

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.059



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



蒸压加气混凝土墙板双面加固砖砌体墙的抗压承载性能

周永明¹, 潘淑涵², 施韬², 高超¹, 李国华³, 徐伟斌¹, 陈瑞生⁴

(1. 浙江省建筑设计研究院有限公司, 杭州 310006; 2. 浙江工业大学 土木工程学院, 杭州 310014;
3. 华固(杭州)建筑技术有限公司, 杭州 310006; 4. 浙江工业大学工程设计集团有限公司, 杭州 310014)

摘要:为研究蒸压加气混凝土(AAC)墙板加固砖砌体墙的抗压承载性能,设计制作2片AAC墙板双面加固砖砌体墙和2片作为对比试件的未加固砖砌体墙,通过抗压承载力试验和有限元数值分析,研究AAC板加固砖砌体墙的受压破坏形态和承载性能。试验和数值分析结果表明:蒸压加气混凝土墙板面层能对砖砌体墙形成约束作用,延缓砖墙开裂,提高墙体的受压承载力、刚度、延性和整体性;试验结果表明,与未加固砌体墙相比,双面AAC板加固的墙体受压承载力最大提高了71.3%,数值分析结果表明,与未加固砌体墙相比,双面AAC板加固的墙体受压承载力最大提高了67.5%。基于试件的破坏形态、受力特征及界面传力、协同工作特点,提出了蒸压加气混凝土板面层加固方法的受压承载力简化计算公式,给出了加气混凝土强度利用系数和钢筋强度利用系数。

关键词:蒸压加气混凝土墙板;砖墙;加固;受压承载力;有限元分析

中图分类号:TU362 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Compressive bearing performance of masonry walls reinforced with double-sided prefabricated autoclaved aerated concrete panels

ZHOU Yongming¹, PAN Shuhan², SHI Tao², GAO Chao¹, LI Guohua³, XU Weibin¹, CHEN Ruisheng⁴

(1. Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310006, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, P. R. China; 3. Huagu (Hangzhou) Construction Technology Co., Hangzhou 310006, P. R. China; 4. Zhejiang University of Technology Engineering Design Group Co., Ltd, Hangzhou 310014, P. R. China)

收稿日期:2025-01-17

基金项目:国家自然科学基金(52378270、52408302、52402036);浙江省建设科研项目(2023K144)

作者简介:周永明(1969-),男,教授级高级工程师,主要从事建筑结构设计与研究,E-mail:9764zym@sina.com。

施韬(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:shitao@zjut.edu.cn。

Received: 2025-01-17

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52378270, 52408302, 52402036); Zhejiang Provincial Construction Research Project (No. 2023K144)

Author brief: ZHOU Yongming (1969-), professor-level senior engineer, main research interests: architectural structural design and research, E-mail: 9764zym@sina.com.

SHI Tao (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: shitao@zjut.edu.cn.

Abstract: To investigate the compressive bearing performance of brick masonry walls reinforced with prefabricated autoclaved aerated concrete (AAC) panels, two brick masonry walls reinforced with double-sided prefabricated AAC panels and two unreinforced brick masonry walls as control specimens were designed and fabricated. Through compressive bearing capacity tests and finite element simulation software, the failure modes and compressive bearing performance of the brick masonry walls reinforced with prefabricated AAC panels were studied. Both the experimental and simulation results indicate that the reinforced layer of prefabricated AAC panels can provide confinement to the wall, delaying the cracking of the brick masonry wall and enhancing its compressive bearing capacity, ductility, and integrity. Compared to the unreinforced masonry walls, the compressive bearing capacity of the double-sided prefabricated AAC panel-reinforced walls increased by a maximum of 71.3% in the tests and by a maximum of 67.5% in the simulations. Based on the failure modes of the specimens and considering the contribution of the prefabricated autoclaved aerated concrete panel reinforcement layer, a formula for calculating the compressive bearing capacity of this reinforcement method was proposed. Furthermore, the strength utilization coefficient of autoclaved aerated concrete for this calculation method was fitted and determined based on the experimental and simulation results.

Keywords: prefabricated autoclaved aerated concrete panels; brick masonry walls; reinforcement; compressive bearing capacity; finite element simulation

砖砌体承重构件由砖通过砂浆粘结砌筑而成,其抗压强度主要受砖的强度等级、形状、砂浆的强度等级及物理力学性能及砌筑质量等因素影响。砌体结构轴心受压时呈现脆性破坏特征。当前,普遍采用的砌体构件受压承载力加固方法,主要是通过增大构件截面尺寸来提升砌体的承载能力,常用的方法有:钢筋混凝土面层加固法、钢筋网水泥砂浆面层加固法等。这类加固技术大多涉及湿作业,需在现场搭建模板进行混凝土浇灌或喷涂附加层。此类施工方法不仅要求有足够的作业空间,而且需要较长的养护周期,导致施工周期延长,成本增加,同时对周边环境也会产生显著影响。笔者提出的砖砌体加固技术采用装配式高性能轻质蒸压加气混凝土(Autoclaved Aerated Concrete,简称AAC)板材。AAC材料具有多重优越性能:其密度显著低于普通混凝土,这不仅降低了运输成本,还提升了施工效率^[1];在物理性能方面,AAC展现出优异的耐热性、低导热系数和较小的收缩率,同时保证了良好的施工稳固性^[2-5]。此外,AAC作为一种环境友好型建筑材料^[6],符合可持续发展的绿色建造理念。这些特性使其成为砌体加固工程的理想选择。

学者们针对老旧砌体结构的加固技术也进行了深入探讨。Garcia-Ramonda等^[7]通过试验研究单层和双层钢筋灌浆(SRG,一种特殊的织物增强砂浆TRM)加固的砌体墙在循环荷载下的力学行为。Park等^[8]用纤维增强水泥基复合材料(FRCC)预制板对未加固砌体墙进行抗震加固,为实际工程提供了参考。Xu等^[9]从抗震性能出发,探讨了PC板加固对砌体墙的剪切强度、刚度和能量耗散能力的提

升效果。周长东等^[10]通过试验探讨ECC嵌缝加固砖砌体的剪切性能,针对不同纤维类型、纤维掺量、嵌缝间距和单双面加固对砖砌体抗剪强度、刚度和延性的影响。Sah等^[11]分析预制混凝土夹芯板和其他轻质墙板技术发现,其在装配式建筑中结构承重应用的研究仍然缺乏。目前加固老旧砌体结构房屋的研究使用的材料主要是预制钢筋混凝土墙板、高延性混凝土和纤维砂浆等,对预制蒸压加气混凝土墙板在砌体抗压加固中的研究、应用和试验鲜有报道,有必要对该加固方法进行深入的研究分析。笔者通过受压承载力试验和有限元模拟,研究AAC板加固砖砌体墙的破坏形态、受压承载性能,基于试验和数值模拟分析结果,提出了此加固砌体墙的抗压承载力简化计算方法,给出了加气混凝土和钢筋的强度利用系数。

1 试验概况

1.1 试件加固方法和试件设计

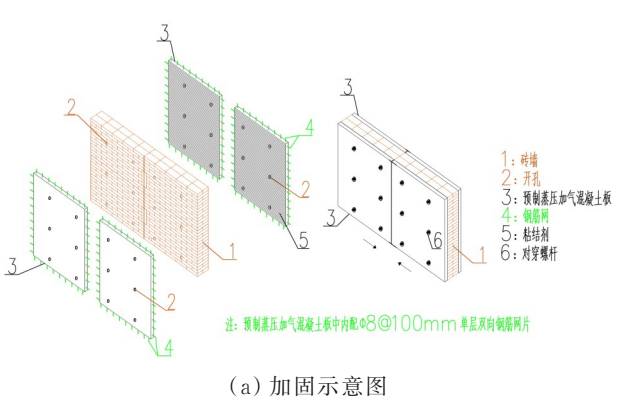
浙江地区老旧小区既有砌体结构检测数据(主要针对住宅类建筑)表明,砖块风化(酥减)损伤程度及抗压强度退化不严重,但砌筑用混合砂浆普遍存在粉化、老化严重的问题,砌筑砂浆强度实测推定值在M1.0~M2.5之间,故选用由MU10实心砖+M2.5混合砂浆和MU10实心砖+M5.0混合砂浆构成的两组无筋砖墙试件来模拟现存30余年的砌体承重墙符合现状,在此基础上对两组基本试件采用蒸压加气混凝土面板进行轴心受压承载力加固,主要研究双面加固效果。双面加固均采用50 mm厚预制蒸压加气混凝土面板,构造如图1(a)所

示。蒸压加气混凝土板的参数为:600 mm×50 mm×1 800 mm(长×厚×高),级别为B06A5.0,记为B50,内配Φ8@100 mm单层双向钢筋网片。为使蒸压加气混凝土板与既有砖墙之间的结合面能可靠传力、协同工作,界面处理采用专用黏胶剂,并设置一定数量对穿螺杆进行拉结,使其形成一个整体截面。试件采用18 mm的普通对称螺杆,其中对穿螺杆间距和数量如图1(b)所示。蒸压加气混凝土板上端与楼板通过三角楔块预顶紧,下端采取压力灌浆形式进行填缝,使得后加的预制蒸压加气混凝土板在顶紧装置释放后与砖墙形成协同变形、共同受力。蒸压加气混凝土板之间竖缝采用密拼接缝,拼缝采用专用粘结剂进行填缝处理,以控制裂缝的发展。其中粘结剂为蒸压加气混凝土砌块白色专用粘结剂,强度均大于A5.0。

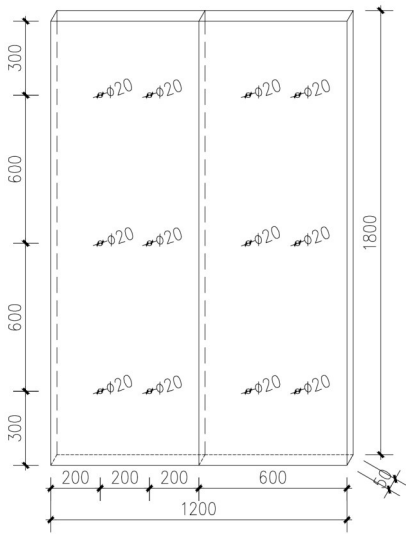
试验设计了砖砌体墙体、蒸压加气混凝土墙板双面加固砖墙两种试件,砖砌体墙的长×厚×高($L\times b\times h$)尺寸为:1 200 mm×240 mm×1 800 mm,其余试件编号以及设计尺寸见表1所示。双面加固试件Q1-2和Q2-2加固方式和螺杆布置均一致,试件均由同一工人采用相同的工艺砌筑而成,砖砌筑完成养护2周后再进行面板加固。

1.2 材料力学性能

砌体由砖和砂浆组成,需研究砌体构件抗压性能。根据《砌体基本力学性能试验方法标准》(GB/T 50129—2011)^[12],试验和模拟的砌体有MU10+M2.5和MU10+M5.0两组,每组3个试件。按照要求,同一对比组的6个试件均由同一名工人砌筑,砌体试件在室内自然条件下养护28 d后进行试验。砌体抗压试件的砌筑示如图2所示,砌体试件的尺寸以及抗压强度实测值见表2。经整理计算,得到MU10+M2.5砌体的抗压强度平均值为5.34 MPa,标准差为0.20 MPa;MU10+M5.0砌体的抗压强度平均值为7.70 MPa,标准差为0.63 MPa。计算得到MU10+M2.5和MU10+M5.0砌体的标准值分别为5.01 MPa和6.66 MPa,均满足《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)要求。加固采用的预制蒸压加气混凝土(AAC)板为工厂生产的B06A5.0级板材,其平均抗压强度为5.0 MPa,其内



(a) 加固示意图



(b) AAC板打孔示意图

图1 加固构造
Fig.1 Reinforcement detailing

配钢筋为HPB300,实测抗拉强度>420 MPa,屈服强度>300 MPa,均符合规范。

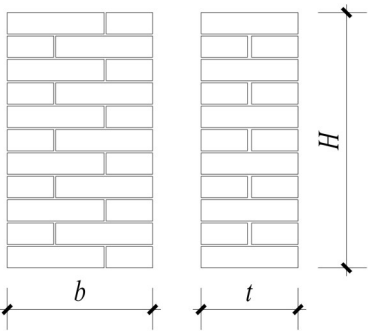


图2 砌体抗压试件示意图
Fig.2 Schematic diagram of masonry compression specimens

表1 试验墙体试件设计参数					
Table 1 Design parameters of the test wall specimens					
试件编号	长×厚×高	砌体强度	加固方式	加固厚度/mm	加固板材编号
Q1-1	1 200 mm×240 mm×1 800 mm	MU10+M2.5	无	0	无
Q1-2	1 200 mm×350 mm×1 800 mm	MU10+M2.5	双面	50+50	B50
Q2-1	1 200 mm×240 mm×1 800 mm	MU10+M5.0	无	0	无
Q2-2	1 200 mm×350 mm×1 800 mm	MU10+M5.0	双面	50+50	B50

表 2 砌体试件抗压强度实测值

Table 2 The measured values of compressive strength for masonry specimens

试件编号	试件尺寸	受压尺寸	砌体强度	荷载/kN	抗压强度/MPa
M1-1	690 mm×350 mm×230 mm	350 mm×230 mm	MU10+M2.5	431.42	5.36
M1-2	690 mm×350 mm×230 mm	350 mm×230 mm	MU10+M2.5	445.05	5.53
M1-3	690 mm×350 mm×230 mm	350 mm×230 mm	MU10+M2.5	413.78	5.14
M2-1	690 mm×350 mm×230 mm	350 mm×230 mm	MU10+M5.0	650.14	8.08
M2-2	690 mm×350 mm×230 mm	350 mm×230 mm	MU10+M5.0	628.95	7.81
M2-3	690 mm×350 mm×230 mm	350 mm×230 mm	MU10+M5.0	580.20	7.21

1.3 试验加载及测量

试验在浙江树人大学结构实验室进行,加载装置为 YAW-5000F 微机控制电液伺服多功能试验机。试件的竖向荷载由 500 t 竖向作动器通过钢加载梁进行传递。试件顶部使用 M30 高强螺栓将竖向作动器加载头与钢加载梁相连,竖向作动器与加载头连接部分为球铰,有一定的转动能力,试件底座通过 M30 高强地锚螺栓固定在地面。试验装置如图 3 所示。根据砌体加固规范计算和有限元模拟预估墙体承载力并按预估承载力的 10% 预加载,以

调整试样的水平,确保试样能均匀承受载荷,预加载 3 次后进行正式加载。试件在加载初期处于线弹性阶段,当荷载接近峰值荷载时,材料可能进入非线性塑性阶段,微裂缝或局部屈服导致刚度显著下降。若继续使用荷载控制,可能因试件承载力骤降出现失稳破坏,试验机无法快速响应荷载跌落,导致峰值后数据丢失或试件突然崩溃。所以先使用恒定速度来增加荷载,增加的荷载为预估峰值荷载的 10%,每一级加载在 1 min 内完成,每级加载结束后需要进行恒载 1 min。达到峰值荷载的 80% 后,采用位移控制加载,加载速率为 0.4~0.8 mm/min,直到荷载下降到峰值荷载的 85% 以下时停止加载。

2 试验现象与结果分析

2.1 试验现象

1) 未加固试件组

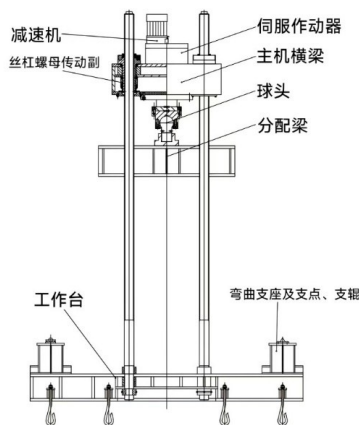
Q1-1 和 Q2-1 分别为 MU10+M2.5 和 MU10+M5.0 两种砌体强度的未加固参照试件。

Q1-1 的破坏形态是砖墙从开始受压直到破坏为止,按照裂缝出现和发展的特点,可以分为 3 个阶段:第 1 阶段是从砖墙开始受压到出现初始裂缝, Q1-1 在 1 000 kN 时出现初始裂缝,其值为极限荷载的 63.4%。裂缝出现在砌体左后侧上方,此时不增加荷载处于恒载状态,裂缝也不会继续扩大。第 2 阶段改成位移加载,随着荷载的增加,裂缝慢慢延伸发展,当荷载达到 1 577.6 kN, Q1-1 试件右上角开始出现裂缝,右下侧也出现多处裂缝,并出现剥离现象。第 3 阶段,随着荷载继续增加,裂缝发展加速,并形成几条贯通的裂缝,左侧裂缝也迅速延伸见图 4(a),砖砌体很快丧失承载能力而达到破坏荷载。Q2-1 和 Q1-1 的破坏形态相似,破坏形式见图 4(b)所示。

2) 双面加固试件组

Q1-2 和 Q2-2 分别为 MU10+M2.5 和 MU10+M5.0 两种砌体强度的双面各贴 50 mm 预制蒸压加气混凝土墙板加固试件。

在加载到 300 kN 时, Q1-2 因加固面层上方有



(a) 示意图



(b) 现场图

图 3 试验装置图

Fig.3 Experimental setup diagram



(a) Q1-1 试件左侧

(b) Q2-1 试件右侧

图 4 未加固试件破坏图

Fig.4 Failure diagram of unreinforced specimens

凸起,在蒸压加气混凝土墙板和砖砌体之间产生一些细微裂缝,增加到 400 kN 时,竖向位移增加,之后 AAC 墙板加固面层和砖砌体协同受力,裂缝没有继续延伸;当荷载继续增大到 1 000 kN 时,试件右后侧上方的 AAC 墙板被压碎一小块,左侧上方 AAC 墙板也出现细小裂缝,恒载后裂缝没有继续延伸,从此时将荷载加载改为位移加载;当荷载继续增加到 1 659.4 kN 时,如图 5(a)所示,左右两侧砖砌体中间也出现从上往下延伸 30 cm 左右的裂缝,AAC 墙板与砖砌体之间的裂缝延伸增长,左后侧 AAC 墙板出现剥离现象;随着荷载的不断增长,裂缝不断延伸增长,当达到极限荷载 2 752.7 kN 时,伴随着几声脆响,AAC 墙板加固面层表面的蒸压加气混凝土开始剥离掉落,向平面外两侧凸出,内部钢筋裸露出现,试件侧面砖砌体中的砖块也开始崩坏剥离脱落,AAC 墙板加固面层与砖砌体粘结处裂缝延伸至整体试件的一半以上,接着试件丧失承载力,但由于 AAC 墙板双面加固的约束作用,试件并未直接整体崩坏,仍起到一定的束缚作用,最终试件破坏情况如图 5(b)和(c)所示。

Q2-2 在加载到 800 kN 时,试件左侧上方砖砌体开始出现裂缝,蒸压加气混凝土墙板加固面层与砖砌体之间也同样出现裂缝,从此时将荷载加载改为位移加载;随着荷载继续增加,细小裂缝不断产生,加载到 1 601.6 kN 时,试件左侧上方砖砌体被压碎一小块剥落,但由于 AAC 墙板加固面层的约束作用,试件仍能继续加载,裂缝并未大肆扩张,荷

载达到 1919.1 kN 后,如图 5(d)所示,试件右侧砖砌体中间也出现裂缝,试件左侧 AAC 墙板加固面层与砖砌体之间裂缝延伸至 50 cm;随着荷载的不断增长,裂缝不断延伸增长,当荷载达到 3 051.2 kN 时,伴随着几声脆响,试件左侧后方 AAC 墙板加固面层表面的蒸压加气混凝土沿着裂缝开始剥离掉落,裂缝延伸至整块 AAC 墙板的底部,荷载到达极限荷载后,AAC 墙板中的钢筋开始裸露,试件两侧大裂缝出现,试件中的砖砌体迅速达到破坏荷载而丧失承载力。最终试件破坏情况如图 5(e)和(f)所示。

2.2 试验结果对比分析

试件开裂荷载和破坏荷载如表 3 所示。由试验



(a) 1659.4kN 时 Q1-2 左侧



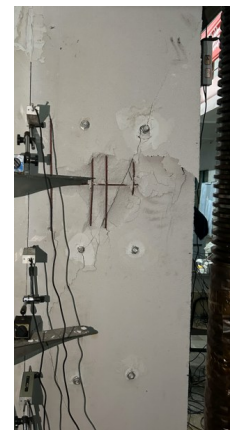
(b) Q1-2 破坏正面



(c) Q1-2 破坏右侧



(d) 1919.1 kN 时 Q2-2 左侧



(e) Q2-2 破坏正后方



(f) Q2-2 破坏左侧

图 5 双面加固试件破坏图

Fig.5 Failure diagram of double-sided reinforced specimens

现象和表 3 数据分析可知,对比 MU10+2.5 和 MU10+M5.0 两组试件可以看出,砌体试件中砂浆强度是影响砌体抗压强度的重要因素,随着砂浆强度的增大,砌体试件的开裂荷载和破坏荷载也随之增大,开裂荷载和破坏荷载的提升幅度下降,说明相同的加固方法及厚度,对低强度砌体墙的加固效果更好。

Q1-2 和 Q2-2 均为双面 50 mm 厚 AAC 板加固砌体墙试件,分别与对应的未加固对照组进行比较可知,开裂荷载与破坏荷载的比值均有所增加,开裂荷载分别提高了 84.4% 和 61.3%,破坏荷载分别提升了 71.3% 和 51.8%,双面加固试件组的 N_{cr}/N 比例略高(61.4%~62.9%),表明加固后试件在开裂后仍能保持较高承载力,说明双面均匀加固使应力分布对称,避免局部薄弱区域。加固层与原墙体协同承载,延缓开裂后应力集中,显著提升破坏荷载。

各位加固试件组与双面加固试件组的荷载-位移曲线如图 6 所示。由图 6 可知,对比 Q1-1 和 Q1-2、Q2-1 和 Q2-2 发现,通过 AAC 墙板进行双面加固砖砌体墙,能显著提高其受压承载力。通过 4 组试件的破坏情况可以发现,提出的复合截面加固方法有效,加固面层有效参与试件整体截面受压,但加固后试件整体刚度有所下降,这主要是试件制作存在初始缺陷和接触界面粘结质量偏差等因素导致:制作时螺杆穿孔引起截面削弱效应;砖-AAC 板材界面局部区域灌填密实度不足,导致接触面形成离散空隙区,降低协同工作性能。对于 MU10+M2.5 强度试验组,双面各贴 50 mm 蒸压加气混凝土墙板加固砌体墙,相较于对应的单一砖墙,其受压峰值荷载提升了 71.3%;对于 MU10+M5.0 强度试验组,双面各贴 50 mm 蒸压加气混凝土墙板加固砌体墙,相较于对应的单一砖墙,其受压峰值荷载提升了 51.8%。由于 MU10+M2.5 组的原砖砌体墙砂浆强度较低,其自身分担的荷载比例就较小,而加固的 AAC 板承担的荷载比例则较大;而对于 MU10+M5.0 砖砌体结构本身具有较高承载力, AAC 板加固后,二者刚度接近,荷载分配更均衡。这一现象也符合“短板效应”理论:加固措施对原始

结构中薄弱环节(低强度砂浆)的改善效果更为突出。

由此可见,原砖墙砌筑砂浆强度越低,使用相同厚度的 AAC 墙板双面加固,其受压峰值荷载提升幅度越大。

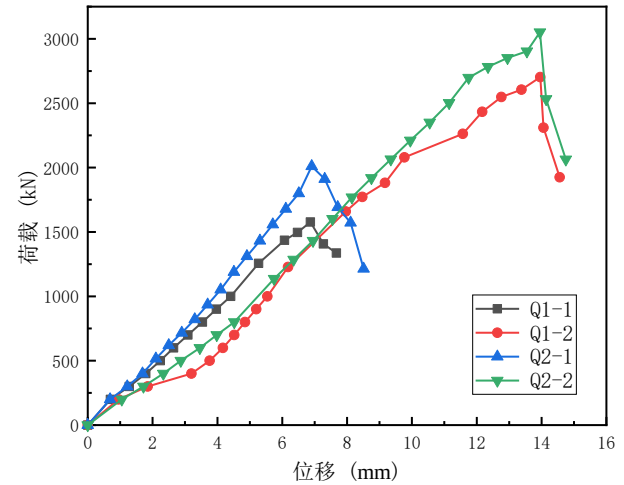


图 6 试件荷载-位移曲线总图

Fig.6 Overall load-displacement curve diagram of specimens

3 有限元数值模拟

3.1 有限元建模

采用 ABAQUS 有限元软件,对试验试件进行等比例建模,对加固前后的砖墙进行仿真模拟。由于研究目的是对蒸压加气混凝土墙板加固砖砌体墙的抗压性能进行宏观分析,不对墙体灰缝进行细致分析,故选用整体式建模建立墙体有限元模型,将灰缝砂浆力学性能等效纳入砌体本构参数中。

3.1.1 本构关系

1) 砖砌体本构。砖砌体的密度为 1800 kg/m^3 ,弹模为 1700 MPa ,泊松比为 0.15 。对于砌体的受压本构关系,分析后选用杨卫忠^[13]建议的模型,而拉应力-应变关系则根据混凝土本构关系的基础进行相应调整和提炼。砌体受压本构关系表达式为

$$\frac{\sigma}{f_c} = \frac{h_\epsilon}{1 + (h - 1) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{cm}} \right)^h / (h - 1) \epsilon_{cm}}$$

受拉本构关系表达式为

表 3 试件开裂与破坏荷载对比

Table 3 The comparison of cracking and failure loads of specimens

试件编号	开裂荷载 N_{cr}/kN	破坏荷载 N/kN	$(N_{cr}/N)/\%$	开裂荷载提高幅度/ $\%$	破坏荷载提高幅度/ $\%$
Q1-1	900.0	1577.6	57.0		
Q1-2	1659.4	2702.7	61.4	84.4	71.3
Q2-1	1189.5	2010.1	59.2		
Q2-2	1919.1	3051.2	62.9	61.3	51.8

$$\left\{\begin{array}{l} \frac{\sigma}{f_{tm}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_{tm}} \quad \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{tm}} \leq 1\right) \\ \frac{\sigma}{f_{tm}} = \frac{\frac{\epsilon}{\epsilon_{tm}}}{2\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{tm}} - 1\right)^{1.7} + \frac{\epsilon}{\epsilon_{tm}}} \quad \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{tm}} > 1\right) \end{array}\right.$$

2) 蒸压加气混凝土本构。蒸压加气混凝土的密度为 650 kg/m³,弹性模量为 2 000 MPa,泊松比为 0.225。蒸压加气混凝土本构关系采用由曾欢^[14]提出的本构关系,其全曲线方程形式为

$$y = \begin{cases} 1.07x - (1 - A)x^5 & (0 \leq x \leq 1) \\ \frac{x}{9.96(x - 1)^2 + x} & (1 \leq x \leq 1.31) \\ \frac{1}{1.60 + 0.1x} & (x > 1.31) \end{cases}$$

3)钢加载梁和钢筋本构采用理想弹塑性模型,牌号为 HPB300,弹性模量取 200 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度取 300 MPa。

3.1.2 单元选取及网格划分

在数值模拟中,砖墙、蒸压加气混凝土(AAC)墙板、钢加载梁及混凝土底座等结构构件,均采用 C3D8R 类型的三维线性积分单元进行建模。为准确反映实际工况,采用厚度为 5 mm 的砂浆层作为两材料之间的连接介质,并通过 SC8R 实体壳单元进行模拟。这种建模方法有效保证各材料单元之间力学传递的准确性,为后续的结构分析提供了可靠的数值基础。在 AAC 墙板体内部的配筋形式:内配 Φ8@100 mm 单层双向钢筋网片。所有钢筋采用桁架结构单元(T3D2)进行模拟。实体单元在模型中的具体参数如表 4 所示。采用塑性损伤模型(CDP 模型)对砖墙、AAC、钢筋及界面材料的力学性能进行数值模拟分析。该模型适用于脆性材料在单调荷载、循环荷载及动力荷载作用下的力学行为研究。模型参数对计算结果具有显著影响,依据相关规范标准^[15],重点对加气混凝土膨胀角和黏性系数等关键参数进行系统校准与对比验证。为确保模拟结果的准确性和可靠性,表 5 列出了经过优化确定的损伤塑性参数。

表 4 实体单元模型参数

Table 4 Model parameters of solid elements	
部件名称	尺寸(长×厚×高)
砖墙	1 200 mm×240 mm×1 800 mm
钢加载梁	1 400 mm×400 mm×300 mm
AAC 墙板	600 mm×50 mm×1 800 mm
混凝土底座	1 400 mm×440 mm×250 mm

表 5 材料的塑性损伤表					
Table 5 Plastic damage table of materials					
材料名称	膨胀角/(°)	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	K	黏性参数
混凝土	30	0.1	1.16	0.666 7	0.005
AAC	30	0.1	1.16	0.666 7	0.005
砖墙	30	0.1	1.16	0.666 7	0.003

3.1.3 荷载方式、边界条件及相互作用

模型加载方式与试验保持一致,在 step-1 中,将自重荷载添加在整个模型中,并在指定的加载点安置了垂直方向的位移加载,通过加载梁变为均布荷载加载在试件上。在初始化边界条件部分,将模型的底座约束,确保其 6 个方向的自由度均被锁定,表现为 U1、U2、U3 以及 UR1、UR2 和 UR3 均为 0。经过多次尝试,在保证计算精度和计算效率的前提下,模型网格划分采取每个单元的全局因子为 60 进行均分。

设计的加固构造是为了墙体和加固面层能形成一个整体,曹景禄^[16]和陈再现等^[17]也使用绑定约束砌体墙和加固面层,且模拟与试验结果吻合较好,为方便建模和保证数值模拟计算收敛,加固墙体模拟模型中 AAC 板与砖砌体通过绑定(tie)紧密结合,加载点与模型顶部实行耦合约束,使得受力区域的均匀性得到了保障。

3.2 有限元结果及对比分析

3.2.1 破坏形态及对比

使用软件中的 Max. Principal 法则来判断砖墙和 AAC 板的开裂情况,未加固试件模拟的破坏形态如图 7 所示。未加固的 Q1-1 和 Q2-1 砌体墙体顶部、窄面先达到极限应力,试件发生屈曲开裂,中间砖也发生凸出破坏,整体破坏形态与实际试验比较符合。

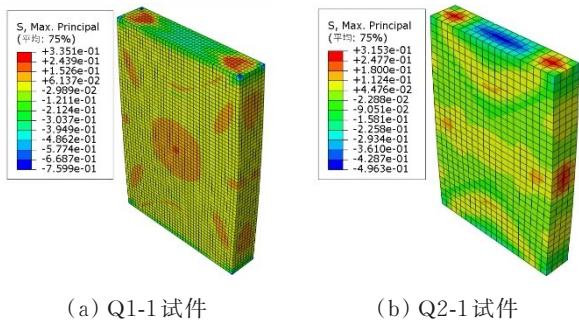


图 7 未加固试件模拟破坏形态图

Fig.7 Simulated failure mode diagram of unreinforced specimens

双面加固试件 Q1-2 和 Q2-2 模拟的破坏形态如图 8 所示。双面贴 AAC 墙板加固后的砌体墙顶部、窄面受到的最大应力减少,大部分墙体的应力均有

显著下降,但破坏仍集中在砌体墙的窄面,加固的 AAC 墙板四角处受应力最大,先于砌体墙开裂。对比未加固试件,加固试件的 AAC 板承受大部分的应力,且能起到较好约束砌体墙破坏的效果,使砌体墙内部的破坏减少。整体破坏形态与实际试验较为符合。

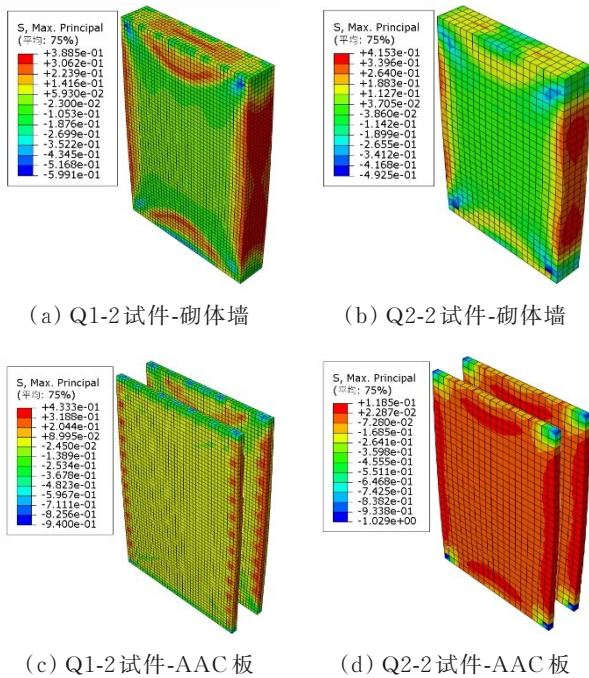


图8 双面加固试件模拟破坏形态图

Fig.8 Simulated failure mode diagram of double-sided reinforced specimens

对于模拟中观察钢筋的应力情况,采用 S11 应力云图来进行分析。由于蒸压加气混凝土板材在高温高压的制备环境下成型,试件制作时无法实现内部钢筋的应变片预埋,因此难以通过常规方法获取板材受压过程中钢筋应力的实时变化数据,可以结合有限元模拟来观察。根据图 9 所示钢筋的应力云图可知,双面加固所用的 AAC 板其中的钢筋在受到竖向压力荷载作用时大部分都达到了屈服强度,说明双面加固 AAC 板中钢筋的强度利用率较好。

3.2.2 荷载-位移曲线及对比

从模拟结果得到的荷载-位移曲线图 10(a)和 (b)可以看出,使用 AAC 墙板加固砖墙后,整体构件开裂荷载及峰值荷载明显增加。MU10+M2.5 组,双面各贴 50 mm 蒸压加气混凝土墙板加固砖砌体墙,较单一砖墙构件峰值抗压荷载提高了 67.5%;MU10+M5.0 组因其自身砖墙强度较高,加固效果稍逊,双面加固较未单一砖墙构件提高了 53.9%。将模拟结果与试验结果进行对比可以发现,模拟试件与试验试件的承载力变化趋势基本一

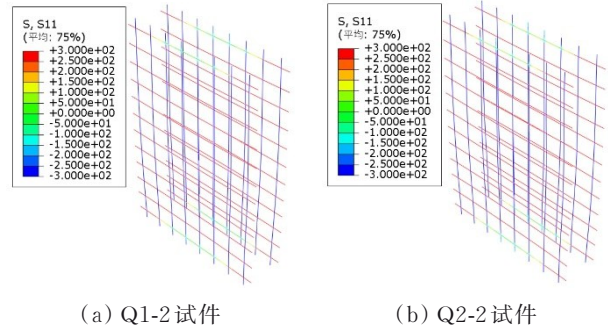
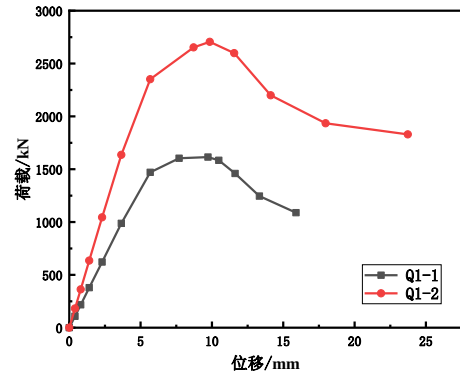


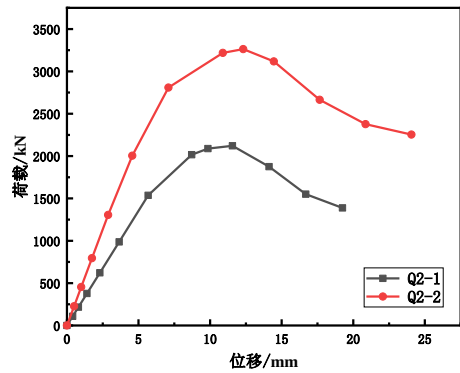
图9 钢筋应力云图

Fig.9 Stress contour diagram of rebar

致,且加固构件中的砖墙与未加固构件的砖墙破坏模式大致相同。



(a) 模拟 MU10+M2.5 组



(b) 模拟 MU10+M5.0 组

图10 有限元模拟试件荷载-位移曲线图

Fig.10 Finite element simulation load-displacement curve diagram of specimens

为方便直观地对比所有试验与模拟结果,绘制试验与有限元数值模拟分析得到的荷载-位移曲线对比图,如下图 11 所示,其中带“F”后缀的为对应试验试件编号有限元数值模拟结果。经过对比分析可以发现,提出的有限元模型能较好地预测预制蒸压加气混凝土墙板双面加固砖砌体墙的极限破坏荷载。但有限元模拟与试验曲线斜率尚有一定差异,这主要是试件制作存在初始缺陷和接触界面粘

结质量偏差等因素导致,包括:制作时螺杆穿孔引起截面削弱效应;砖-AAC 板材界面局部区域灌填密实度不足,导致接触面形成离散空隙区,降低协同工作性能;灰缝对应位置拉结件布置间距不均匀产生的应变集中;加载端约束装置与理想边界假定存在一定差异,实测边界摩擦耗能未被完整表征。数值模型中通过绑定模拟接触界面为硬接触理想单元,未能精确反映试件实际构造缺陷产生的刚度退化特性,但试验得到的极限荷载实测值与数值模拟结果差值小于 7.1%,两者接近。

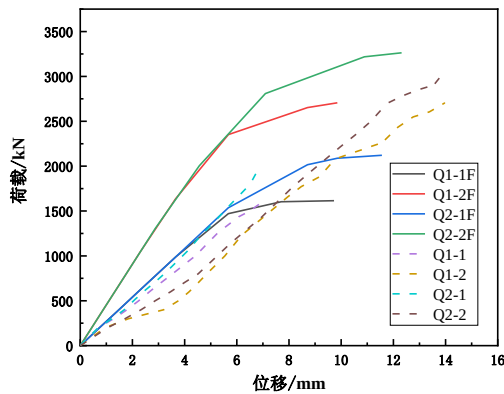


图 11 试件试验与有限元模拟荷载-位移曲线对比图

Fig.11 Comparison of load-displacement curves between specimen testing and finite element simulation

4 承载力对比分析及理论推导

4.1 承载力对比分析

各试件试验结果与模拟数据对比汇总见表 6。由表 6 可见,虽然有限元模拟结果与试验结果间存在一定误差,但由于试验受材料和施工质量影响较大,试验结果本身具有一定离散性,有限元模拟值与试验值的最大偏差为 7.1%,且模拟值均大于试验值,可认为结果偏差在可接受范围内,建立的有限元模型模拟值与试验值吻合度较好,说明模型在验证蒸压加气混凝土墙板加固砖墙受压性能具有可行性,并且具有较高的准确度。

4.2 理论分析及公式推导

4.2.1 相关理论分析

1) 规范采用的经验计算公式 现行规范依据的

表 6 试验结果与有限元模拟结果对比表

Table 6 Comparison table of experimental results and finite element simulation results

试件编号	试验峰值抗压 荷载/kN	模拟峰值抗压 荷载/kN	模拟值/试验值
Q1-1	1 577.6	1 614.98	1.024
Q1-2	2 702.7	2 705.55	1.001
Q2-1	2010.1	2 120.76	1.055
Q2-2	3 051.2	3 262.84	1.071

砌体抗压强度计算模型,全面考虑了所有关键要素,凭借其简洁、统一的结构和实用性,已经广受接纳,并在实际计算中得到了广泛应用。《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)^[18]以砌体抗压强度公式为基础,基于大量试验结果,建立形式统一的砌体抗压强度计算式,即

$$f_m = k_1 f_1^a (1 + 0.07 f_2) k_2$$

式中: f_1 、 f_2 分别为砌体和砂浆的抗压强度平均值; k_1 为与块体类别有关的参数; a 为与块体高度及砌体类别有关的参数; k_2 为当砂浆强度较低或较高时对砌体抗压强度的修正系数。

2) 钢筋混凝土加固砌体结构公式 根据《砌体结构加固设计规范》(GB 50702—2011)^[19]中采用钢筋混凝土面层加固轴心受压的砌体构件时,正截面受压承载力计算式为

$$N \leq \varphi_{com} (f_{m0} A_{m0} + \alpha_c f_c A_c + \alpha_s f_y' A_s')$$

式中: φ_{com} 为轴心受压构件的稳定系数,可根据加固后截面的高厚比及配筋率,按规范中表 5.2.1 采用; f_{m0} 为原构件砌体抗压强度设计值; A_{m0} 为原构件截面面积; α_c 为混凝土强度利用系数,对砖砌体取 0.8; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; A_c 为新增混凝土面层的截面面积; α_s 为钢筋强度利用系数,对砖砌体取 0.85; f_y' 为新增竖向钢筋抗压强度设计值; A_s' 为新增受压区竖向钢筋截面面积。

4.2.2 公式推导与计算

在满足构造要求情况下,外加蒸压加气混凝土面层加固后的结构可视为砌体与蒸压加气混凝土面层的组合砌体构件。因此可以利用《砌体结构加固设计规范》(GB 50702—2011)中钢筋混凝土面层加固轴心受压构件承载力计算公式推出蒸压加气混凝土加固后组合砌体正截面受压承载力计算公式,并引入新增蒸压加气混凝土材料的强度利用系数及新增钢筋的强度利用系数进行修正。

1) 未加固砌体墙抗压承载力 根据《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011),无筋砌体受压构件使用的承载力计算式为

$$N \leq \varphi f A$$

2) 双面蒸压加气混凝土墙板加固砌体墙抗压承载力 蒸压加气混凝土板加固方式与使用钢筋混凝土覆层类似,将加固后墙体的抗压承载力 N 划分为 3 个构成部分:原有的砌体结构对承载力的基础贡献 N_m ,轻质混凝土板中轻质混凝土本身的承载能力 N_c ,以及墙板内钢筋对承载力的贡献 N_s ,即

$$N = N_m + N_c + N_s$$

$$N = \varphi_{com} (f_{m0} A_{m0} + \alpha_c' f_c A_c + \alpha_s f_y' A_s')$$

式中: φ_{com} 为轴心受压构件的稳定系数,可根据加固后截面的高厚比及配筋率,按规范表 5.2.1 采用; f_{m0} 为原构件砌体抗压强度值; A_{m0} 为原构件截面面积; α'_c 为蒸压加气混凝土强度利用系数; f_c 为蒸压加气混凝土轴心抗压强度值; A_c 为新增蒸压加气混凝土面层的截面面积; α_s 为钢筋强度利用系数,对砖砌体暂取 0.85; f_y 为新增竖向钢筋抗压强度值; A'_s 为新增受压区竖向钢筋截面面积。

研究的蒸压加气混凝土墙板加固砖墙形成的叠合构件的受力特性与钢筋混凝土面层加固存在相似之处,可通过试验和模拟中的数据进行计算拟合,得到合适的蒸压加气混凝土强度利用系数 α'_c 。将试验和有限元模拟的具体数据,根据上述公式代入计算,所得结果见表 7,拟合计算得出最终的蒸压加气混凝土强度利用系数 $\bar{\alpha}'_c=0.81$ 。

表 7 蒸压加气混凝土强度利用系数计算结果表
Table 7 Calculation result table of strength utilization coefficient for autoclaved aerated concrete

试件编号	试验所得 α'_c	模拟所得 α'_c	$\bar{\alpha}'_c$
Q1-1	0.85	0.79	0.82
Q1-2			
Q2-1	0.71	0.88	0.80
Q2-2			

5 结论

1)采用提出的蒸压加气混凝土墙板双面加固砖砌体墙,可对砖墙形成有效约束,改善砖墙的受压承载性能,提高墙体的开裂荷载、峰值受压荷载、延性和整体性。

2)试验结果表明,相较于未加固单一砖墙,双面外加蒸压加气混凝土墙板加固砖墙的受压峰值荷载可大幅提高,且原砖墙砌筑砂浆强度越低,提高效果越好。

(3)有限元数值分析表明,MU10+M2.5组蒸压加气混凝土墙板双面加固砖墙,较单一砖墙极限受压峰值荷载提升了 67.5%,MU10+M5.0组则提高了 53.9%。与试验结果对比,偏差值在 7.1%以内,且模拟值均大于试验值,吻合度较好。

4)基于提出的蒸压加气混凝土墙板加固后组合砌体正截面受压承载力计算公式,结合试验和有限元模拟结果,新增蒸压加气混凝土材料的强度利用系数 $\bar{\alpha}'_c=0.81$ 。

参考文献

[1] CHAIPANICH A, CHINDAPRASIRT, PACHECO-TORGAL F, et al. Eco-efficient masonry bricks and

blocks: Design, properties and durability [M]. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2015: 215-230.

- [2] KUBISSA W, JASKULSKI R, REITERMAN P. Ecological concrete based on blast-furnace cement with incorporated coarse recycled concrete aggregate and fly ash addition [J]. Journal of Renewable Materials, 2017, 5(1): 53-61.
- [3] CABRILLAC R, FIORIO B, BEAUCOUR A L, et al. Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(5): 286-295.
- [4] KORONTHALYOVA O. Moisture storage capacity and microstructure of ceramic brick and autoclaved aerated concrete [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): 879-885.
- [5] HUSSIN M W, MUTHUSAMY K, ZAKARIA F. Effect of mixing constituent toward engineering properties of POFA cement-based aerated concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(4): 287-295.
- [6] RAFIZA A, CHAN H, THONGTHA A, et al. An innovative autoclaved aerated concrete (AAC) with recycled AAC powder for low carbon construction [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 268(1): 012050.
- [7] GARCIA-RAMONDA L, PELÀ L, ROCA P, et al. Experimental cyclic behaviour of shear masonry walls reinforced with single and double layered Steel Reinforced Grout [J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126053.
- [8] PARK S H, DINH N H, KIM S H, et al. Seismic retrofit of unreinforced masonry walls using precast panels of fiber-reinforced cementitious composite [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 53: 104548.
- [9] XU W Z, ZHANG T Y, CHEN X, et al. Experimental and numerical investigation on the seismic performance of masonry walls reinforced by PC panels [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 58: 105049.
- [10] 周长东, 张晨, 景杰婧. ECC 嵌缝加固砖砌体的剪切性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(11): 128-135.
- ZHOU C D, ZHANG C, JING J J. Experimental study on shear performance of brick masonry strengthened with caulking ECC [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(11): 128-135. (in Chinese)
- [11] SAH T P, LACEY A W, HAO H, et al. Prefabricated concrete sandwich and other lightweight wall panels for sustainable building construction: State-of-the-art review [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 89: 109391.
- [12] 砌体基本力学性能试验方法标准: GB/T 50129—2011 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.

Standard for test method of basic mechanics properties of masonry: GB/T 50129—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)

[13] 杨卫忠. 砌体受压本构关系模型[J]. 建筑结构, 2008, 38(10): 80-82.

YANG W Z. Constitutive relationship model for masonry materials in compression [J]. Building Structure, 2008, 38(10): 80-82. (in Chinese)

[14] 曾欢. 蒸压粉煤灰-砂加气混凝土应力-应变本构关系及其砌体力学性能试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.

ZENG H. Autoclaved fly ash-sand aerated concrete stress-strain full curve and the mechanical properties of the block masonry experiment research [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)

[15] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010

Specifcations for Design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

[16] 曹景禄. 钢筋-砂浆面层条带法加固砌体墙抗震性能研究 [D]. 河北 唐山: 华北理工大学, 2023.

CAO J L. Study on seismic performance of masonry wall reinforced by strip method of reinforced mortar surface layer [D]. Tangshan, Hebei: North China University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)

[17] 陈再现, 杨续波. 组合材料加固砖砌体的有限元模拟方法[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 96-104.

CHEN Z X, YANG X B. Finite element simulation method for brick masonry reinforced with composite materials [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 96-104. (in Chinese)

[18] 砌体结构设计规范: GB 50003—2011 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.

Code for design of masonry structures: GB 50003—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)

[19] 砌体结构加固设计规范: GB 50702—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.

Code for design of strengthening masonry structures: GB 50702—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)

(编辑 XXX)