

文章编号: 1000-4750(2018)10-0101-11

高延性混凝土加固无筋砖墙抗震性能 试验研究与承载力分析

邓明科, 杨 铄, 王 露

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055)

摘 要: 为研究高延性混凝土(HDC)加固无筋砖墙的抗震性能, 设计制作了 3 片 HDC 面层加固砖墙、1 片钢筋网水泥砂浆面层加固砖墙和 1 片作为对比试件的未加固砖墙, 通过拟静力试验, 研究了 HDC 面层加固砖墙的破坏形态、滞回性能及耗能能力。试验结果表明: HDC 面层可对墙体形成约束作用, 延缓墙体开裂并改变墙体的破坏模式, 提高墙体的承载力和延性; 与钢筋网水泥砂浆面层加固相比, 单面 HDC 加固的墙体开裂荷载与耗能能力明显提高, 承载力下降缓慢。针对试件的破坏形态, 考虑未开裂区加固面层对墙体水平承载力的贡献, 提出了加固墙体的承载力计算方法, 并根据试验结果进行了验证。

关键词: 砌体墙; 高延性混凝土; 抗震加固; 拟静力试验; 抗震性能

中图分类号: TU362 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.06.0495

EXPERIMENTAL AND BEARING CAPACITY STUDIES ON THE SEISMIC BEHAVIOR OF UNREINFORCED MASONRY WALLS STRENGTHENED WITH HDC LAYERS

DENG Ming-ke, YANG Shuo, WANG Lu

(College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: To investigate the seismic behavior of unreinforced masonry walls strengthened with high ductile concrete (HDC) layers, three brick masonry walls strengthened with HDC layers, one brick masonry wall strengthened with steel-meshed cement mortar, and one brick masonry wall served as the reference specimen were designed. The failure pattern, hysteretic characteristics and energy dissipation capacity were studied through the quasi-static tests. The test results show that the HDC layers can provide a constraining effect for the wall, effectively delay the generation of cracks, change the failure mode and improve the lateral strength and ductility of the wall. After being strengthened with a single HDC layer, the cracking load and energy dissipation capacity of the wall is obviously higher than that strengthened with steel-meshed cement mortar and the bearing capacity decreases slowly. A calculation method is proposed to estimate the ultimate lateral strength of strengthened masonry walls and the accuracy of the method is validated by the test results.

Key words: unreinforced masonry wall; high ductile concrete (HDC); seismic strengthening; quasi-static test; seismic performance

收稿日期: 2017-06-25; 修改日期: 2017-11-03

基金项目: 西安市科技计划项目(CX13135-3); 陕西省教育厅重点实验室项目(15JS048); 陕西省青年科技新星项目(2015KJXX-31)

通讯作者: 邓明科(1979—), 男, 四川南充人, 教授, 博士, 博导, 主要从事高性能土木工程材料与新型结构研究(E-mail: dengmingke@126.com).

作者简介: 杨 铄(1991—), 男, 陕西西安人, 博士生, 主要从事建筑结构及抗震加固研究(E-mail: 15829585360@163.com);

王 露(1990—), 男, 河南郑州人, 硕士生, 主要从事建筑结构及抗震加固研究(E-mail: lu-wang9@hnar.com).

砌体结构是我国既有建筑的主要结构形式之一, 由于其自身组成材料的脆性, 使砌体房屋在历次地震中破坏严重, 造成严重的生命财产损失。另外, 受地域条件和经济情况所限, 我国 20 世纪建造的砌体结构房屋存在大量不满足最低抗震设防要求的情况。因此, 对既有砌体结构进行抗震加固具有重要意义。

高延性水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite, ECC)最早由美国密西根大学的 Li 等^[1]教授提出, 在拉伸、剪切和弯曲荷载作用下具有典型应变硬化和多裂缝开展特性^[2-5], 表现出良好的韧性和耐损伤能力, 在加固改造工程中具有广泛的应用前景。美国、日本等国家已将 ECC 用于隧道、桥梁和车站等工程的加固修复中^[6-7], 并取得了良好的效果。浙江大学徐世焯等^[8]采用 UHTCC 加固钢筋混凝土梁, 有效提高了梁的承载力和抗裂性能。

为推广 ECC 在加固工程中的应用, 本课题组采用 ECC 设计理论配制了高延性混凝土(high ductile concrete, 简称 HDC), 对其抗压和抗弯性能^[9-11]进行了研究, 并将其用于构造柱约束砖砌体墙^[12]的加固, 试验结果表明加固面层可有效抑制墙体开裂和破坏, 改善砖墙的脆性破坏模式。2008 年汶川地震的震害调查结果表明, 发生严重破坏和倒塌的大多为无筋砖砌体房屋^[13-14]。为提高无筋砖砌体墙的抗震性能, 本文通过拟静力试验, 研究 HDC 加固无筋砖墙的破坏形态、滞回性能及耗能能力, 并根据试验结果, 提出此类加固墙体的承载力计算方法。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验共制作 5 片砖砌体墙, 其中试件 HDCW-3 墙体中部带有构造柱, 内配纵筋为 $4\phi 12$, 箍筋为 $\phi 6@100$, 截面尺寸为 $240\text{ mm}\times 240\text{ mm}$, 以模拟中部含构造柱的墙体, 其余试件均无构造柱; 根据实际工程中多层砌体结构教学楼常见的墙体尺寸, 将试件高宽比设计为 0.6, 墙厚均为 240 mm, 试件具体尺寸如图 1 所示。试件 W-1 为未加固砖墙; 试件 W-2 采用钢筋网水泥砂浆面层双面加固, 内配 $\phi 6@300$ 水平和竖向分布钢筋并采用呈梅花状布置的 s 形穿墙筋固定于墙面; 试件 HDCW-1、HDCW-2、HDCW-3 均采用 HDC 面层加固, 各试件加固方案详见表 1。为防止试件底部出现剪切滑移, 对加固以后的墙体底部四周浇筑混凝土与底梁形成整体。

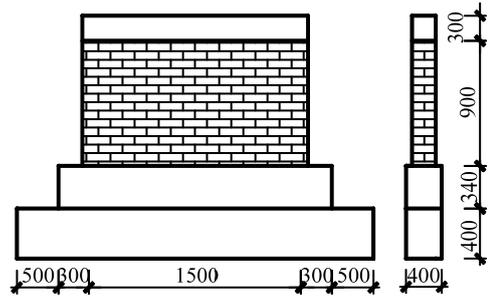


图 1 试件尺寸与构造

Fig.1 Design details of specimens

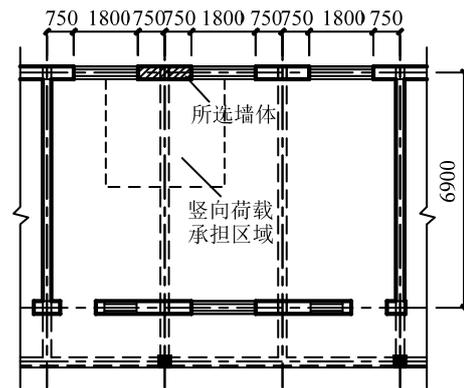


图 2 工程实例

Fig.2 Engineering example

表 1 试件加固方案

Table 1 Strengthening scheme of specimens

试件编号	加固方案
W-1	未加固砖墙(对比试件)
W-2	35 mm 厚钢筋网水泥砂浆面层双面加固
HDCW-1	15 mm 厚 HDC 面层单面加固, 另一面压抹 20 mm 水泥砂浆
HDCW-2	15 mm 厚 HDC 面层双面加固
HDCW-3	15 mm 厚 HDC 面层双面加固

1.2 材料力学性能

本次试验制作的 5 片墙体均采用 MU10 烧结普通砖和水泥砂浆砌筑, 砂浆厚度 10 mm, 采用饱满灰缝的砌筑方式。根据《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542-2003)的要求, 制作了 10 个单砖试样, 测得砖抗压强度平均值为 8.87 MPa; 采用 $70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}$ 立方体试块测得砌筑砂浆强度平均值为 18.11 MPa; 采用 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 立方体试块测得构造柱混凝土的抗压强度平均值为 39.88 MPa。

试验采用的 HDC 由水泥、粉煤灰、硅灰、矿物掺合料、砂、PVA 纤维和水按一定比例配制而成, PVA 纤维体积掺量为 2%, 各项性能指标见表 2。采用 $70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}$ 立方体试块测得 HDC 抗压强度平均值为 58.70 MPa。

表 2 PVA 纤维各项性能指标
Table 2 Performance indicator of PVA

长度/ mm	直径/ μm	长径比/ (×10 ³)	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	伸长率/ (%)	密度/ (g/cm ³)
12	39	0.31	1600	40	7	1.3

1.3 试验加载与测试内容

根据图 2 所示 4 层教学楼，近似计算得到底层某一墙体的竖向压应力约为 1.22 MPa(440 kN)，以此作为本次试验中各试件施加的竖向荷载。试验前先施加预估开裂荷载的 20%反复推拉两次，以检查仪器是否正常。

依据《建筑抗震试验方法规程》^[15]采用荷载-位移混合控制方式加载。试件屈服前采用荷载控制并分级加载，接近屈服时减小加载级差。试件屈服后采用位移控制，每级增加的位移取 1.5 mm，直至墙体承载能力下降至极限荷载的 85%以下，停止试验加载。

试验共安装了 4 个位移计，分布情况如下：试件顶部圈梁中部布置一个位移计，以测试墙体顶点位移；在墙体一侧沿对角线方向各布置一个位移计，以测试墙体的剪切变形；在底梁端部安装一个位移计，以测量试件的整体水平滑移。试验加载装置如图 3 所示。

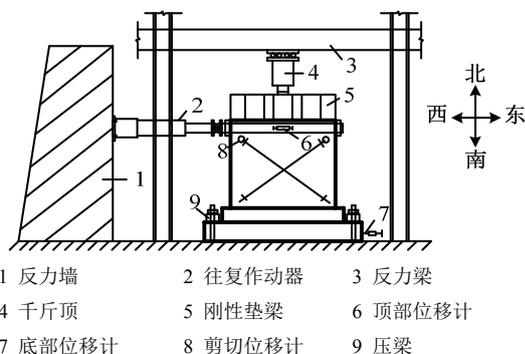


图 3 加载装置
Fig.3 Test set-up

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏过程

试件 W-1，当加载至 122 kN 时，墙体西侧根部水平灰缝开裂；加载至 160 kN 时，墙体西侧水平裂缝延伸变长；加载至 200 kN 时，墙体东侧根部水平灰缝开裂；加载至 280 kN 时，墙体西侧水平裂缝变宽。随后荷载-位移曲线发生明显弯曲，说明试件已进入弹塑性变形阶段，改为按位移控制加载。

加载至顶点位移达到 3 mm 时，墙体开始出现

斜裂缝，并迅速贯穿整个墙面，砖出现受拉开裂；加载循环过程中，斜裂缝两侧发生明显错动，墙体形成交叉斜裂缝并逐渐变宽，斜裂缝两侧的砖被压碎，墙体根部出现弯曲受压裂缝，试件发生破坏，其裂缝分布见图 4。



图 4 试件 W-1 破坏形态及裂缝分布情况

Fig.4 Failure mode and crack distribution of W-1 specimen

试件 W-2，当加载至 200 kN 时，西侧墙体根部出现一条水平裂缝；加载至 240 kN 时，西侧墙体根部水平裂缝延伸变宽；加载至 280 kN 时，东侧墙体根部出现水平缝并向受压区延伸，此时位移-荷载曲线发生弯曲，改为按位移控制加载。加载至顶点位移达到 15 mm 时，墙体根部水泥砂浆面层开裂并脱落，承载力明显降低，试件破坏形态见图 5。



(a) 根部水平裂缝 (b) 墙体端部压碎

图 5 试件 W-2 破坏形态

Fig.5 Failure mode and crack distribution of W-2 specimen

试件 HDCW-1，当加载至 280 kN 时，墙体西侧砂浆面层根部出现细微裂缝；加载至 320 kN 时，荷载-位移曲线发生明显弯曲，试件进入弹塑性工作阶段，改为按位移控制加载。

当拉至顶点位移达到 3.8 mm 时，墙体西侧砂浆面层根部水平缝延伸变宽；推至 13.8 mm 时，墙体东侧根部的水泥砂浆面层压碎并剥落；推至 16.8 mm 时，墙体西侧根部砂浆面层和砖均被压碎；推至 21 mm 时，墙体东侧根部砖亦被压碎；加载至 26 mm 时，承载力明显下降，但 ECC 面层仍未出现明显裂缝，试件破坏形态见图 6。



图 6 试件 HDCW-1 破坏形态及裂缝分布情况
Fig.6 Failure mode and crack distribution of HDCW-1 specimen

试件 HDCW-2, 加载至 360 kN 时, 东侧墙体根部出现两条细微水平裂缝; 拉至 390 kN 时, 东侧墙体根部水平裂缝明显变宽; 推至 400 kN 时, 墙体下部 HDC 面层出现斜裂缝, 荷载-位移曲线明显弯曲, 改为按位移控制加载。

按位移加载至 3.2 mm 时, 墙体下部斜裂缝向上延伸; 当位移达到 6.3 mm 时, 东侧墙体根部水平裂缝变宽, 约有 5 mm; 当位移达到 12.2 mm 时, HDC 面层出现多条斜裂缝; 当位移达到 21.3 mm 时, 试件承载力明显下降。试验破坏过程中, 可听到 HDC 面层内部砌体受到挤压变形发出“滋滋”响声。试件破坏形态及裂缝分布见图 7。

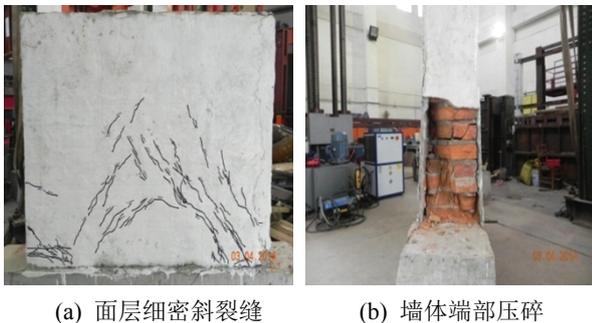


图 7 试件 ECCW-2 裂缝分布及破坏形态
Fig.7 Failure mode and crack distribution of ECCW-2 specimen

试件 HDCW-3, 中部设置构造柱, 墙体根部水平裂缝发展受到限制; 试件达到峰值时, 面层斜裂缝延伸至墙体上部; 中部构造柱的作用, 使墙体承

载力下降缓慢, 试件破坏主要发生在墙体根部受压区; 试验停止加载以后, 剥开墙体根部 HDC 面层, 发现内部砌体已明显压碎。试件破坏形态及裂缝分布见图 8。

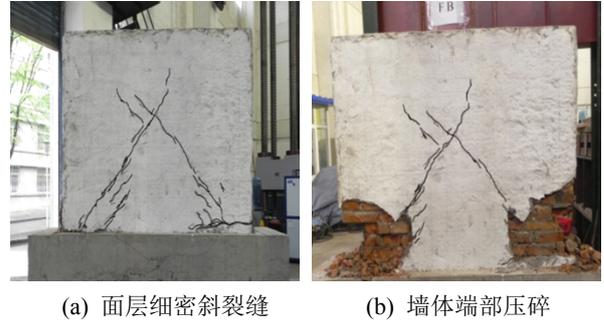


图 8 试件 HDCW-3 裂缝分布及破坏状态
Fig.8 Failure mode and crack distribution of HDCW-3 specimen

2.2 破坏模式

根据以上试验结果, 未加固墙体 W-1 的砂浆强度较高且竖向压应力较大, 裂缝周边部分砖出现受拉和受压破坏, 属于剪压破坏并带有斜压破坏的特性, 表现出明显的脆性破坏特征。

钢筋网水泥砂浆面层加固的墙体 W-2 破坏主要集中在墙体根部, 说明试件加固以后墙体根部成为薄弱部位, 最终墙体底部发生弯曲破坏。

单面 HDC 加固的墙体 HDCW-1, 破坏主要发生在砂浆面层加固一侧, HDC 面层始终未出现明显裂缝, 说明 HDC 面层对墙体形成了有效的约束作用, 使试件受剪承载力提高, 最终试件发生具有一定延性的弯曲受压破坏^[16-19]。

双面 HDC 加固和带构造柱的墙体破坏特征均为根部砌体压碎, 墙体上部 HDC 面层出现了细密剪切斜裂缝。试件 HDCW-2 达到峰值荷载后, 面层内部砌体不断发出挤压破碎声, 说明双面 HDC 对砌体的约束作用提高了墙体根部的抗弯能力, 使得面层内部砌体发生剪切开裂, 但试件最终破坏模式以弯曲受压破坏为主。墙体中部设置构造柱时, HDC 面层与构造柱的共同作用, 使墙体根部砌体压碎的范围增大, 试件承载力和延性均明显提高。

2.3 滞回曲线及骨架曲线

本次试验 5 个试件的滞回曲线如图 9 所示。各试件开裂以前, 荷载-位移曲线基本呈直线; 墙体开裂以后进入弹塑性变形阶段, 滞回曲线的上升段发生明显弯曲, 试件刚度下降。试件达到峰值荷载以后, 未加固的试件承载力迅速下降, 墙体破坏过程中沿斜裂缝两侧发生错动, 使滞回环呈梭形; 采用钢筋网水泥砂浆面层加固的墙体底部发生弯曲破

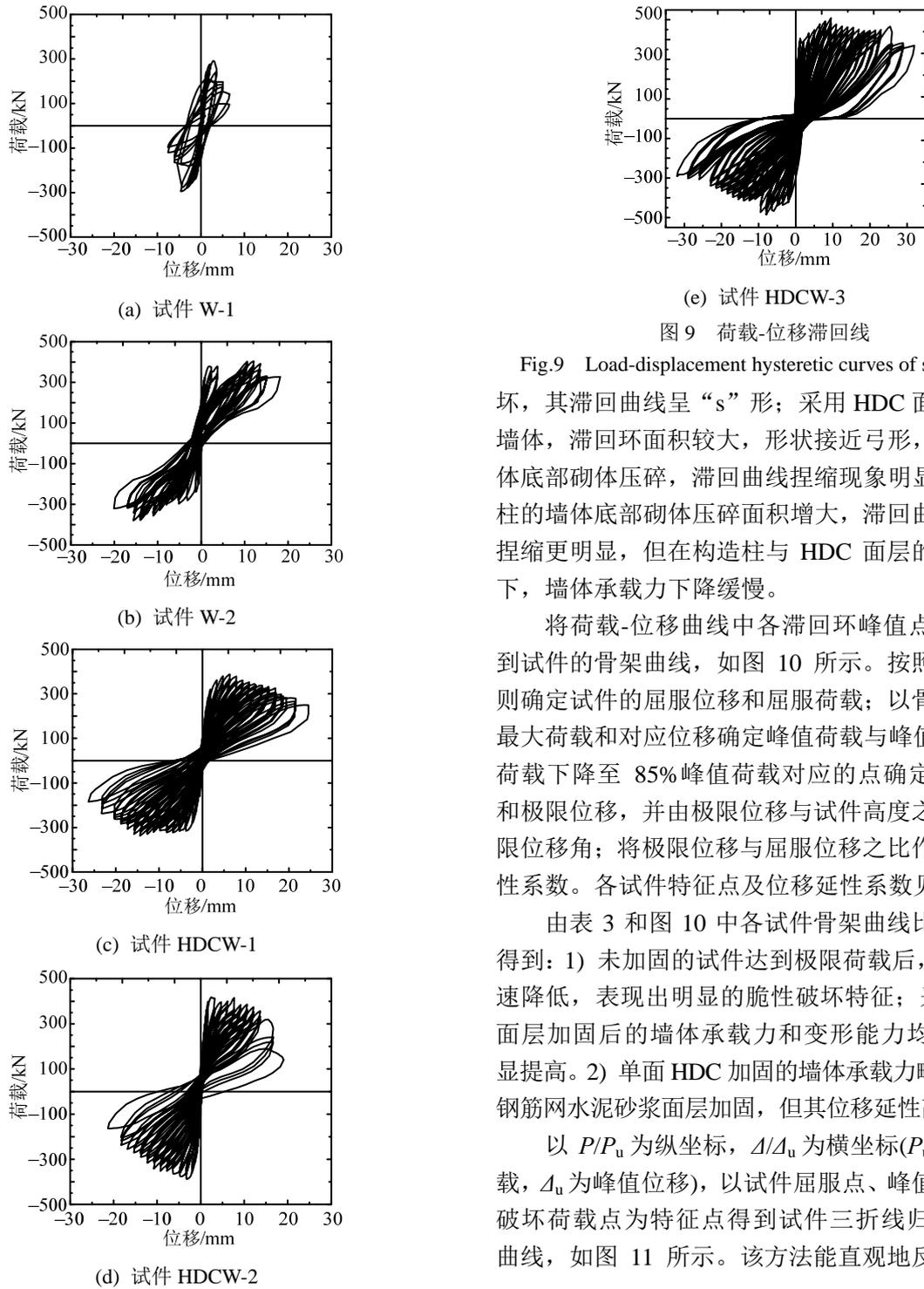


图 9 荷载-位移滞回线

Fig.9 Load-displacement hysteretic curves of specimens

坏，其滞回曲线呈“s”形；采用 HDC 面层加固的墙体，滞回环面积较大，形状接近弓形，但由于墙体底部砌体压碎，滞回曲线捏缩现象明显；带构造柱的墙体底部砌体压碎面积增大，滞回曲线后期的捏缩更明显，但在构造柱与 HDC 面层的组合作用下，墙体承载力下降缓慢。

将荷载-位移曲线中各滞回环峰值点相连可得到试件的骨架曲线，如图 10 所示。按照等能量原则确定试件的屈服位移和屈服荷载；以骨架曲线上最大荷载和对应位移确定峰值荷载与峰值位移；以荷载下降至 85%峰值荷载对应的点确定破坏荷载和极限位移，并由极限位移与试件高度之比得到极限位移角；将极限位移与屈服位移之比作为位移延性系数。各试件特征点及位移延性系数见表 3。

由表 3 和图 10 中各试件骨架曲线比较，可以得到：1) 未加固的试件达到极限荷载后，承载力迅速降低，表现出明显的脆性破坏特征；采用 HDC 面层加固后的墙体承载力和变形能力均可得到明显提高。2) 单面 HDC 加固的墙体承载力略低于双面钢筋网水泥砂浆面层加固，但其位移延性高于后者。

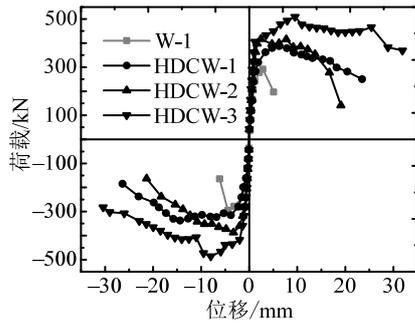
以 P/P_u 为纵坐标， Δ/Δ_u 为横坐标(P_u 为峰值荷载， Δ_u 为峰值位移)，以试件屈服点、峰值荷载点和破坏荷载点为特征点得到试件三折线归一化骨架曲线，如图 11 所示。该方法能直观地反映试件位

表 3 试件的特征点以及延性比较

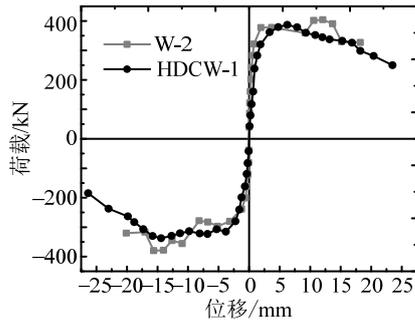
Table 3 Comparisons of characteristic points and ductility

试件编号	屈服荷载 P_y /kN	屈服位移 Δ_y /mm	峰值荷载 P_u /kN	峰值位移 Δ_0 /mm	极限位移 Δ_u /mm	延性系数 $\mu=\Delta_u/\Delta_y$	极限位移角 $\theta=\Delta_u/H$
W-1	249.78	1.57	293.26	3.65	4.45	2.83	1/236
W-2	332.72	4.32	391.78	13.85	15.86	3.67	1/66
HDCW-1	316.50	2.76	362.29	10.32	17.44	6.32	1/60
HDCW-2	378.50	2.20	402.26	6.26	14.49	6.59	1/72
HDCW-3	425.07	2.73	497.50	8.76	18.91	6.93	1/56

注：表中的数据均取试件推、拉方向加载的平均值，墙体高度 H 为 1050 m。



(a)



(b)

图 10 骨架曲线

Fig.10 Skeleton curves

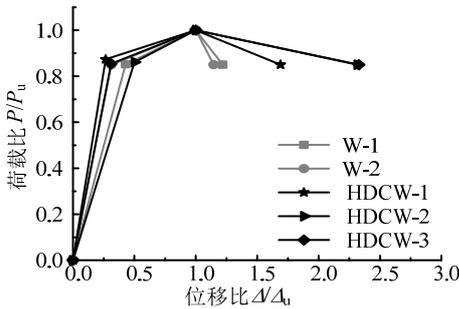


图 11 归一化骨架曲线

Fig.11 Normalized skeleton curves

移和承载力的相对关系以及各试件从屈服到破坏过程中变形特征的差异^[20]。由归一化骨架曲线可以看出, 试件 W-1、W-2 达到峰值荷载之后承载力下降较快; 采用 HDC 面层加固的 3 个试件承载力下降缓慢, 延性较好, 说明采用 HDC 面层可提高墙体的变形能力。

2.4 刚度退化

刚度退化曲线反映了试件开裂、损伤、破坏过程中刚度的变化规律。以各加载级割线刚度为纵坐标, 相应顶点位移为横坐标, 可得到各试件刚度退化曲线, 如图 12 所示。

从图 12 可知, 所有试件在加载初期刚度急剧退化。峰值荷载以后, 相比未加固试件, HDC 面层加固试件刚度退化趋于平缓; 墙体中部设置构造柱可明显延缓刚度退化。

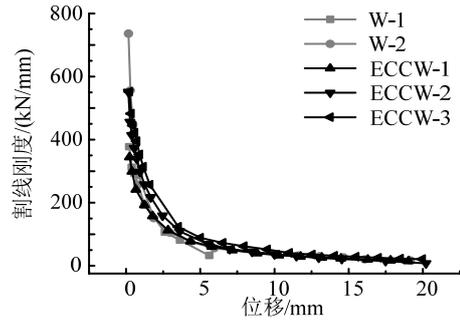


图 12 刚度退化曲线

Fig.12 Stiffness degradation curves

2.5 耗能分析

各试件的累积滞回耗能见表 4。表中分别列出了试件达到屈服荷载、极限荷载和破坏荷载时的累积滞回耗能, 可反映结构试件在不同阶段的耗能能力。由表 4 可以看出:

1) 采用 HDC 面层加固后, 墙体耗能能力均得到明显提高, 其中单面 HDC 加固的试件 HDCW-1 累积耗能为试件 W-2 的 1.3 倍。

2) 双面 HDC 加固的试件 HDCW-2, 由于面层内部墙体发生剪切开裂, 使累计耗能明显低于试件 HDCW-1。可见不同的破坏特征对 HDC 面层加固砖墙的耗能能力有较大影响。

3) 试件 HDCW-3 的耗能能力远大于其他试件, 表明墙体中部设置构造柱能显著改善砖墙的耗能能力。

表 4 试件的累积耗能

Table 4 Cumulated energy dissipation of specimens

试件 编号	累积耗能/(kN·mm)		
	屈服荷载	峰值荷载	破坏荷载
W-1	391.1	1773.9	7038.4
W-2	2693.3	28457.2	37472.1
HDCW-1	1338.2	18038.9	48692.4
HDCW-2	1320.8	6975.7	30425.6
HDCW-3	30951	17884.0	80919.4

3 承载力分析

3.1 开裂荷载与峰值荷载

以上各试件开裂荷载和峰值荷载汇总见表 5, 通过对各试件试验结果的对比分析可得:

1) 试件 W-2 的开裂荷载比试件 W-1 略有提高, 但采用 HDC 面层加固的墙体开裂荷载提高幅度较大, 说明 HDC 面层对墙体的有效约束作用可以延缓墙体的开裂。

2) 采用钢筋网水泥砂浆面层和 HDC 面层加固, 均可以显著提高砖墙的承载力, 改善墙体的破

坏形态。

3) 墙体中部设置构造柱,能显著提高砌体墙的抗震承载力。

表 5 试件开裂荷载与极限荷载
Table 5 Cracking load and ultimate load

试件编号	加载方式	开裂荷载/ kN	提高率 平均值/(%)	峰值荷载/ kN	提高率 平均值/(%)
W-1	推(+)	121.90	—	291.69	—
	拉(-)	202.28	—	294.82	—
W-2	推(+)	201.59	36	404.06	34
	拉(-)	238.71	36	379.49	34
HDCW-1	推(+)	283.10	85	387.21	24
	拉(-)	315.33	85	337.36	24
HDCW-2	推(+)	397.71	134	417.50	37
	拉(-)	359.28	134	387.01	37
HDCW-3	推(+)	405.29	154	509.14	70
	拉(-)	417.85	154	485.85	70

3.2 承载力计算

研究表明,无筋砌体墙在竖向和水平荷载共同作用下的破坏形态可分为以下 4 种:对角剪切破坏、剪切滑移破坏、摇摆破坏和弯曲受压破坏^[16-19],如图 13 所示。Ghiassi 等^[21]根据试验结果与数值分析得出,采用钢筋混凝土面层加固的墙体也会出现以上 4 种破坏形态。本文试件 W-1 为剪切破坏,其余 4 个加固试件均发生弯曲受压破坏。因此,针对本文试件的破坏形态采取以下力学模型进行承载力分析。

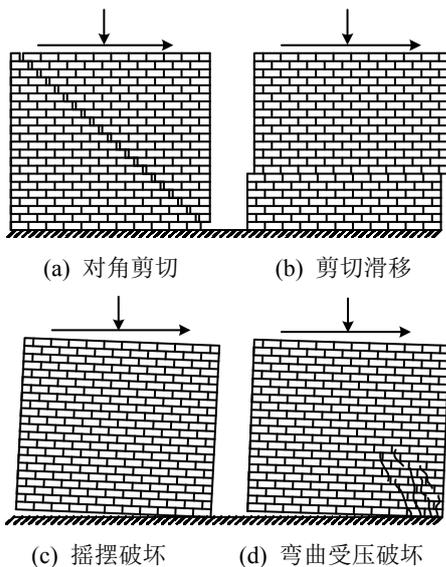


图 13 无筋砌体墙破坏形态

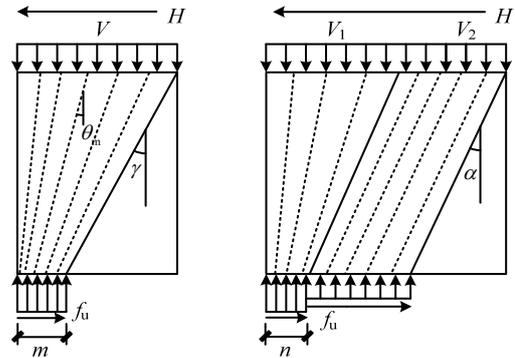
Fig.13 Failure modes of a laterally loaded URM wall

3.2.1 无筋砌体墙承载力计算模型

Roca^[22]在数值模拟基础上提出了基于塑性极

限理论的砌体墙承载力计算模型,综合考虑了砌体墙在竖向及侧向荷载作用下可能出现的破坏模式。

在恒定竖向压力和侧向荷载作用下,根据墙体高宽比和竖向压应力的不同,塑性极限状态下的斜向压力场可以简化为扇形分布压杆或扇形分布与平行分布组合压杆,对应以上两种极限状态下的塑性解如图 14 所示。



(a) 扇形分布压杆 (b) 组合压杆

图 14 塑性极限状态下墙体压杆模型

Fig.14 Strut model proposed for ultimate state of unreinforced masonry wall

由剪摩破坏准则可知,墙体斜压杆倾斜角度应满足以下条件:

$$\tan \gamma \leq \tan \alpha = \mu + \frac{C}{\sigma_0} \quad (1)$$

式中: γ 为边缘压杆与竖直方向夹角; μ 为灰缝摩擦系数; C 为砂浆粘聚力; σ_0 为墙体上部所承受的恒定压应力。

假设墙体斜向压力场为扇形分布压杆,由平衡条件可得:

$$H = V \frac{b-m}{2h} \quad (2)$$

式中: H 为墙体水平承载力; V 为墙体上部竖向荷载; b 为墙体水平方向长度; h 为墙高,墙体受压区长度 m 按下式计算:

$$m = \frac{V}{t f_u} \quad (3)$$

式中: t 为墙体厚度; f_u 为压杆底部抗压强度,并按式(1)验算 m 是否满足:

$$\tan \gamma = \frac{b-m}{h} \leq \tan \alpha \quad (4)$$

当式(4)成立,则式(2)的计算结果为墙体水平承载力,否则墙体斜向压力场为扇形分布与平行分布组合压杆,其水平承载力按下式计算:

$$H = V_1 \frac{\tan \alpha}{2} + V_2 \tan \alpha = \frac{V}{b} \left[(n + \tan \alpha) \frac{\tan \alpha}{2} + (b - n - \tan \alpha) \tan \alpha \right] = V \tan \alpha \left[1 - \frac{h}{2b} \tan \alpha \left(\frac{1}{1 - \nu} \right) \right] \quad (5)$$

n 为扇形压杆底部受压区长度, 可按下式计算:

$$n = \frac{\nu}{1 - \nu} h \tan \alpha, \quad \nu = \frac{V}{tb f_u} \quad (6)$$

3.2.2 加固墙体承载力计算模型

计算面层加固砌体墙的水平承载力时, 在上述砌体墙承载力计算模型的基础上, 引入剪切分析模型考虑加固面层对墙体承载力的贡献, 见图 15。

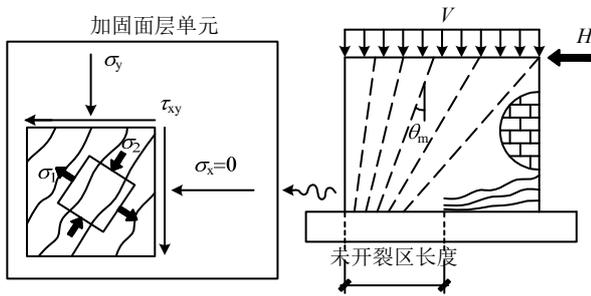


图 15 砌体墙加固面层剪切分析模型

Fig.15 Adopted analysis model for global shear behavior of layers for strengthened masonry wall

根据本文试验结果, 对于采用钢筋网水泥砂浆面层和单面及双面 HDC 加固的试件, 假定墙体水平方向达到峰值荷载时, 加固面层的主拉应力达到抗拉强度。将未开裂区域的加固面层视为平均意义上的平面应力单元, 并考虑加固面层底部未开裂区的抗拉作用, 分析加固面层的承载力贡献。

假定 HDC 面层与原砌体墙开裂角一致, 由水平方向平衡条件可得:

$$\begin{aligned} \cos^2 \theta_m \sigma_1 + \sin^2 \theta_m \sigma_2 &= \sigma_x, \\ \sin^2 \theta_m \sigma_1 + \cos^2 \theta_m \sigma_2 &= \sigma_y. \end{aligned} \quad (7)$$

对于钢筋网砂浆面层, 将钢筋应力引入式(7)可得:

$$\begin{aligned} \cos^2 \theta_m \sigma_1 + \sin^2 \theta_m \sigma_2 + \eta f_y \rho_{sx} &= \sigma_x, \\ \sin^2 \theta_m \sigma_1 + \cos^2 \theta_m \sigma_2 + f_y \rho_{sy} &= \sigma_y. \end{aligned} \quad (8)$$

当砌体墙斜向压力场为扇形分布压杆时, 按压杆倾斜角平均值计算开裂角:

$$\frac{b - m}{2h} = \tan \theta_m \quad (9)$$

当砌体墙斜向压力场为扇形与平行分布组合压杆时, 按式(10)和式(11)分别计算扇形压杆部分与

平行压杆部分的面层单元应力, 其开裂角由压杆临界倾角 α 确定。扇形压杆部分开裂角按下式计算:

$$\tan \theta_m = \frac{1}{2} \tan \alpha \quad (10)$$

平行压杆部分开裂角按下式计算:

$$\tan \theta_m = \tan \alpha \quad (11)$$

以上式中: σ_1 取为面层抗拉强度; m 为墙体受压区高度; η 为横向钢筋强度利用系数, 当钢筋屈服强度不能充分发挥时, 根据苏三庆等^[23]对钢筋网水泥砂浆面层加固砌体墙抗剪承载力的研究结果, 按下式计算:

$$\eta f_y \frac{A_s}{s} h = 0.41 f_y \frac{A_s}{s} b \quad (12)$$

式中: A_s 为水平分布钢筋截面积; s 为钢筋间距; h 为墙体高度; b 为墙体水平方向长度。

由平截面假定、砌体峰值压应变和加固面层的极限拉应变, 按下式计算面层有效受剪截面(底部未开裂区长度):

$$L_{uc} = \xi m \quad (13)$$

$$\xi = 1 + \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_c} \quad (14)$$

式中: L_{uc} 为面层未开裂区长度; ξ 为未开裂区相对高度; ε_c 为砌体峰值压应变; ε_t 为面层峰值拉应变。

由竖向平衡条件可得, 当砌体墙斜向压力场为扇形分布压杆时:

1) 单面 HDC 加固墙体:

$$(f_{pm} t_p + f_u t_{w0} + \sigma_y t_L \xi_c) m = V \quad (15)$$

2) 双面 HDC 加固墙体:

$$(f_u t_{w0} + 2\sigma_y t_L \xi_c) m = V \quad (16)$$

3) 钢筋网砂浆面层加固墙体:

$$(f_u t_{w0} + 2\sigma_y t_c \xi_s) m = V \quad (17)$$

当砌体墙斜向压力场为扇形与平行分布组合压杆时:

1) 单面 HDC 加固墙体:

$$(f_{pm} t_p + f_u t_{w0} + \sigma_y t_L) n = \sigma_0 (n + h \tan \alpha) \quad (18)$$

$$\sigma_0 b (t_{w0} + t_L + t_p) = V \quad (19)$$

2) 双面 HDC 及钢筋网砂浆面层加固墙体:

$$(f_u t_{w0} + 2\sigma_y t_L) n = \sigma_0 (n + h \tan \alpha) \quad (20)$$

$$\sigma_0 b (t_{w0} + 2t_L) = V \quad (21)$$

式中: V 为墙体上部竖向轴力; f_{pm} 为抹面砂浆轴心抗压强度; t_p 、 t_{w0} 分别为抹面砂浆面层厚度和原砌体墙厚度; t_L 、 t_c 分别为 HDC 面层和钢筋网水泥砂浆面层厚度; ξ_c 、 ξ_s 分别为 HDC 面层和钢筋网水泥

砂浆面层未开裂区相对高度。此外,式(18)和式(20)中, σ_y 为扇形压杆部分加固面层底部压应力。

由水平方向平衡条件得到承载力表达式如下,当砌体墙斜向压力场为扇形分布压杆时:

1) 单面 HDC 加固墙体:

$$H = \sin \theta_m \cos \theta_m (\sigma_1 - \sigma_2) t_L \xi_c m + f_u t_{w0} m \tan \theta_m + f_{pm} t_p m \tan \theta_m \quad (22)$$

2) 双面 HDC 加固墙体:

$$H = 2 \sin \theta_m \cos \theta_m (\sigma_1 - \sigma_2) t_L \xi_c m + f_u t_{w0} m \tan \theta_m \quad (23)$$

3) 钢筋网砂浆面层加固墙体:

$$H = 2 \sin \theta_m \cos \theta_m (\sigma_1 - \sigma_2) t_L \xi_s m + (f_u t_{w0} + 2 t_L \xi_s \rho_{sv} f_y) m \tan \theta_m + \eta f_y \frac{A_s}{s} h \quad (24)$$

当砌体墙斜向压力场为扇形与平行分布组合压杆时,按相同方法分别计算扇形压杆部分与平行压杆部分墙体水平方向合力,并由两部分之和得到墙体水平承载力。

当墙体中部设置构造柱时,可按我国规范^[24]计算构造柱对承载力的贡献,并考虑墙体高宽比对构造柱作用的影响。梁建国等^[25]、李峰^[26]等研究得出,弯曲裂缝会降低构造柱的抗剪作用。墙体高宽比越大,构造柱对抗剪承载力的贡献越不明显。因此,对高宽比较大墙体中构造柱的抗剪承载力按下式予以折减:

$$H_c = \psi H_{co} + H_s \quad (25)$$

式中: H_c 为构造柱抗剪承载力; H_{co} 为混凝土的贡献; H_s 为纵向钢筋作用。当 $h/b \leq 1.0$ 时, $\psi = 1.0$; 当 $h/b > 1.0$ 时, $\psi = 0.8$ 。

3.2.3 计算模型力学性能参数

1) 压杆底部砌体抗压强度 f_u

根据砌体材料的各向异性以及平衡条件可知,图 14 中 f_u 为开裂角 θ_m 方向的砌体抗压强度。国内外学者在砌体强度的各向异性方面进行了大量研究,如 Ganz 等^[27]通过试验得到了不同方向砌体抗压强度的变化规律,如图 16 所示。

墙体发生弯曲受压破坏时(图 13(d)),底部受压区可能进入局部受压状态,使得受压区砌体抗压强度因力的扩散而有所提高^[28],此时 f_u 会超过砌体单轴抗压强度。Martinez^[29]进行了多孔砖砌体墙在下部固定、上部均匀受压而未限制墙体顶部转动条件下的单向加载试验研究,并根据试验结果提出墙体底部受压区的抗压强度关系如下:

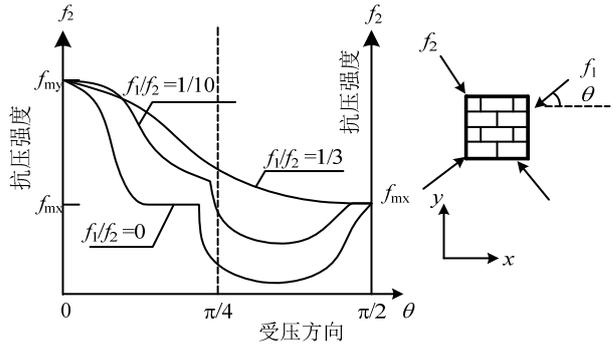


图 16 不同方向的砌体抗压强度

Fig.16 Different compressive strengths with θ

$$\begin{cases} f_u = f_m & , \frac{e}{b} \leq 0.1 \\ f_u = \left(0.75 + 2.5 \frac{e}{b} \right) f_m & , \frac{e}{b} > 0.1 \end{cases} \quad (26)$$

式中: e 为墙体底部受压区合力点距底部中心点距离; f_m 为垂直于水平灰缝方向的单轴抗压强度。

本文按式(26)计算 f_u 得到的墙体水平承载力计算值与试验值吻合较好。

2) HDC 面层极限拉应变 ϵ_t

Kamal 等^[30]研究发现,将应变硬化水泥基复合材料作为修复材料后,面层受拉开裂主要集中于内部材料先期开裂部位,从而使极限拉应变有所降低。因此,考虑到砌体裂缝截面处 HDC 面层拉应变集中发展,计算加固面层未开裂区长度时,对 ϵ_t 予以折减。

3) 剪切性能参数

按式(1)验算墙体斜压杆倾角时,砂浆粘聚力 C 按我国规范^[24]取砌体抗剪强度平均值。考虑压应力的影响^[31],摩擦系数 μ 按下式计算:

$$\mu = 0.83 - 0.7 \frac{\sigma_0}{f_m} \quad , \quad \sigma_0 / f_m \leq 0.8 \quad (27)$$

式中, σ_0 为墙体平均压应力。考虑加固面层的剪切强度,式(1)改为:

$$\tan \gamma \leq \tan \alpha = \mu + \frac{C}{\sigma_0} + \frac{\tau_L}{\sigma_0} \quad (28)$$

式中, τ_L 为面层剪切屈服强度。对钢筋网砂浆面层,按混凝土抗剪强度经验公式^[32]计算;对 HDC 面层,按下式计算:

$$\tau_L = G_{ECC} \gamma_u \quad (29)$$

$$G_{ECC} = \frac{E_{ECC}}{2(1+\nu)} \quad (30)$$

根据文献[33],可取 γ_u 为 10^{-3} ,弹性模量 E_{ECC} 、泊松比 ν 取值均参考文献[34]。经计算得到本文加

固试件底部受压区长度 m 均满足式(28), 表明墙体斜向压力场为扇形分布压杆。

3.2.4 试验验证

为验证上述计算模型的有效性, 采用该模型计算了本试验的 5 个试件, 同时计算了文献[35]中高宽比为 1.2 的 5 个试件的水平承载力, 计算结果见表 6。

表 6 试验值与计算值比较
Table 6 Comparison of ultimate loads

数据来源	试件编号	H_p/kN	H_e/kN	H_p/H_e
本文试件	W-1	286.56	293.26	0.98
	W-2	384.44	391.78	0.98
	HDCW-1	368.54	362.29	1.02
	HDCW-2	397.64	402.26	0.99
	HDCW-3	491.81	497.50	0.99
文献[30]	W ₁	167.78	151.49	1.11
	W ₂	193.29	181.05	1.07
	ECC-W ₁	184.22	165.23	1.12
	ECC-W ₂	192.49	178.10	1.08
	ECC-W ₃	270.00	240.71	1.12

注: H_p 为试件水平承载力计算值; H_e 为试件水平承载力实测值。

由表 6 可见, 按本文方法计算所得的试件承载力计算值与试验值吻合较好, 同时该方法也适用于高宽比较大墙体的水平承载力计算。

4 结论

(1) 采用单面和双面 HDC 加固砖砌体墙, 可对墙体形成有效约束作用, 改善砖墙的脆性剪切破坏模式, 提高墙体的开裂荷载、承载力和延性。

(2) 墙体中部设置构造柱时, 在 HDC 面层与构造柱的共同作用下, 砌体墙受到更强的约束, 使试件承载力、延性和耗能能力均得到明显提高。

(3) 因砂浆面层具有明显脆性特征, 使墙体水平荷载下降较快, 不能充分发挥钢筋网性能。因此, 采用单面 HDC 加固的墙体承载力下降缓慢, 开裂荷载和耗能能力明显高于钢筋网水泥砂浆面层加固。

(4) 针对加固试件的破坏模式, 在砌体墙水平承载力计算模型的基础上, 假定加固面层与原砌体墙变形协调, 考虑未开裂区加固面层对墙体水平承载力的贡献, 提出加固墙体的承载力计算方法, 计算结果与试验值吻合较好。

参考文献:

[1] Li V C, Leung C K Y. steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11): 2246—2264.

[2] Li V C. Engineered cementitious composites through micromechanical modeling [C]. Banthia N, Bentur A, Mufti A. Proceedings of Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future. Montreal: Canadian Society for Civil Engineering, 1998: 64—97.

[3] Li V C. On engineered cementitious composites (ECC)-A review of the material and its applications [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(3): 215—230.

[4] Li V C, Wang S, Wu C. Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6): 483—492.

[5] 侯利军, 张秀芳, 徐世焯. 拉伸应变硬化 UHTCC 材料的弯曲变形分析[J]. 工程力学, 2011, 28(8): 9—16.
Hou Lijun, Zhang Xiufang, Xu Shilang. Flexural deformation analysis on tensile strain hardening UHTCC [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(8): 9—16. (in Chinese)

[6] Cancer A, Zia P. Behavior and design of link slabs for jointless bridge decks [J]. PCI Journal, 1998, 43(3): 68—80.

[7] 李庆华, 徐世焯. 超高韧性水泥基复合材料基本性能和结构应用研究进展[J]. 工程力学, 2009, 26(增刊 II): 23—67.
Li Qinghua, Xu Shilang. Performance and application of ultra high toughness cementitious composite: a review [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(Suppl II): 23—67. (in Chinese)

[8] 徐世焯, 王楠, 尹世平. 超高韧性水泥基复合材料加固钢筋混凝土梁弯曲开裂试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 115—122.
Xu Shilang, Wang Nan, Ying Shiping. Experimental study on flexural characteristics of RC beams strengthened with post-poured ultra high toughness cementitious composites [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9): 115—122. (in Chinese)

[9] 邓明科, 秦萌, 梁兴文. 高延性纤维混凝土抗压性能试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 120—126.
Deng Mingke, Qin Meng, Liang Xingwen. Experimental study of compressive behavior engineered cementitious composites [J]. Industrial Construction, 2015, 45(4): 120—126. (in Chinese)

[10] 邓明科, 刘海勃, 秦萌, 等. 高延性纤维混凝土抗压韧性试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(5): 660—667.
Deng Mingke, Liu Haibo, Qin Meng, et al. Experimental research on compressive toughness of the high ductile fiber reinforced concrete [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2015, 47(5): 660—667. (in Chinese)

[11] 邓明科, 孙宏哲, 梁兴文, 等. 延性纤维混凝土抗压与抗弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(5): 85—90.
Deng Mingke, Sun Hongzhe, Liang Xingwen, et al. Experimental study of flexural behavior of ductile fiber

- reinforced concrete [J]. *Industrial Construction*, 2014, 44(5): 85—90. (in Chinese)
- [12] 邓明科, 高晓军, 梁兴文. ECC 面层加固砖墙抗震性能试验研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(6): 168—174.
Deng Mingke, Gao Xiaojun, Liang Xingwen. Experimental investigation on aseismic behavior of brick wall strengthened with ECC splint [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(6): 168—174. (in Chinese)
- [13] 周云, 邹征敏, 张超, 等. 汶川地震砌体结构的震害与改进砌体结构抗震性能的途径和方法[J]. *防灾减灾工程学报*, 2009, 29(1): 109—113.
Zhou Yun, Zou Zhengmin, Zhang Chao, et al. Study on the damages to masonry-building in Wenchuan Earthquake as well as the corresponding aseismic approach and methods [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2009, 29(1): 109—113. (in Chinese)
- [14] 吴昊, 赵世春, 许浒, 等. 基于破坏机制控制的砌体结构教学楼抗震加固设计研究[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(3): 12—18.
Wu Hao, Zhao Shichun, Xu Hu, et al. Study on seismic strengthening design of masonry school building based on failure mechanism control [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(3): 12—18. (in Chinese)
- [15] JGJ 101-96, 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
JGJ 101-96, Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [16] Mahmoud A D S, Hamid A A, El Mags S A. Lateral response of unreinforced solid masonry shear walls: an experimental study [C]// Hamilton: Proceedings of 7th Canadian Masonry Symposium, 1995: 110—125.
- [17] Andreus U, Ceradini G. Failure modes of solid brick masonry under in-plane loading [J]. *Mas Int*, 1992, 6(1): 4—8.
- [18] Andreus U. Failure criteria for masonry panels under in-plane loading [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1996, 122(1): 37—46.
- [19] Magenes G, Calvi G M. In-plane seismic response of brick masonry walls [J]. *Earthq Eng Struct Dynam*, 1997, 26(11): 1091—112.
- [20] 郑妮娜. 装配式构造柱约束砌体结构抗震性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
Zheng Nina. Research on seismic behavior of masonry structures with fabricated tie-columns [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [21] Ghiassi B, Soltani M, Tasnimi A A. Seismic evaluation of masonry structures strengthened with reinforced concrete layers [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 138(6): 729—743.
- [22] Roca P. Assessment of masonry shear-walls by simple equilibrium models [J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(4): 229—238.
- [23] 苏三庆, 丰定国. 用钢筋网水泥砂浆抹面加固砖墙的抗震性能试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 1998, 30(3): 228—232.
Su Sanqing, Feng Dingguo. An investigation on aseismic behavior of masonry wall strengthened with steel-meshed cement mortar [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition*, 1998, 30(3): 228—232.
- [24] GB 50003—2011, 砌体结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
GB 50003—2011, Code for design of masonry structures [S]. Beijing: Chinese Architectural Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [25] 梁建国, 张望喜, 郑勇强. 钢筋混凝土-砖砌体组合墙抗震性能[J]. *建筑结构学报*, 2003, 24(3): 61—69.
Liang Jianguo, Zhang Wangxi, Zheng Yongqiang. Seismic performance of composite walls made of reinforced concrete and brick masonry [J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(3): 61—69. (in Chinese)
- [26] 李峰. 带构造柱圈梁水平配筋砖墙的抗震性能研究[D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2004.
Li Feng. Earthquake-resistance performance researching of brick wall with structure column, ring girder and horizontal ribs [D]. Shaanxi: Xi'an University of Architecture & Technology, 2004. (in Chinese)
- [27] Ganz H R, Thürlimann B. Versuche über die Festigkeit von zweiachsig beanspruchtem Mauerwerk [R]. Zurich: Birkhäuser, 1982: 7—22.
- [28] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 175—180.
Shi Chuxian. Masonry structure theory and design [M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [29] Martinez J L. Theoretical and experimental determination of stress interaction diagrams in masonry structures and application to the analysis of historical construction [D]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid Doctoral Dissertation, 2003.
- [30] Kamal A, Kunieda M, Ueda N, et al. Evaluation of crack opening performance of a repair material with strain hardening behavior [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(10): 863—871.
- [31] 骆万康, 朱希诚. 砖砌体剪压复合受力相关性与抗剪摩擦系数的取值[J]. *工程力学*, 1997(增刊): 249—257.
Luo Wankang, Zhu Xicheng. The relationship between shear and compression and shear friction coefficient of brick masonry [J]. *Engineering Mechanics*, 1997(Suppl): 249—257. (in Chinese)

(参考文献[15]—[32]转第123页)

- [18] Pincheira J A, Oliva M G, Kusumo F I. Tests on double flange connectors subjected to monotonic and cyclic loading [J]. PCI Journal, 1998, 43(3): 82—96.
- [19] Venuti, William J. Diaphragm shear connectors between flanges of prestressed concrete T-beams [J]. PCI Journal, 1970, 15(1): 67—78.
- [20] Naito C, Ren R R. An evaluation method for precast concrete diaphragm connectors based on structural testing [J]. PCI Journal, 2013, 58(1): 106—118.
- [21] Cao L, Naito C. Design of precast diaphragm chord connections for in-plane tension demands [J]. ASCE, Journal of Structural Engineers, 2007, 133(11): 1627—1635.
- [22] 庞瑞, 梁书亭, 朱筱俊. 全装配式 RC 楼盖板缝节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 59—66.
- Pang Rui, Liang Shuting, Zhu Xiaojun. Seismic behavior of slab connections in untopped precast RC floor diaphragm [J]. Building Structures, 2012, 33(10): 59—66. (in Chinese)
- [23] 侯和涛, 周健, 臧海涛, 等. 复合墙板与钢框架的连接节点抗震试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(10): 85—91, 115.
- Hou Hetao, Zhao Jian, Zang Haitao, et al. Experimental study on seismic test of connections of steel frames and sandwich composite panels [M]. Engineering Mechanics, 2014, 31(10): 85—91, 115. (in Chinese)

(上接第 111 页)

- [32] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 36—39.
- GuoZhenhai, Shi Xudong. Reinforced concrete theory R analyse [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 36—39. (in Chinese)
- [33] Nagai K, Suryanto B, Maekawa K. Space-averaged constitutive model for HPRFRCs with multi-directional cracking [J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(2): 139—149.
- [34] 永井覚, 閑田徹志, 丸田誠. ひび割れた高靱性纖維補強セメント系複合材料を用いた平板の基礎力学特性 [J]. 日本建築学会構造系論文集, 2012, 77(681): 1701—1708.
- Satoru Nagai, Tetsushi Kanda, Makoto Maruta. Mechanical characteristics of cracked reinforced PVA-ECC panels [J]. Struct. Constr. Eng., AIJ, 2012, 77(681): 1701—1708.
- [35] 樊鑫淼. ECC 面层加固砖砌体结构抗震性能试验研究及理论分析[D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2014.
- Fan Xinmiao. Experimental study and theoretical analysis on seismic performance of brick masonry structure strengthened with ECC layers [D]. Shaaxi: Xi'an University of Architecture & Technology, 2014. (in Chinese)