

高延性混凝土条带法加固砖砌墙体抗震性能数值模拟

Numerical Simulation of Seismic Performance of Brick Walls Reinforced by High Ductility Concrete Strip Method

朱振北, 夏海余, 彭春阳

(中国建筑第六工程局有限公司, 天津 300171)

摘要: 为提升砖砌墙体抗震性能, 保证墙体的安全, 提出高延性混凝土条带法加固砖砌墙体抗震性能数值模拟方法。采用 AAC 砌块、钢筋和混凝土制备试件, 选择粉煤灰、水泥、砂以及 PVA 纤维等材料制备高延性混凝土, 采用横向、纵向以及交叉条带加固砖砌墙体试件。利用有限元软件模拟加固和未加固试件的抗震性能。结果表明: 加固后试件具有良好的抗震性能, 试件承受载荷范围在 305.3 ~ 302.7 kN 之间; 条带加固能够显著延缓砖砌墙体的刚度退化, 开裂载荷和峰值载荷最高值分别达到 419.2 和 511.06 kN。

关键词: 高延性; 混凝土; 条带法加固; 砖砌墙体; 抗震性能; 数值模拟

中图分类号: TU362 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 06-0120-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.001

ZHU Zhenbei, XIA Haiyu, PENG Chunyang

(China Construction Sixth Engineering Bureau Corp., Ltd, Tianjin 300171, China)

Abstract: To improve the seismic performance of brick walls and ensure their safety, a numerical simulation method for strengthening the seismic performance of brick walls using high ductility concrete strip method is proposed. Specimens were prepared using AAC blocks, steel bars and concrete; Select materials such as fly ash, cement, sand, and PVA fibers to prepare high ductility concrete, and reinforce brick wall specimens with horizontal, vertical, and intersecting strips. Simulate the seismic performance of reinforced and unreinforced specimens using finite element software. The results show that the reinforced specimens have good seismic performance, with a load range of 305.3 ~ 302.7 kN; Strip reinforcement can significantly delay the stiffness degradation of brick walls, with the highest cracking load and peak load reaching 419.2 and 511.06 kN, respectively.

Keywords: high ductility; concrete; strip reinforcement; brick wall; seismic performance; numerical simulation

0 引言

砖砌结构作为传统的建筑结构形式, 在我国有着广泛的应用, 特别是在老旧建筑物中占据重要地

位。然而, 这类结构往往存在抗震性能不足的问题, 尤其是在地震频发的地区, 其安全性备受关注^[1-2]。因此, 对砖砌墙体进行抗震加固研究具有重要的现实意义。

近年来, 大量学者在加固砖砌墙体抗震性能方面进行了大量研究。通过模拟地震负载下的试验方法, 对加固前后的墙体进行受力实验, 比较分析其抗震性能的改进情况^[3-5]。敬登虎等^[6]提出在横向钢板带预加拉力, 测试预应力钢板对砖墙抗震性能的提升效果, 得出墙体高宽比达 1 时, 适当提高预应力

作者简介: 朱振北 (1990—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

收稿日期: 2023-02-08

水平可进一步增强承载力的结论。邓明科等^[7]提出采用高延性混凝土加固砌块墙，采用拟静力试验，论证了用高延性混凝土可以提高无筋墙的承载力、变形和耗能能力，减少裂缝，减缓刚度退化的性能。陈氏凤等^[8]使用纤维编织网混凝土对砌体墙进行单侧加固，研究了三种试件的破坏形态、滞回曲线、侧向承载力、刚度退化和耗能等性能；BTRC 单侧加固能改变破坏形态，大幅提升侧向承载力。周铁钢等^[9]采用新型机制生土砖与专用砂浆制作墙体评估其抗震性，结果表明砂浆固化剂能显著提高墙体承载和变形能力，薄灰缝影响有限，且荷载-位移数据无量纲化后，与四折线骨架曲线模型吻合良好。寇佳亮等^[10]采用了高延性混凝土加固技术对震损框桁式复合墙体进行抗震性能提升，通过在墙体中加入高延性混凝土加固材料，复合墙体结构的抗震性能得到了显著提高。赵浩等^[11]采用环氧树脂和甲基丙烯酸甲酯对试件进行加固，结果表明，高分子材料能有效控制墙体裂缝，提升承载力和变形能力，墙体承载力和延性也分别得到了增强。程东辉等^[12]采用碳纤维增强复合材料（CFRP）布加固方形、T形截面及 T 形截面加角钢锚固不同截面混凝土柱，结果显示可有效地提升了混凝土柱的极限承载力。

目前，虽然在提升砖砌墙体抗震性能方面取得了一定的成果，但仍存在加固效果的不均匀性、材料刚度退化以及加固后结构重量增加等问题，因此，采用高延性混凝土条带法加固砖砌墙体，对其抗震性能进行数值模拟研究，为类似工程提供一种更为高效经济且适用性广的加固方案。

1 试件制备及装置

1.1 原材料

选择 AAC 砌块作为墙体砌筑材料^[9]。AAC 砌块是一种由粉煤灰、水泥等多种原材料，经一系列加工工艺制备形成的一种多孔混凝土板材。AAC 砌块等级为 A5.0 级，尺寸为 60 cm × 24 cm × 19 cm。

高延性混凝土主要采用粉煤灰、水泥、砂以及 PVA 纤维、水等材料，按照一定比例制备。粉煤灰，化学成分为 CaO，等级为国标 I 级，密度为 2.1 g/cm³；水泥为 P · O 42.5 的白水泥，细度为 80 μm；砂选择细砂，其含水率为 0.01%，含泥量为 0.01%，表观

密度为 2 500 kg/m³；PVA 纤维，性能见表 1。

表 1 PVA 纤维性能
Table 1 PVA fiber performance details

长度 /mm	直径 /μm	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	伸长率 /%	密度 / (g/cm ³)
12	33	1 496.7	35.8	7	1.29

1.2 试件制备

制备粉煤灰加固样本材料为粉煤灰水泥、砂和水，将材料按照 1:1:0.75:0.55 进行配比。PVA 纤维掺量为 2.5%，按照上述比例完成高延性混凝土加固材料的制备。

制备砖砌墙体样本：采用 AAC 砌块、钢筋以及混凝土进行墙体砌筑。墙体顶梁为钢筋混凝土砌筑，砌筑墙和底梁为蒸压加气混凝土砌筑。墙体厚为 24 cm，墙体高宽比为 0.62，柱截面尺寸为 12 cm × 19 cm。墙体内部纵筋和箍筋均 φ6 钢筋。制备完成后，进行 28 d 养护。

试件上共安装 4 个位移计和 2 个百分表。加载梁中间位置和底部（W1 和 W2）、墙体一侧对角线方向各 1 个（W3 和 W4），墙体两侧距离梁底 1/2 倍高处位置各 1 个百分计（W4 和 W5）。如图 1 所示。

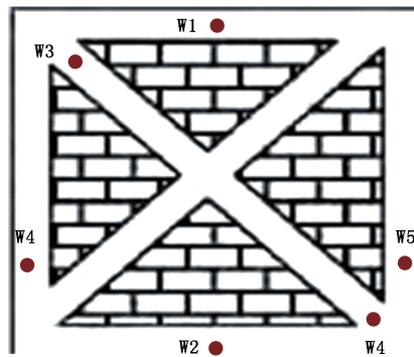


图 1 加固后墙体试件结构

Fig. 1 Reinforced wall specimen structure

1.3 加载装置

采用反复静载荷加载试验装置，获得地震时加固后砖砌墙体结构试件的滞回曲线和骨架曲线变化结果。检测装置是否正常，通过载荷-位移混合方式将竖向载荷分级加载在试件的顶部。上梁均匀分配载荷后保证顶部载荷恒定为 0.5 MPa。试件发生屈服时，载荷按照加载等级等差降低。试件发生屈服后加载方式改为位移载荷，位移等级之差为 2 mm。以 85% 极限载荷作为标准，试样的承载能力下降到该值则终止加载。

建筑结构

1.4 有限元模拟

采用 ABAQUS 有限元软件进行抗震性能模拟。利用 Part 模块按照实际尺寸构建试件底座、梁、柱、条板、纵筋、箍筋等三维模型。利用 Property 模块定义混凝土、钢筋等材料截面几何属性。利用 Assembly 模块组装构件, 构建加固后的砖砌墙体试件模型^[13-14]。通过 Step 模块设定位移边界条件, 完成水平位移加载。在 Interaction 模块中设定几何构件间相互作用属性。利用 Mesh 模块划分网格, 完成构件有限元模型, 进行抗震性能模拟。

2 试验分析

2.1 滞回曲线试验分析

滞回曲线变化情况如图 2 所示。试件加固前, 在受到位移载荷作用后, 产生的曲线斜率变化幅度较小, 滞回环的面积较小; 试件加固后, 在相同的位移载荷下, 产生的滞回斜率变化明显, 滞回环面积

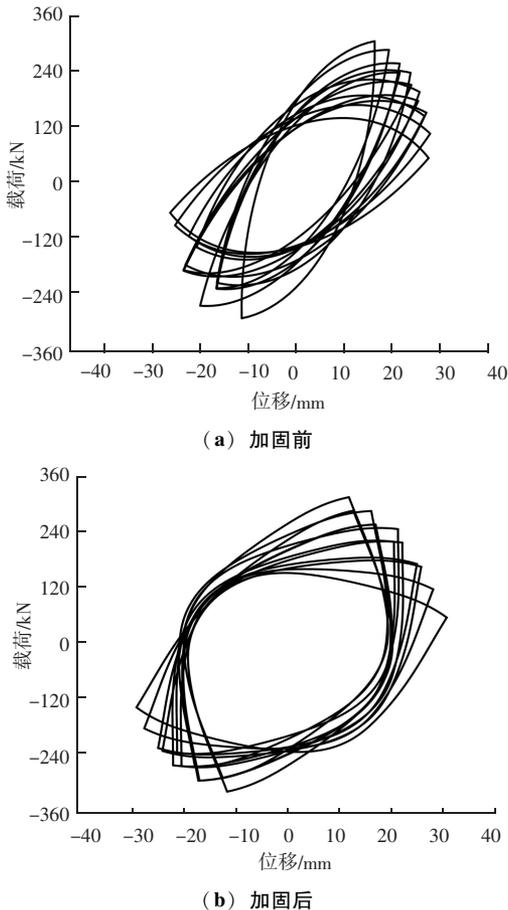


图 2 滞回曲线试验结果
Fig. 2 Results of hysteresis curve test

增加, 回环的饱满度较高。因此, 加固后试件的滞回性能更佳, 即表示加固后试件具有良好的恢复性, 抗震性能良好。

2.2 骨架曲线试验分析

骨架曲线如图 3 所示。随着位移载荷的不断变化, 加固前试件受到载荷作用后, 其承受载荷范围在 220.4 kN ~ -222.6 kN 之间; 加固后试件承受载荷范围在 305.3 kN ~ -302.7 kN 之间。因此, 加固后试件延性显著提升, 并且可增加砖砌墙体抗倒塌能力。

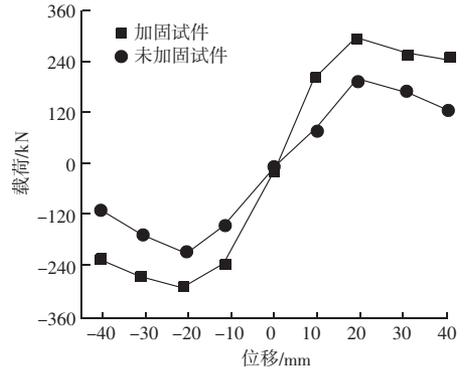


图 3 试件的骨架曲线变化结果
Fig. 3 Result of skeleton curve variation of the specimen

2.3 试样能耗能力分析

分析两种试件在屈服位移、峰值载荷下位移以及极限位移三种情况下, 两种试件的累计能耗结果, 见表 2。

表 2 两种试件的累计能耗结果
Table 2 Cumulative energy consumption results of two types of specimens / (kN · mm)

试验指标	试件类别	
	加固前	加固后
屈服位移	6 596.44	8 102.14
峰值载荷下位移	72 118.59	84 226.06
极限位移	189 006.33	245 906.94

两种试件在相同的试验条件下, 产生的累计能耗结果存在显著的差异性变化。加固前试件在 3 种情况下的累计能耗结果分别为 6 596.44、72 118.59、189 006.33 kN · mm, 加固后试件在 3 种情况下累计能耗分别为 8 102.14、84 226.06、245 906.94 kN · mm。加固后试件的累计能耗结果显著优于加固前的试件结果, 说明采用高延性混凝土进行条带加固后, 能够极大程度提升砖砌墙体在破坏阶段的能耗能力。

2.4 刚度退化能力分析

试件在不同位移载荷下的刚度变化情况, 见表

3. 两种试件在位移载荷加载初期时的刚度结果下降显著, 发生较大变化; 当位移增加至 10 mm 以后, 未加固试件的刚度仍旧发生下降, 但是下降幅度较小; 加固后试件则趋于稳定, 没有明显下降趋势, 刚度值保持在 55.5 kN·mm。因此, 采用高延性混凝土进行条带加固后, 能够显著延缓砖砌墙体的刚度退化。

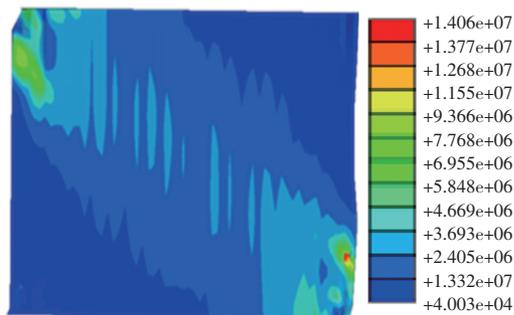
表 3 刚度退化能力试验结果 / (kN·mm)

Table 3 Results of stiffness degradation capacity test

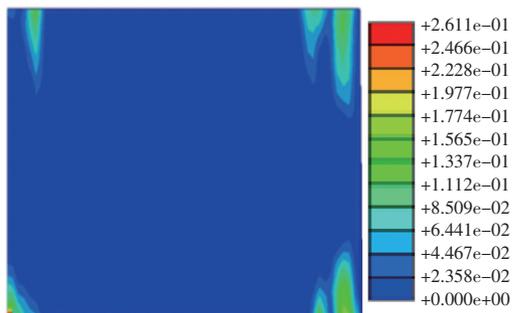
位移载荷 /mm	试件类别	
	加固前	加固后
2	777.3	576.4
4	449.2	337.2
6	369.5	206.8
8	254.1	111.7
10	174.5	55.5
12	99.7	55.5
14	66.4	55.5
16	63.2	55.5
18	60.1	55.5
20	57.8	55.5

2.5 有限元模拟试验分析

相同载荷作用下, 试件有限元模型的时刻应力变化结果如图 4 所示。在相同的载荷作用下, 加固前试件的应力云图发生较为明显的形状变化, 并且试



(a) 加固前



(b) 加固后

图 4 有限元模拟试验结果

Fig. 4 Finite element simulation test results

件内部的应力呈现不规则的斜向变化; 加固后试件的应力云图则变化较小, 仅在试件 4 个角落位置存在较小的应力变化, 但是墙体内部没有发生变化。因此, 加固后试件具有更佳的抗震性能。

2.6 承载力试验分析

在推拉两种载荷加载方式下, 试件测试结果见表 4。在相同的加载方式下, 加固前试件的开裂载荷和峰值载荷均在 300 kN 以内; 加固后试件在两种加载方式下, 开裂载荷和峰值载荷均在 300 kN 以上, 两者的最高值分别达到 419.2 kN 和 511.6 kN。因此, 加固后试件的具有更佳的抗震承载力。

表 4 试件的承载力试验结果

Table 4 Bearing capacity test results of test specimens /kN

加载方式		试件类别	
		加固前	加固后
推加载	开裂载荷	125.8	407.1
	峰值载荷	289.9	511.2
拉加载	开裂载荷	204.4	419.2
	峰值载荷	295.3	511.6

3 结论

本文提出高延性混凝土条带法加固砖砌墙体抗震性能数值模拟方法。通过横向、纵向以及交叉条带加固砖砌墙体试件, 并利用 ABAQUS 有限元软件模拟试件的抗震性能。得到以下主要结论:

(1) 通过高延性混凝土条带法对砖砌墙体进行加固处理, 能够延缓砖砌墙体的刚度退化, 提升墙体的抗震能力, 保证了墙体在服役过程中的稳定。

(2) 未来研究可以考虑结合现代传感技术与数据分析, 开展更全面的性能评估, 包括抗震、耐久性等, 以及加固墙体在实际地震中的表现, 为工程应用提供新的研究思路。

参 考 文 献

- [1] 李治, 薛天琦, 祝捷, 等. 错开洞钢筋混凝土剪力墙抗震性能数值模拟 [J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39 (3): 154-164.
- [2] 刘磊, 郑志辉, 史阳光. 蒸压加气混凝土砌块单轴拉伸力学性能研究 [J]. 水电能源科学, 2023 (2): 173-176, 120.
- [3] 舒宏博, 车佳玲, 包超. 宁夏地区农房建造方式与高延性混凝土条带加固法应用 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (增刊 1): 2057-2061.
- [4] 陈氏凤, 王激扬, 沈军, 等. 纤维编织 (下转第 148 页)

建筑节能

参 考 文 献

- [1] 陈宁. 基于工业物联网的煤矿巡检多机器人低能耗控制 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2023 (2): 51-56.
- [2] 赵宇冰, 刘育平, 卜小伟, 等. 基于决策树算法的园区照明系统能耗优化控制方法 [J]. 计算技术与自动化, 2023, 42 (1): 72-77.
- [3] 雷琪. 铁路客站照明能耗特征及典型节能控制策略分析 [J]. 光源与照明, 2023 (3): 30-32.
- [4] 王霞, 潘敏, 周鹏成, 等. 基于数据监测与程序优化实现冷库能耗控制 [J]. 中国港口, 2023 (增刊1): 106-109.
- [5] 肖松泉. 基于无人机协作的物联网无线通信能耗控制方法研究 [J]. 软件, 2022, 43 (6): 171-174.
- [6] MOHAMMED E A B H, RACHID L, HABIB R, et al. Thermal simulation of the ground source heat pump used for energy needs of a bioclimatic house in Tlemcen City (western ALGERIA) [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023, 45 (2): 5425-5439.
- [7] 马青有. 基于储能和智能控制的空调系统能耗优化研究 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13 (5): 1592-1594.
- [8] 胡亚南, 宁奎伟, 李鑫. 高速卫生纸机干燥部协同能耗优化控制设计与应用 [J]. 制造业自动化, 2023, 45 (9): 49-55.
- [9] 李青云, 高宇鹏, 杨倩倩. 基于分片重传链路感知的无线传感器网络能耗控制方法 [J]. 传感技术学报, 2023, 36 (7): 1136-1142.
- [10] 唐伟, 陈昆, 陈佳琦, 等. 基于热流分析法的加热卷烟具能耗控制研究 [J]. 轻工学报, 2023, 38 (3): 119-126.
- [11] 杨光, 顾红. 基于加权分簇的微机械传感节点能耗控制研究 [J]. 传感技术学报, 2022, 35 (12): 1717-1721.
- [12] 彭见辉, 陈军杰, 李佳玉. 基于 DCNLP 的分拣机械臂最优能耗控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022 (10): 92-96.
- [13] 王海峰, 陈庆奎. 多指标自趋优的 GPU 集群能耗控制模型 [J]. 计算机研究与发展, 2015, 52 (1): 105-115.
- [14] 郭敏, 夏明超, 陈奇芳. 基于统一多能耗模型的公路能源群落最优能耗领导-跟随控制 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (24): 9384-9397.
- [15] 周鑫, 陈建平, 傅启明. 基于 DDPG 模型的建筑能耗控制方法 [J]. 计算机应用与软件, 2023, 40 (2): 40-47.
- [16] 匡银虎, 张虹波. 基于物联网的多无人机协作能耗控制算法仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (2): 454-458.
- [17] 周鑫, 陈建平, 傅启明. 基于 DDPG 模型的建筑能耗控制方法 [J]. 计算机应用与软件, 2023, 40 (2): 40-47.
- [18] 杨光, 顾红. 基于加权分簇的微机械传感节点能耗控制研究 [J]. 传感技术学报, 2022, 35 (12): 1717-1721.
- [19] 成慧翔, 聂慧慧, 马艳娥. 可操纵性的冗余机械臂运动能耗控制研究 [J]. 机械设计与制造, 2023 (4): 300-304.
- [20] 彭见辉, 陈军杰, 李佳玉. 基于 DCNLP 的分拣机械臂最优能耗控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022 (10): 92-96.
- [21] 林彰银, 明显诚. 基于价值链的建筑建造能耗增量控制模型仿真 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (9): 293-297, 308.
- [22] 曾伟. 变流量空调水系统水泵变频控制及能耗分析 [J]. 建筑热能通风空调, 2022, 41 (6): 45-48.
- [23] 王广利. “NEW GRAND PEACE” 轮燃油管理及能耗控制 [J]. 船舶物资与市场, 2022, 30 (4): 26-28.
- [24] 刘国丹, 纪铤行, 滕润, 等. 基于熵权法的光热耦合综合能耗的百叶外遮阳控制策略 [J]. 太阳能学报, 2022, 43 (3): 236-241.

(上接第 123 页)

- 网混凝土单侧加固砌体墙的拟静力试验研究 [J]. 混凝土, 2022 (4): 56-60.
- [5] 张伟, 贺晶晶, 胡炜, 等. 高延性混凝土加固砌块砌体墙抗震性能试验及承载力研究 [J]. 工程力学, 2024, 41: 1-13.
- [6] 敬登虎, 乔墩, 邢凯丽. 预应力钢板带加固砖砌体墙抗震性能试验研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2021, 48 (7): 19-27.
- [7] 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.
- [8] 陈氏凤, 王激扬, 沈军, 等. 纤维编织网混凝土单侧加固砌体墙的拟静力试验研究 [J]. 混凝土, 2022 (4): 56-60.
- [9] 周铁钢, 张再昱. 新型机制生土砖砌体墙抗震性能试验及恢复力模型研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (2): 135-139, 126.
- [10] 寇佳亮, 张香草, 徐炎, 等. HDC 加固震损框桁式复合墙体抗震性能试验及恢复力模型研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42 (3): 122-133.
- [11] 赵浩, 刘伟, 杨涛, 等. 性能增强古建筑砌体墙抗震性能试验及有限元分析 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (2): 140-149.
- [12] 程东辉, 姚宇航, 王丽. CFRP 布对不同截面混凝土柱加固性能分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40 (3): 40-49.
- [13] 饶城, 刘叔灼, 陈俊生. 基于 ABAQUS 的新型格型地下连续墙稳定性评估 [J]. 科技通报, 2024, 40 (9): 50-55.
- [14] 宋泰宇. 基于 Abaqus 的预应力混凝土 T 梁全过程剪力滞效应 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (6): 103-112.