小等参数变化对砌体墙抗震性能的影响,共进行了18个工况下的参数化建模分析,各种参数取值见表4,两种条带加固方式如图9所示。

#### 3.3.1 加固厚度影响

三种加固厚度下的实心墙和空斗墙对比如图10所示,随着加固厚度的增加,实心墙和空斗墙的极限承载力不断提升,滞回环更加饱满,耗能能力增强。

随着加固厚度增加,刚度退化趋势相近,下降速率基本相同。对于实心墙体而言,加固厚度小的曲线的刚度始终高于加固厚度大的曲线。对于空斗墙而言,加固厚度大的曲线的刚度最高,表明加固厚度会影响刚度的大小,但对刚度退化的速率影响较小。

实心墙峰值承载力较未加固墙体分别提高16.0%、36.2%、56.1%,峰值位移分别降低28.3%、26.7%、26.7%,原因是UHDC虽然有较好的延性与韧性,但当砌体结构严重受损时,UHDC材料已经无法发挥作用;空斗墙峰值承载力较未加固墙体分别提高117.4%、179.5%、243.4%,峰值位移分别提高354.5%、522.7%、506.1%。由于空斗墙采用双

表4 模型参数化分析

Table 4 Parametric analysis of models

影响参数	试件编号	加固厚度/mm	加固方式	竖向压应力/MPa
厚度	WS <sub>10</sub> -Z <sub>0.6</sub>	10	整面	0.6
	WS <sub>20</sub> -Z <sub>0.6</sub>	20	整面	0.6
	WS <sub>30</sub> -Z <sub>0.6</sub>	30	整面	0.6
	WH <sub>10</sub> -Z <sub>0.3</sub>	10	整面	0.3
	WH <sub>20</sub> -Z <sub>0.3</sub>	20	整面	0.3
	WH <sub>30</sub> -Z <sub>0.3</sub>	30	整面	0.3
加固方式	WS <sub>20</sub> -Z <sub>0.6</sub>	20	整面	0.6
	WS <sub>20</sub> -J <sub>0.6</sub>	20	斜交条带	0.6
	WS <sub>20</sub> -L <sub>0.6</sub>	20	正交条带	0.6
	WH <sub>15</sub> -Z <sub>0.3</sub>	15	整面	0.3
	WH <sub>15</sub> -J <sub>0.3</sub>	15	斜交条带	0.3
	WH <sub>15</sub> -L <sub>0.3</sub>	15	正交条带	0.3
竖向压应力	WS <sub>20</sub> -Z <sub>0.3</sub>	20	整面	0.3
	WS <sub>20</sub> -Z <sub>0.6</sub>	20	整面	0.6
	WS <sub>20</sub> -Z <sub>0.9</sub>	20	整面	0.9
	WH <sub>15</sub> -Z <sub>0.15</sub>	15	整面	0.15
	WH <sub>15</sub> -Z <sub>0.30</sub>	15	整面	0.30
	WH <sub>15</sub> -Z <sub>0.45</sub>	15	整面	0.45

注:WS表示实心墙,WH表示空心墙,10、15、20表示加固层厚度,Z表示整面加固方式,J表示斜交条带加固方式,L表示正交条带加固方式,0.15、0.3、0.45、0.6、0.9表示竖向应力大小取值

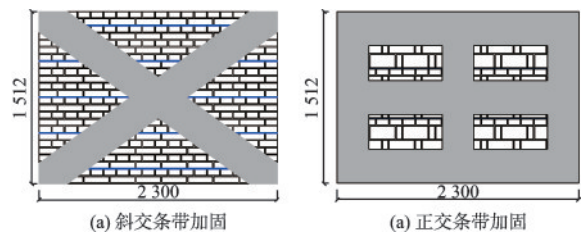


图9 条带式加固示意图

Fig.9 Schematic diagram of strip reinforcement

面加固,对墙体形成连续整体约束,因此承载力和变形均提升更为明显。

为进一步从经济性角度分析加固效率,本文提出加固提升率指标,即单位UHDC用量下峰值承载力的提升值,见式(4)。

$$P = \frac{\Delta_F}{V} \quad (4)$$

式中,P表示提升率; $\Delta_F$ 表示加固后墙体承载力提升值(kN);V表示UHDC体积用量。

不同加固厚度的提升率对比见表5,加固厚度对提升率的影响差别不大。空斗墙的加固提升率高于实心墙。

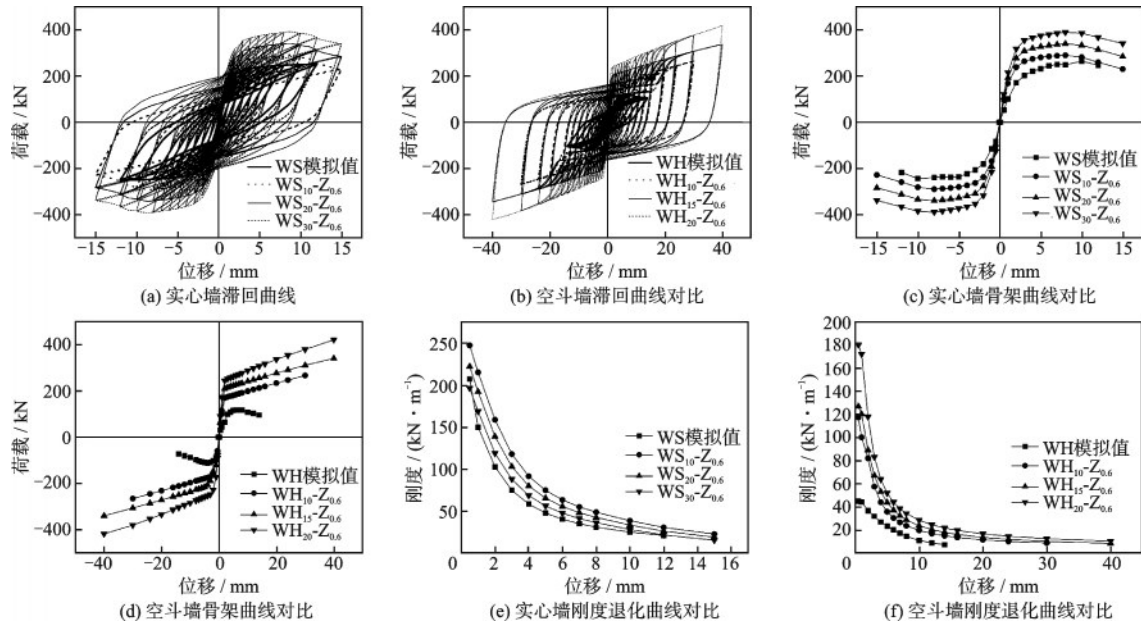


图 10 不同加固厚度的对比

Fig.10 Comparison of different reinforcement thicknesses

表 5 不同加固厚度下的加固提升率

Table 5 Reinforcement enhancement rate under different reinforcement thicknesses

试件编号	峰值承载力/MPa	峰值位移/mm	UHDC用量/mm <sup>3</sup>	提升率/(kN·mm <sup>-3</sup> )
WS <sub>0</sub>	250.3	12.0	—	—
WS <sub>10</sub> -Z <sub>0.6</sub>	290.4(16%)	8.6(-28.3%)	2.9×10 <sup>7</sup>	1.4×10 <sup>-6</sup>
WS <sub>20</sub> -Z <sub>0.6</sub>	340.8(36.2%)	8.8(-26.7%)	5.8×10 <sup>7</sup>	1.5×10 <sup>-6</sup>
WS <sub>30</sub> -Z <sub>0.6</sub>	390.8(56.1%)	8.8(-26.7%)	8.8×10 <sup>7</sup>	1.6×10 <sup>-6</sup>
WH <sub>0</sub>	121.7	6.6	—	—
WH <sub>10</sub> -Z <sub>0.6</sub>	264.6(30%)	30.0(354.5%)	7.7×10 <sup>7</sup>	1.9×10 <sup>-6</sup>
WH <sub>20</sub> -Z <sub>0.6</sub>	340.2(41.1%)	41.1(522.7%)	1.2×10 <sup>8</sup>	1.8×10 <sup>-6</sup>
WH <sub>30</sub> -Z <sub>0.6</sub>	417.9(40.0%)	40.0(506.1%)	1.5×10 <sup>8</sup>	2.0×10 <sup>-6</sup>

### 3.3.2 加固方式影响

常用的加固方式为整面加固、正交条带式加固、斜交条带式加固三种,不同加固方式下的对比如图 11 所示。整面加固的滞回环面积明显高于正交条带加固和斜交条带加固,正交条带加固和斜交条带加固滞回环面积大致相同。

在整个加载过程中,三者刚度退化速率基本相同。整面加固方式的刚度最大,斜交条带式加固次之,正交条带加固最差,但均高于未加固墙体。条带式加固较整面加固刚度减小较为明显,斜交条带加固与正交条带加固方式下墙体刚度差异较小,这是因为条带式加固面积较整面加固面积相差较大,而正交和斜交条带式加固面积相差较小。

通过对比分析可知,三种加固方式下实心墙较未加固实心墙峰值承载力分别提高 36.2%、12.0%、

5.4%,峰值位移则降低 26.7%、28.3%、28.3%。对于空斗墙而言,三种加固方式峰值承载力分别提高 179.5%、80.1%、39.3%,峰值位移分别提高 522.7%、203.0%、203.0%,表明三种加固方式都能提高砌体墙的抗震性能,整面加固的承载力提升最大。

不同加固方式下提升率见表 6,通过比较不同加固方式的提升率可知,两类墙体均为整面加固的方式提升率最高,三种加固方式下空斗墙的提升率均高于实心墙。

### 3.3.3 竖向压应力影响

不同竖向压应力下的对比如图 12 所示,对于实心墙,随着竖向压应力的增大,滞回环的面积逐渐增大。对于空斗墙,随着竖向压应力的增大,滞回环的面积基本不变。

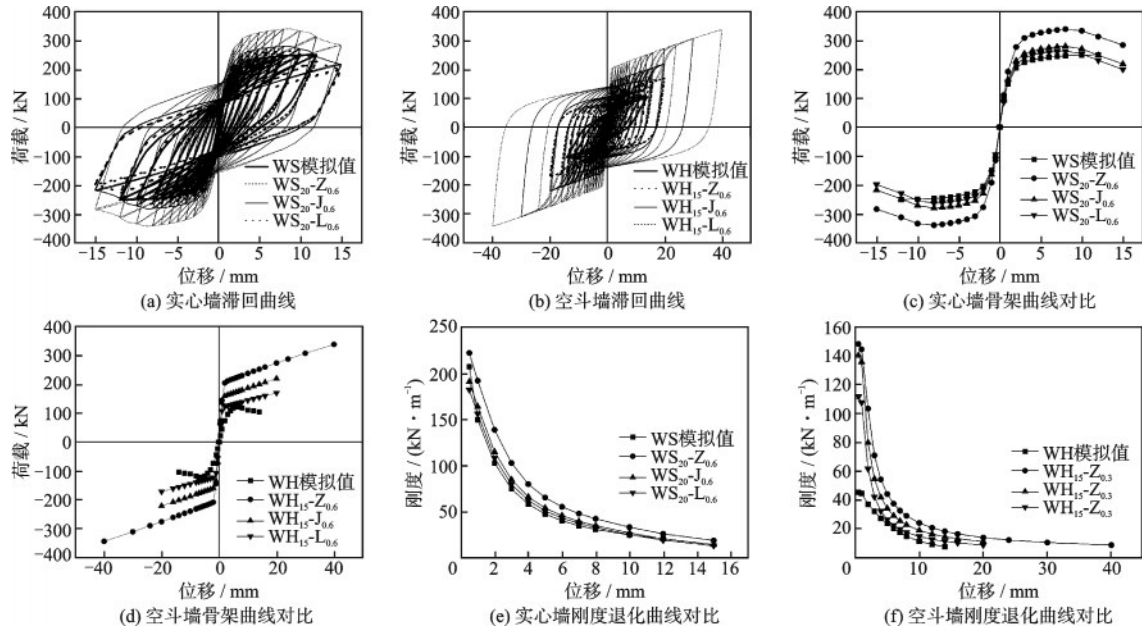


图 11 不同加固方式下的对比

Fig.11 Comparison under different reinforcement methods

表 6 不同加固方式下的加固提升率

Table 6 Reinforcement enhancement rate under different reinforcement methods

试件编号	峰值承载力/MPa	峰值位移/mm	UHDC用量/mm <sup>3</sup>	提升率/(kN·mm <sup>-3</sup> )
WS <sub>0</sub>	250.3	12	—	—
WS <sub>20</sub> -Z <sub>0.6</sub>	340.8(36.2%)	8.8(-26.7%)	8.5×10 <sup>7</sup>	1.1×10 <sup>-6</sup>
WS <sub>20</sub> -J <sub>0.6</sub>	280.4(12.0%)	8.6(-28.3%)	4.5×10 <sup>7</sup>	6.7×10 <sup>-7</sup>
WS <sub>20</sub> -L <sub>0.6</sub>	263.7(8.6%)	8.6(-28.3%)	6.8×10 <sup>7</sup>	2.0×10 <sup>-7</sup>
WH <sub>0</sub>	121.7	6.6	—	—
WH <sub>15</sub> -Z <sub>0.6</sub>	340.2(41.1%)	41.1(522.7%)	1.2×10 <sup>8</sup>	1.9×10 <sup>-6</sup>
WH <sub>15</sub> -J <sub>0.6</sub>	219.2(20.0%)	20.0(203.0%)	5.6×10 <sup>7</sup>	1.7×10 <sup>-6</sup>
WH <sub>15</sub> -L <sub>0.6</sub>	169.5(20.0%)	20.0(203.0%)	9.0×10 <sup>7</sup>	5.3×10 <sup>-7</sup>

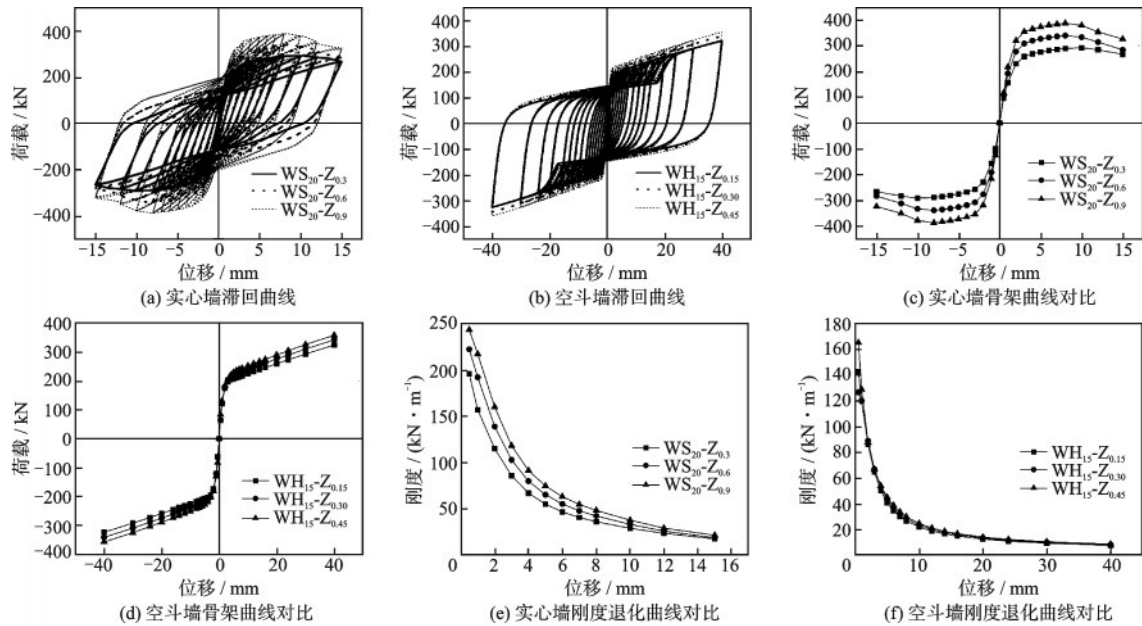


图 12 不同竖向压应力下的对比

Fig.12 Comparison under different axial compressive stresses

对于实心墙,当竖向应力为0.6 MPa和0.9 MPa时较0.3 MPa时刚度分别提高13.6%、24.3%,加载初期三种不同竖向压应力下刚度退化速率相同,后期竖向应力大的试件刚度退化速率快,最后三者的刚度趋于一致。对于空斗墙,竖向应力大的试件初始刚度略高,但不同压应力下的刚度退化速率一致,表明竖向压应力大小对空斗墙的刚度与刚度退化速率均无显著影响。

0.6 MPa和0.9 MPa情况下加固后实心墙体的峰值荷载较0.3 MPa时分别提高16.8%、33.0%;对于空斗墙,0.3 MPa和0.45 MPa情况下加固后空斗墙峰值荷载较0.15 MPa提高幅度有限,分别为6.5%和10.5%,增大竖向压应力对提高实心墙承载力更加明显。

## 4 承载力计算

加固后砌体受剪承载力 $V_u$ 由砌体抗剪承载力 $V_m$ 和UHDC面层抗剪承载力 $V_{UHDC}$ 组成, $\gamma_{RE}$ 取1.0<sup>[17]</sup>见式(5)。

$$V_u = \frac{1}{\gamma_{RE}} (V_m + V_{UHDC}) \quad (5)$$

### 4.1 砌体受剪承载力

我国《砌体结构设计规范》<sup>[17]</sup>提出无筋砌体墙的受剪承载力计算公式,见式(6)。

$$V_m = (f_v + \alpha\mu\sigma_0)A \quad (6)$$

式中, $f_v$ 为砌体抗剪强度设计值; $\alpha$ 为修正系数,砖砌体取0.60; $\mu$ 为剪压复合受力影响系数; $\sigma_0$ 为砌体截面竖向压应力; $A$ 为水平截面面积。

有学者研究表明,当轴压比不超过某一限值时,砌体抗剪承载力会随轴压比增大而减小,根据文献[18-20]提出的剪压复合受力影响系数计算方法,见式(7)、(8)。

$$\text{当 } \sigma_0/f_m \leq 0.8 \text{ 时: } \mu = 0.83 - 0.7 \frac{\sigma_0}{f_m}; \quad (7)$$

$$\text{当 } 0.8 < \sigma_0/f_m \leq 1.0 \text{ 时: } \mu = 1.690 - 1.775 \frac{\sigma_0}{f_m} \quad (8)$$

式中, $f_m$ 为砌体抗压强度平均值,根据《砌体结构设计规范》<sup>[17]</sup>进行计算。

对于无筋空斗墙砌体的受剪承载力,同济大学在1980年对高宽比为0.49的空斗墙做过相关的试验研究,并给出了回归经验公式<sup>[21-22]</sup>,见式(9)。

$$V_m = (0.82f_{vm} + 0.5\sigma_0)A \quad (9)$$

式中, $f_{vm}$ 为抗剪强度平均值,根据《砌体结构设计规范》<sup>[17]</sup>取值。

### 4.2 UHDC面层受剪承载力

当采用整面加固方式时可采用砌体结构加固规范的设计方法按式(10)计算UHDC面层受剪承载力<sup>[23]</sup>。对于斜交条带加固方式可考虑桁架模型<sup>[24]</sup>,即两条带分别看作拉杆与压杆,面层承载力由拉压杆的水平分力提供,如式(11)所示。对于正交条带加固方式可考虑塑性极限理论,采用文献[25]提出的公式计算,见式(12)。

$$V_{UHDC} = 0.7\alpha_c f_{t,UHDC} tl \quad (10)$$

$$V_{UHDC} = n(\phi_1 f_{t,UHDC} + \phi_2 f_{c,UHDC}) A \cos \theta \quad (11)$$

$$V_{UHDC} = 0.5n f_{t,UHDC} th' \quad (12)$$

式中, $f_{t,UHDC}$ 为UHDC轴心抗拉强度平均值; $\alpha_c$ 为UHDC强度利用系数,对于砖砌体,取0.66; $t$ 为UHDC面层厚度(双面加固取面层厚度之和); $l$ 为墙体水平方向长度; $n$ 为面层数目; $h'$ 为面层可以在 $h'$ 高度范围内对构造提供约束力,为1/3砌体墙高度。

采用上述计算方法对UHDC加固砌体墙的抗剪承载力进行计算,结果见表7。本文提出的UHDC加固墙体的受剪承载力理论方法具有较高的预测精度,可作为今后UHDC砌体加固设计的技术依据。

表7 受剪承载力对比结果

Table 7 Comparison of shear bearing capacity results

墙体编号	理论值/kN	模拟值/kN	误差/%
WS-R	354.3	363	-2.4
WS <sub>20</sub> -Z <sub>0.6</sub>	354.3	341.0	3.9
WS <sub>10</sub> -Z <sub>0.6</sub>	296.7	290	2.3
WS <sub>30</sub> -Z <sub>0.6</sub>	411.9	391	5.3
WH-R	312.2	360	-13.2
WH <sub>10</sub> -Z <sub>0.3</sub>	254.6	266	-4.3
WH <sub>15</sub> -Z <sub>0.3</sub>	312.2	340	-8.2
WH <sub>20</sub> -Z <sub>0.3</sub>	369.8	419	-11.7
WS <sub>20</sub> -J <sub>0.6</sub>	287.8	280.4	2.64
WH <sub>15</sub> -J <sub>0.3</sub>	200.4	219.2	-8.6
WS <sub>20</sub> -L <sub>0.6</sub>	266.4	264	0.9
WH <sub>15</sub> -L <sub>0.3</sub>	180.4	171	5.5

## 5 结论

(1) UHDC加固砌体墙能够有效提高砌体墙的

抗震性能,大幅提升极限承载力。

(2) OpenSees 参数分析结果表明,对于实心墙,随着加固层厚度的增加,承载力呈正比例提高,但峰值位移降低;对于空斗墙,承载力和峰值位移均随加固厚度增加而显著提高。采用整面加固方式承载力和变形提高幅度最大。加大竖向压应力会增大实心墙的结构刚度,但对空斗墙影响不大。

(3)采用面层和砌体承载力叠加方式,提出UHDC加固砌体抗剪承载力计算方法。与试验和有限元模拟结果比较,证明该方法具有较好的精度和适用性

### 参考文献:

- [1] 寇佳亮,樊明艳,孙国兴,等.高延性混凝土加固震损古旧砌体抗震性能试验及恢复力模型研究[J].振动与冲击,2022,41(7):106-115,125.  
Kou J L, Fan M Y, Sun G X, et al. Aseismic performance test and restoring force model of earthquake damaged ancient masonry strengthened with high ductility concrete[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(7): 106-115,125(in Chinese)
- [2] Niasar A N, Alae F J, Zamani S M. Experimental investigation on the performance of unreinforced masonry wall, retrofitted using engineered cementitious composites [J]. Construction and Building Materials, 2020, 239: 117788.
- [3] Tong L, Deng M K, Ma Y R, et al. In-plane behavior of URM wall with openings strengthened with ECC subjected to cyclic load[J]. Structures, 2021, 34: 2765-2776.
- [4] 王卓琳,李向民,高润东,等.纤维增强水泥基复合材料面层加固砖墙抗震性能试验研究[J].建筑结构,2021,51(4):17-25.  
Wang Z L, Li X M, Gao R D, et al. Experimental research on seismic performance of brick walls strengthened by fiber-reinforced cement-based composite material surface layer[J]. Building Structure, 2021, 51(4): 17-25.(in Chinese)
- [5] 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):85-93.  
Deng M K, Zhang W, Li N, et al. Study on seismic behavior of concrete block masonry walls strengthened with high ductile concrete[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2020, 47(9): 85-93.(in Chinese)
- [6] 邓明科,马向琨,张伟,等.高延性混凝土加固蒸压加气混凝土砌体墙抗震性能试验研究[J].工程力学,2021,38(7):9-18.  
Deng M K, Ma X K, Zhang W, et al. Experimental studies on aseismic behavior of autoclaved aerated concrete masonry walls strengthened with HDC[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(7): 9-18(in Chinese)
- [7] 邓明科,杨铄,梁兴文.高延性混凝土加固无筋砖砌体墙抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2018,51(6):43-53.  
Deng M K, Yang S, Liang X W. Experimental studies on seismic behavior of unreinforced masonry walls strengthened with HDC layer[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(6): 43-53. (in Chinese)
- [8] 王亭,姜忻良,李茂鋈.历史风貌建筑砖砌体加固试验及模拟计算分析[J].工程力学,2012,29(增1):92-96.  
Wang T, Jiang X L, Li M Y. Reinforcement experiment and simulation analysis on brick masonry of historical buildings [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(Sup1): 92-96.(in Chinese)
- [9] 田颖,黄群贤,陈海.喷涂聚氨酯加固黏土砖砌体墙抗震性能有限元分析[J].建筑结构学报,2021,42(增1):155-164.  
Tian Y, Huang Q X, Chen H, et al. Finite element analysis of seismic behavior of clay brick masonry wall reinforced by spraying polyurethane[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(Sup1): 155-164. (in Chinese)
- [10] 杜德润,许云龙,蒋济同.型钢加固既有砖墙的抗震性能有限元分析[J].工程抗震与加固改造,2018,40(2):115-121  
Du D R, Xu Y L, Jiang J T, et al. Finite element analysis on seismic performance of existing brick masonry wall strengthened by steel[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2018, 40(2): 115-121. (in Chinese)
- [11] 汪梦甫,徐亚飞,陈红波. PE-ECC短梁抗剪性能研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(11):10-16.  
Wang M F, Xu Y F, Chen H B. Research on shear behavior of PE-ECC short beam[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2015, 42(11): 10-16. (in Chinese)
- [12] 满都拉,曹美琪. PE纤维透水混凝土的强度与韧性试验研究[J].硅酸盐通报,2016,35(10):3417-3421.  
Man D L, Cao M Q. Strength and toughness of PE fiber pervious concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(10): 3417-3421. (in Chinese)

- [13] Yu K Q, Wang Y C, Yu J T, et al. A strain-hardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8% [J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 137: 410.
- [14] 董方园, 蒋芳明, 余江滔, 等. 超高延性混凝土加固砖木结构抗震性能试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(10):130-140.  
Dong F Y, Jiang F M, Yu J T, et al. Seismic performance of timber-framed masonry structure strengthened with ultra-high ductile concrete[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(10): 130-140. (in Chinese)
- [15] Pande G N, Liang J X, Middleton J. Equivalent elastic moduli for brick masonry[J]. *Computers and Geotechnics*, 1989, 8(3):243-265.
- [16] Mander J, Priestley M, Park R, et al. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 1988, 114 (8) : 1804-1825.
- [17] 砌体结构设计规范:GB 50003—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [18] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 第3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [19] 骆万康, 李锡军. 砖砌体剪压复合受力动、静力特性与抗剪强度公式[J]. *重庆建筑大学学报*, 2000, 22(4): 13-19.  
Luo W K, Li X J. Dynamic and static characteristics and shear strength formulae of brick masonry under composite shear and compression forces [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2000, 22 (4) : 13-19. (in Chinese)
- [20] 骆万康, 王勇. 砖砌体剪压复合受力的动力特性研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 1999, 21(5): 57-59, 61-63.  
Luo W K, Wang Y. Study on dynamic characteristics of brick masonry under composite shear stress [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 1999, 21 (5): 57-59, 61-63. (in Chinese)
- [21] 朱伯龙, 吴明舜, 蒋志贤. 在周期荷载作用下砖砌体基本性能的试验研究[J]. *同济大学学报*, 1980(2): 1-14.  
Zhu B L, Wu M S, Jiang Z X. Experimental study on basic performance of brick masonry under cyload [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 1980(2): 1-14. (in Chinese)
- [22] 陆飞, 陈忠范, 袁杨. 空斗墙抗震受剪承载力分析与振动台试验研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2012, 34(6): 98-106.  
Lu F, Chen Z F, Yuan Y. Analysis and shaking table experimental study on seismic shear capacity of rowlock cavity wall [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2012, 34(6): 98-106. (in Chinese)
- [23] 高延性混凝土应用技术规: DJB61/T112-2016 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2016.
- [24] 吴楠. MRPC不同加固方式下带构造柱砌体窗间墙抗震性能试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022.  
Wu N. Study on the seismic performance test of MRPC [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022. (in Chinese)
- [25] 肖青战. 板墙加固短肢砌体剪力墙抗剪承载力研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013.  
Xiao Q Z. Research on the shear capacity of short-leg masonry shear wall reinforced with concrete slab [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2013. (in Chinese)

(本文编辑: 张艺)