

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.060



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 聚丙烯网-复合水泥砂浆加固村镇建筑 开洞砌体墙的抗震性能

田鹏刚<sup>1,2</sup>, 曹晨阳<sup>1</sup>, 卢俊龙<sup>1</sup>, 边兆伟<sup>3</sup>, 王振山<sup>1</sup>, 员作义<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院, 西安 710048; 2. 陕西建工控股集团未来城市创新科技有限公司, 西安 710115; 3. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 西安 710082)

**摘要:** 村镇建筑中砌体结构缺少必要的抗震措施, 抗震能力偏低, 采用聚丙烯网-复合水泥砂浆对墙体进行加固能提高建筑的抗震能力。为研究开洞砌体墙加固后的抗震性能, 设计制作了 3 榀开洞墙体模型试件进行拟静力试验, 得到模型试件的滞回曲线及骨架曲线。采用 ABAQUS 有限元软件建立数值模型进行计算分析, 将计算结果与试验结果进行对比, 二者基本一致。未加固试件加载后洞口角部首先开裂, 并逐步延伸至墙体端部, 形成“X”或“/”形贯通裂缝, 呈剪切破坏。采用聚丙烯网-复合水泥砂浆面层加固能有效延缓墙体破坏, 单侧及双侧面层加固墙体较未加固墙体的极限承载力分别提高了 68.75%、107.05%, 初始刚度分别提高了 11.68%、46.55%, 延性性能分别提高了 6.34%、14.63%。对村镇建筑开洞砌体墙采用单侧及双侧面层加固后, 其抗震能力均有提高, 洞口区域开裂后易形成贯通裂缝, 其破坏模式与未开洞墙体不同。

**关键词:** 村镇建筑; 砌体墙加固; 抗震性能; 拟静力试验; 有限元分析

**中图分类号:** TU362 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)01-0153-11

## Seismic performance of open masonry walls of village and town buildings reinforced with polypropylene mesh-composite cement mortar

TIAN Penggang<sup>1,2</sup>, CAO Chenyang<sup>1</sup>, LU Junlong<sup>1</sup>, BIAN Zhaowei<sup>3</sup>,  
WANG Zhenshan<sup>1</sup>, YUAN Zuoyi<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P. R. China;  
2. Shaanxi Construction Engineering Holding Group Science and Technology Innovation of Future City Co., LTD,  
Xi'an 710115, P. R. China; 3. Shaanxi Architecture Science Research Institute Co. Ltd, Xi'an 710082, P. R. China)

**Abstract:** Surveys of village buildings frequently reveal a paucity of essential seismic measures, resulting in a deficiency in seismic capacity. In order to enhance the seismic capacity of these buildings, it was necessary to reinforce the walls using polypropylene mesh and composite cement mortar. In order to investigate the seismic performance of reinforced masonry walls with openings, three wall models with openings were designed and

**收稿日期:** 2024-03-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(51778527); 西安市英才计划领军人才项目(XAYC200024)

**作者简介:** 田鹏刚(1978-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事结构性能评估与加固研究, E-mail: tpg97537@163.com.

**Received:** 2024-03-28

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51778527); Xi'an Talent Program Leading Talent Project (No. XAYC200024)

**Author brief:** TIAN Penggang(1978-), PhD, senior engineer, main research interests: structural performance evaluation and reinforcement, E-mail: tpg97537@163.com.

subjected to quasi-static tests. The hysteresis and skeleton curves of the model specimens were obtained from these tests. Numerical models were then established using ABAQUS finite element software for the purpose of computational analysis. A comparison was then made between the results obtained from this analysis and the experimental findings, which revealed a high degree of consistency. The unreinforced specimens exhibited initial cracking at the corners of the openings under load, which gradually extended to the wall ends, forming “X” or “/” shaped continuous cracks indicative of shear failure. Reinforcement with polypropylene mesh and composite cement mortar effectively delayed and mitigated wall damage. The ultimate bearing capacity of walls reinforced on one side and both sides increased by 68.75% and 107.05%, respectively, compared to unreinforced walls. Additionally, the initial stiffness of the walls improved by 11.68% and 46.55%, respectively, while the ductility performance increased by 6.34% and 14.63%. The analysis results indicate that both single-side and double-side reinforcement of masonry walls with openings significantly enhance their seismic capacity. The openings tend to form continuous cracks after initial cracking, and the failure mode differs from that of walls without openings.

**Keywords:** village and town buildings; masonry wall reinforcement; seismic performance; quasi-static test; finite element analysis

砌体结构在村镇建筑中应用广泛,受技术与经济条件的制约,多数结构缺少必要的抗震构造措施,抗震能力偏低。随着新农村建设的推进,适度提高村镇建筑的抗震能力已成为迫切需求。增设扶壁柱或构造柱、外粘钢板或纤维复合板等能提高砌体结构的抗震能力,而受经济与技术水平的制约,此类措施难以广泛应用于村镇建筑抗震性能的提升工程中<sup>[1-2]</sup>。

为实现适度提高村镇建筑抗震能力的目标,笔者提出聚丙烯网格-复合水泥砂浆面层加固方法。研究发现<sup>[3-6]</sup>,在聚合物纤维网面层加固砌体后的剥离破坏过程中,纤维的“桥接”作用能延缓结构破坏;同时,纤维网作为受拉筋材分布于复合水泥砂浆中,能提高墙体的抗剪及变形能力<sup>[7-9]</sup>。因聚丙烯网格与砂浆具有良好的黏结性能,二者在砌体墙面形成加固层,与墙体共同受力,提高了墙体的抗震能力。在砌体墙加固后抗震性能的研究中,Sadek等<sup>[10]</sup>、黄艺等<sup>[11]</sup>通过数值模拟分析了水平往复荷载作用下结构的破坏过程。文献<sup>[12-13]</sup>将砂浆层定义为零厚度的接触单元,采用库仑破坏准则,分析了墙体裂缝的发展特征。文献<sup>[14]</sup>采用有限元计算得到砌体墙的荷载-位移滞回曲线,对比模型的应力-应变云图、滞回特性、墙体耗能、骨架曲线和刚度退化曲线,研究了砌体墙加固后的抗震能力。

虽然采用聚丙烯网格砂浆面层加固能提高砌体墙的抗震性能,但当墙体开洞后,洞口周边应力集中明显,破坏过程复杂<sup>[15-18]</sup>。为深入研究聚丙烯网格-复合水泥砂浆加固村镇建筑开洞砌体墙的抗震能力,通过墙体缩尺模型的拟静力试验及数值模拟,分析加固前后墙体的破坏特征及抗震能力,研

究聚丙烯网-复合水泥砂浆对开洞墙体抗震性能的提升作用,为该方法应用于砌体结构加固工程提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

试件原型结构为陕西省某农村自建房一个开间的纵墙段,块体为普通烧结砖 MU7.5,砂浆为 M0.5,采用十字砌筑,采用聚丙烯网-复合水泥砂浆加固时,面层抹灰采用 20 mm 厚水泥砂浆。墙体试件采用 1/3 比例缩尺,其尺寸为 2 200 mm×1 170 mm×240 mm,见图 1,灰缝厚度均为 10 mm,加载梁、底座梁及洞口过梁混凝土为 C30,顶梁纵筋直径为 20 mm,底梁纵筋直径为 22 mm,箍筋直径均为 8 mm,见图 2。

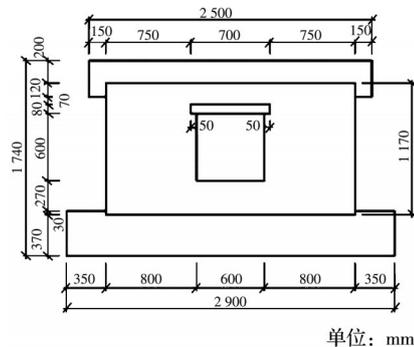


图 1 试件尺寸图

Fig. 1 Specimen size drawing

试件制作时先砌筑墙体,而后采用聚丙烯网-复合水泥砂浆面层分别对墙体进行单侧、双侧增强,共制作 3 个试件,分别为未加固墙体(NWV1)、单面加固墙体(SWV1)和双面加固墙体(DWV1)。试件

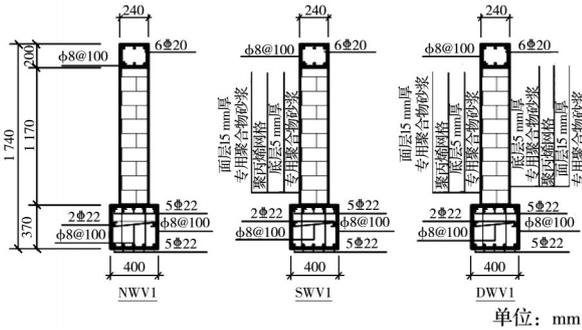


图 2 试件设计图

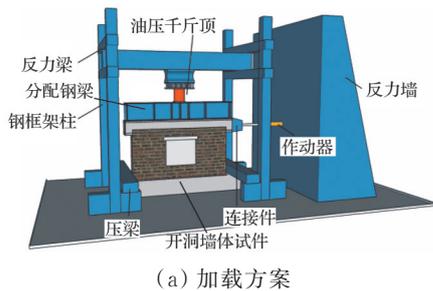
Fig. 2 Test piece design drawing

制作时,首先去除墙面杂物,然后以清水冲洗,进行第 1 层砂浆抹面,厚度为 5 mm,完成后待 2 h,铺设聚丙烯网,采用长度不小于 50 mm 的钢钉按梅花状钉入砖墙,深度不小于 20 mm,间距不大于 300 mm,将聚丙烯网与砂浆面层固定,而后涂抹第 2 层抹面砂浆,厚度为 15 mm,使聚丙烯网无外漏,最后以砂浆抹面,使墙面平整。

### 1.2 加载方案、测点布置及测量内容

采用电液伺服加载系统进行加载,见图 3。加载前调整试件保持竖向及水平对中,根据建筑平面布置及承重方案,计算得到墙体竖向荷载为 144.00 kN,相应的竖向应力为 0.24 MPa,通过竖向千斤顶一次性缓慢施加于试件顶部的分配梁。水平加载采用位移控制,每级位移增量为 1 mm,开裂前每级荷载循环加载 1 次,开裂后每级荷载循环 2 次,直至水平荷载降至峰值荷载的 85% 时终止加载。

加载前在墙体南北两个立面分别沿对角线设置一个量程为 50 mm 的位移计,测量墙体的斜向剪



(a) 加载方案



(b) 现场加载

图 3 试验加载  
Fig.3 Experiment loading

切变形;在试件顶梁处安装一个水平向的位移计,用以校核水平加载器的位移。

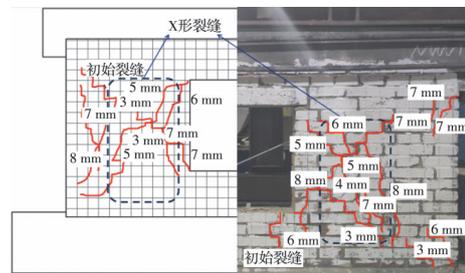
水平往复荷载分级施加,每级荷载施加完成后,进行裂缝及相应加载位移值标注,每加载一级,观察并记录一次墙体的开裂状况。试验结束后,拍照并记录裂缝分布特征。

## 2 试验现象及破坏形态

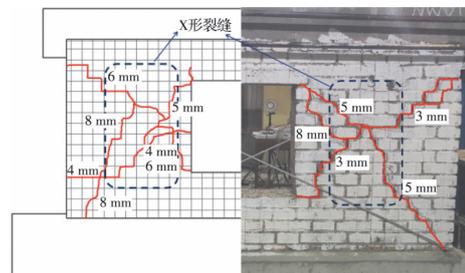
试件在加载过程中经历未开裂、裂缝扩展以及裂缝贯通 3 个阶段。

### 2.1 未加固墙体试件 NWV1

在加载初期,墙体无明显破坏现象,当水平位移加载至 3 mm 时,墙体出现轻微碎裂声,伴随有少许砂浆掉落。南立面自窗洞右下角沿灰缝向右上角形成阶梯形裂缝(见图 4),北立面阶梯形裂缝则自窗洞左下角延伸至左上角。当水平位移加载至 5 mm 时,墙体剪切变形量为 4.3 mm,墙体裂缝逐渐增多,洞口角部裂缝逐步延伸至墙体顶部及底部,并与新产生的裂缝交叉形成“X”状开裂区。当加载至 8 mm 时,墙体剪切变形量为 11.2 mm,在墙体北面右侧产生较多支线裂缝,与前期裂缝交叉并延伸贯通,墙体破坏严重,失去承载能力,呈现对角剪切破坏。



(a) 北立面



(b) 南立面

图 4 试件 NWV1 裂缝图

Fig.4 Crack diagram of NWV1 specimen

### 2.2 单侧面层加固墙体试件 SWV1

当水平位移加载至 5 mm 时,墙体北立面洞口左上角及下部出现裂缝,南立面灰浆层开裂(图 5)。加载至 9 mm 时,墙体剪切变形量为 1.75 mm,北立面裂缝继续发展,原有裂缝开裂加重,墙体持续出

现“咔嚓”的破裂声。墙体南立面沿灰缝呈阶梯形开裂,少量砖发生破裂,同时裂缝宽度逐渐增大。加载至 11 mm 时,墙体剪切变形量为 5.85 mm,北立面出现多条贯通裂缝,洞口处少量灰浆脱落,聚丙烯网-水泥砂浆面层与墙体发生脱粘而退出工作。墙体南立面出现多条新裂缝,与前期裂缝交叉,呈“X”形交叉状。

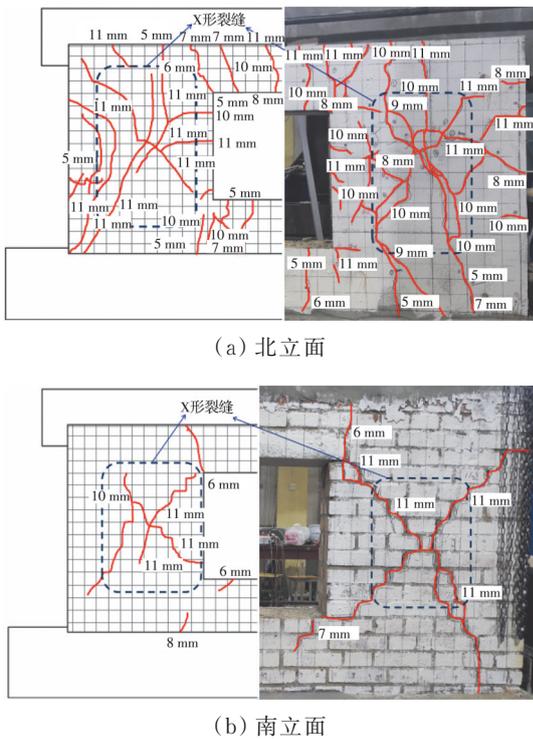


图 5 试件 SWV1 裂缝图

Fig. 5 Crack diagram of SWV1 specimen

### 2.3 双侧面层加固墙体试件 DWV1

加载初期墙体没有明显变化,当加载至 5 mm 时,剪切变形不明显,北立面洞口右侧中部面层出现水平裂缝(见图 6),左侧墙体过梁下部出现水平裂缝,且在洞口右上角出现 45°斜裂缝,南立面洞口过梁(洞口右上角)出现 45°斜裂缝。当加载至 8 mm 时,墙体剪切变形量为 6.7 mm,北立面洞口处裂缝加深,南立面左侧中部出现阶梯形裂缝。当加载至 11 mm 时,墙体剪切变形量为 10.8 mm,伴有材料掉落及墙体崩裂声,南侧面层发生脱落,墙段出现裂缝,与前期裂缝形成“/ \”形并延伸至墙角处。继续加载时,墙体两侧面层持续剥落,内部砖墙发生剪切破坏。

### 2.4 破坏模式对比

试验现象表明,随着水平加载位移的增大,3 个试件的破坏过程均为从窗洞四角处开始形成斜向裂缝,而后裂缝延伸后贯通,导致试件破坏。

单侧面层加固试件在加载过程中面层参与墙

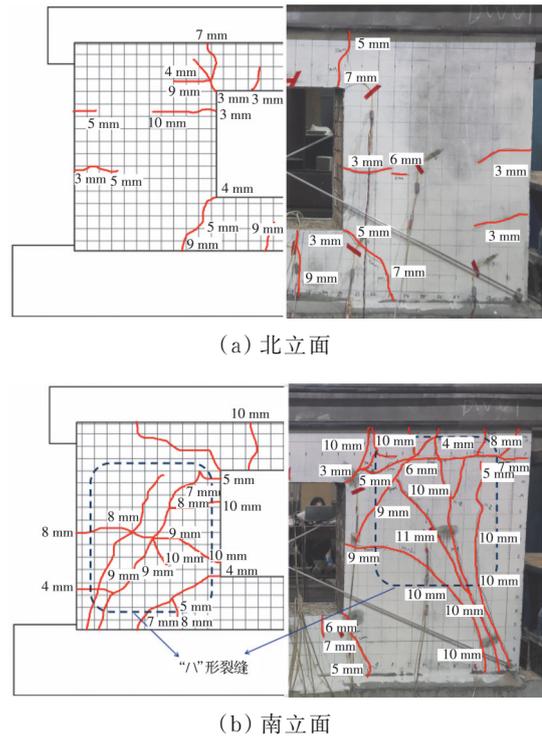


图 6 试件 DWV1 裂缝图

Fig. 6 Crack diagram of DWV1 specimen

体受力,洞口角部产生斜向裂缝,周边产生竖向、横向裂缝。继续加载后,面层逐渐从顶部开始脱离而逐步退出工作,墙体发生剪切破坏。双侧面层加固墙体在加载过程中首先在洞口角部面层出现斜向裂缝,随着水平位移的加载,北立面面层首先脱落,因南立面面层尚未脱落,试件承载力并未立刻发生大幅下降。继续加载后,南立面面层突然崩落,试件承载力急剧下降,墙体发生剪切破坏。

未加固墙体试件与单侧面层加固试件在最终破坏时均形成“X”形贯通裂缝。双侧面层加固时,砌体受到面层约束较强,形成“/ \”形贯通裂缝,在加载后期,加固后试件的面层均发生脱落。

## 3 试验结果分析

### 3.1 滞回曲线

整理试验结果,绘制荷载-位移曲线(见图 7),其中作动器推为正向、拉为负向,位移为每级加载位移的最大值,荷载为每级加载时的荷载最大值。

加载初期,3 个试件的滞回环均呈梭形,滞回环的面积均较小,墙体的耗能能力较低,曲线斜率变化较小,刚度基本不变。

加载至结构开裂时,加固后试件的荷载-位移滞回曲线略捏缩,试件裂缝开始增多,滞回环面积开始增大,墙体耗能开始增强,刚度开始退化;当达到峰值荷载时,滞回环的斜率变小,刚度退化加快,最

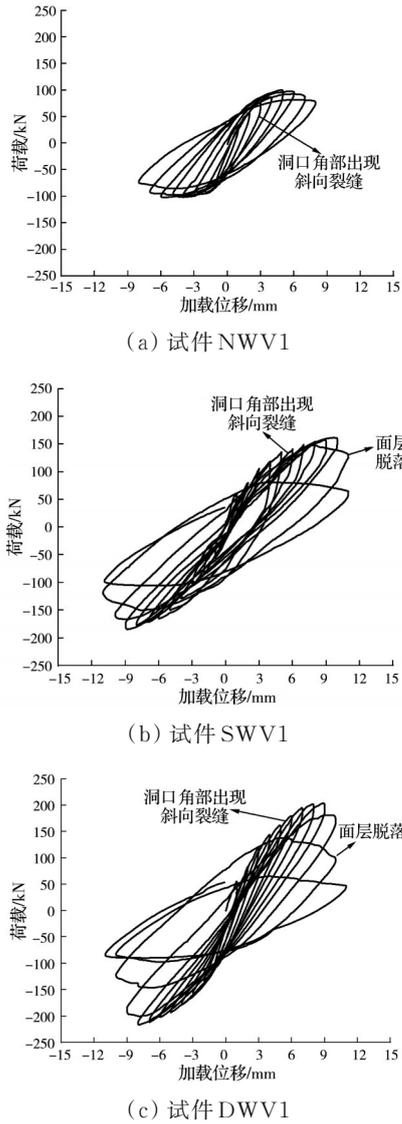


图 7 各试件荷载-位移滞回曲线图

Fig. 7 Load-displacement hysteresis curves of each specimen

大荷载值均小于上一级荷载值,滞回环面积减小,耗能减小。

加载结束时,未加固、单侧面层加固、双侧面层加固试件的最大水平位移分别为 8、11、11 mm,峰值荷载分别为 100.58、159.60、203.25 kN。其中采用双侧面层加固后墙体的峰值荷载最大,单侧面层加固次之,表明加固后墙体承载力提高。对比 3 个试件的滞回曲线,双侧面层加固试件的滞回环面积大于单侧面层加固,可见双侧面层加固的耗能性能优于单侧面加固。

同时可见,单侧面层加固墙体达到峰值荷载后,由于面层开始与墙体脱粘,墙体承载力开始下降,在后续加载过程中,面层大范围脱落,完全退出工作,墙体承载力急剧下降。双侧面层加固墙体达到峰值荷载后,其中一侧面层脱落退出受力,承载

力下降幅度不大,当另一侧面层完全退出受力时,墙体承载力急剧下降。

### 3.2 骨架曲线

由 3 个试件的荷载-位移骨架曲线(图 8)可见,其形状及趋势基本一致。在试件开裂前,各墙体试件荷载-位移骨架曲线的斜率基本保持不变,在此阶段内,试件刚度未发生明显退化。

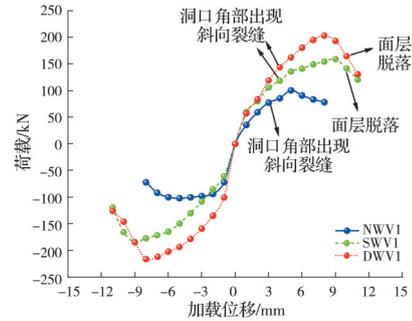


图 8 荷载-位移骨架曲线对比图

Fig. 8 Comparison diagram of load-displacement skeleton curves

在墙体开裂后,随着水平加载位移的增大,骨架曲线的斜率开始缓慢减小,试件刚度开始退化。当加载至峰值荷载后,荷载值开始下降,斜率快速减小,试件刚度退化明显且退化程度大,试件损伤严重,发生破坏。

对比 3 个试件的骨架曲线可见,其发展规律相近,在相同荷载下,双侧面层加固的墙体试件刚度较大,正负向承载力均大于单侧面层加固墙体试件,且二者均大于未加固墙体试件。

### 3.3 承载能力分析

由各试件特征荷载的试验结果(图 9)可以发现,与未加固试件 NWV1 相比,单侧面层加固试件 SWV1 的开裂荷载平均提高了 28.83%,双侧面层加固试件 DWV1 开裂荷载平均提高了 58.30%。相应的峰值荷载分别提高了 69.75% 和 107.05%,可见墙体加固后的开裂荷载和峰值荷载提高明显。

### 3.4 延性分析

采用位移延性系数进行延性分析,计算公式为

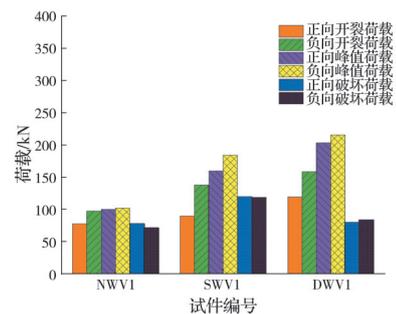


图 9 试件特征荷载值

Fig. 9 Characteristic load values of the test piece

$$\mu = \frac{|\Delta_{+u}| + |\Delta_{-u}|}{|\Delta_{+y}| + |\Delta_{-y}|} \quad (1)$$

式中： $\Delta_{\pm u}$ 和 $\Delta_{\pm y}$ 分别为正负向极限位移和正负向屈服位移。

采用最远点法,将曲线上距离原点与峰值点连线最远的点定义为屈服点<sup>[19]</sup>,得到各试件的特征位移,见图 10。计算得到未加固试件、单侧面层加固试件和双侧面层加固试件的延性系数分别为 2.05、2.37、2.40,单侧面层加固和双侧面层加固试件的延性系数较未加固试件分别提高了 16%、17%。采用面层加固墙体后时,屈服位移、极限位移、位移延性系数均增大,但双侧面层加固与单侧面层加固后的延性较为接近,可以看出,两种加固方案在加载后期面层均完全脱落并退出工作,仅有砌体墙参与受力。

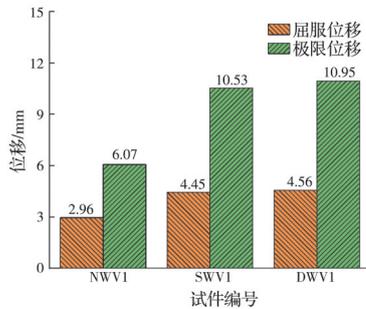


图 10 各试件特征位移

Fig. 10 Characteristic displacements of each specimen

### 3.5 刚度退化及耗能分析

采用割线刚度进行刚度退化分析<sup>[20]</sup>,由式(2)计算各试件刚度,得到试件刚度退化曲线,见图 11。

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (2)$$

式中： $K_i$ 为第*i*级加载时割线刚度； $P_i$ 为第*i*级加载时峰值荷载； $\Delta_i$ 为第*i*级加载时峰值荷载所对应的位移。

3个试件的刚度退化规律基本一致,加载初期刚度退化较快,曲线退化趋势较明显。试件初始刚度分别为 53.79、60.07、78.88 kN/mm,试件 SWV1

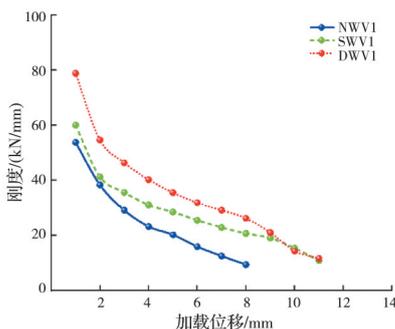


图 11 刚度退化曲线

Fig. 11 Stiffness degradation curves

与试件 DWV1 的初始刚度相较试件 NWV1 分别提高 11.68%、46.55%,双侧面层加固后对墙体刚度的提升作用明显。

计算各试件开裂、峰值荷载及破坏点的等效黏滞阻尼系数 $h_e$ ,见图 12。对比各试件加载过程的等效黏滞阻尼系数可见,各特征点对应的等效黏滞阻尼系数均随荷载的增大而减小,即其耗能能力亦随位移的增大而减小。其中单侧加固时峰值点处发生突变,原因在于面层与墙体较早发生脱落,试件 DWV1 耗能能力较试件 SWV1、NWV1 的大。

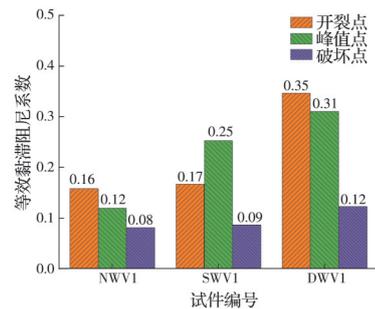
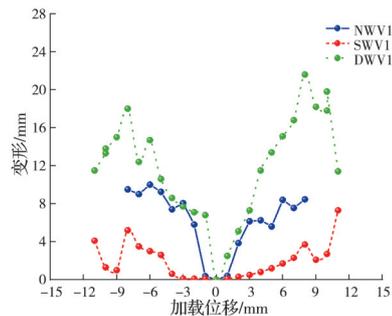


图 12 特征点的等效黏滞阻尼系数

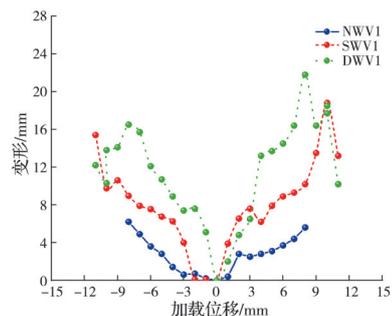
Fig. 12 Equivalent viscous damping coefficients for feature points

### 3.6 变形分析

在竖向荷载和水平荷载作用下,墙体试件沿斜向发生剪切破坏,将墙体两侧斜向位移测试结果与每级加载位移进行对比,得到加载位移与墙体变形的关系,见图 13。



(a) 北立面



(b) 南立面

图 13 墙体试件加载位移-变形曲线

Fig. 13 Load-displacement curves for wall specimens

由图 13 可见,加载初期,试件开裂以竖向裂缝为主,在墙体北立面,试件 SWV1 变形小于试件 NWV1,小于试件 DWV1,原因在于试件 DWV1 南北两面均有加固面层,刚度分布情况与试件 NWV1 相似,两者变形特征基本一致,试件 SWV1 刚度分布不对称,墙体变形小。在墙体南立面,试件 DWV1 变形大于试件 SWV1、大于试件 NWV1,原因在于试件 DWV1 加固时存在加固面层,而试件 SWV1 加固时由于北面加固面层作用,北面变形小,南面变形较大,所以加固后的墙体试件的斜向变形大于试件 NWV1。

### 4 有限元分析

#### 4.1 计算模型及加载制度

采用有限元软件 ABAQUS 建立数值模型(见图 14)。灰缝厚度为 10 mm,采用分离式建模方法,其中墙体和梁均采用六面体实体单元,加载梁及过梁钢筋骨架与聚丙烯网格采用桁架单元<sup>[21]</sup>。模型试件底部采用固定约束,即约束模型底部全部 6 个自由度。荷载设置分两步进行,首先,竖向荷载加载与拟静力试验保持一致,在模型顶部布置竖向均布荷载 0.24 MPa;其次,在顶梁右侧面几何中心施加水平往复荷载,按试验加载制度进行加载。

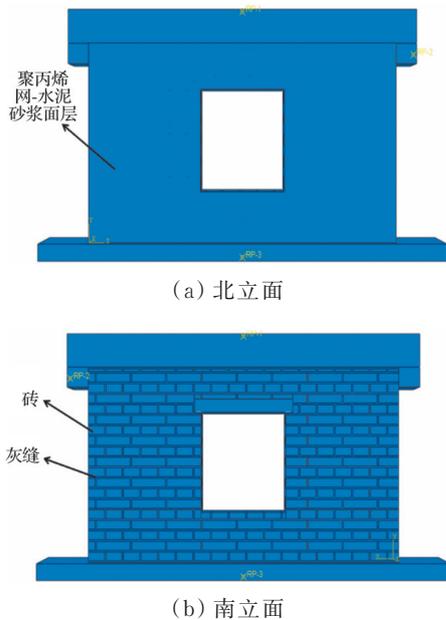


图 14 有限元模型  
Fig. 14 Finite element model

#### 4.2 本构模型与计算参数

以多向塑性硬化和各向同性弹性模型来反映材料在断裂时的不可逆拉压损伤行为,采用式(3)所示砌体受压本构模型,其应力-应变关系为<sup>[22]</sup>

$$\frac{\sigma}{f_m} = \frac{\eta}{1 + (\eta - 1)(\epsilon/\epsilon_m)^{\eta/(\eta-1)}} \frac{\epsilon}{\epsilon_m} \quad (3)$$

式中: $\eta$ 为弹性割线模量与初始弹性模量比值,取 1.633; $f_m$ 为砌体抗压强度平均值; $\sigma$ 、 $\epsilon$ 为砌体应力、应变; $\epsilon_m$ 为砌体受压平均值所对应应变。

受拉本构关系采用式(4)<sup>[22]</sup>。

$$\begin{cases} \frac{\sigma}{f_m} = \epsilon/\epsilon_t, \epsilon/\epsilon_t \leq 1 \\ \frac{\sigma}{f_m} = \frac{\epsilon/\epsilon_t}{2(\epsilon/\epsilon_t - 1)^{1.7} + \epsilon/\epsilon_t}, \epsilon/\epsilon_t > 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f_m$ 为砌体抗拉强度平均值; $\sigma$ 、 $\epsilon$ 为砌体应力、应变; $\epsilon_m$ 为砌体受压平均值所对应应变。

模型材料采用混凝土塑性损伤模型,模型参数膨胀角取 34°、偏心率取 0.1、K 取 0.666 7、黏性参数取 0.005。

墙体弹性模量由式(5)计算<sup>[22]</sup>,其中砌体试块的抗压强度平均值为 32.85 MPa。

$$E = 340f_m\sqrt{f_m} \quad (5)$$

聚丙烯网拉伸试验结果见图 15,抗拉强度取 465.34 MPa,平均弹性模量为 10.50 GPa,平均伸长率为 49.53%。砂浆密度取 1423 kg/m<sup>3</sup>,依据砂浆试块的代表性试验组(3 个试块,编号试块 a~试块 c)的试验结果(见图 16),弹性模量取 1.32 GPa,泊松比取 0.15。

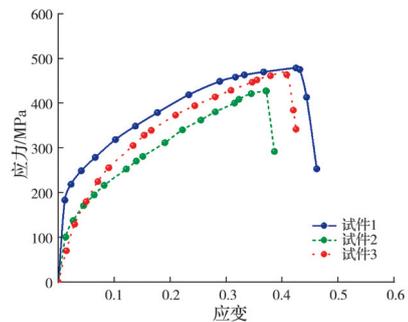


图 15 聚丙烯网应力-应变曲线  
Fig. 15 Stress-strain curves of polypropylene mesh

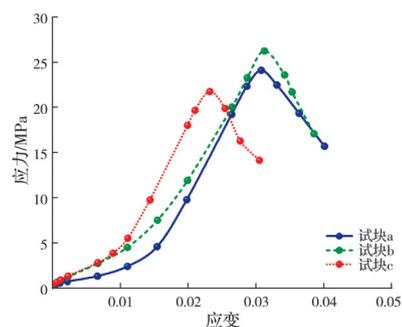


图 16 水泥砂浆应力-应变曲线  
Fig. 16 Stress-strain curves of cement mortar

### 4.3 损伤分析

由墙体损伤云图(图 17~图 19)可见,未加固试件在加载过程中首先在洞口角处及周围出现损伤,随着水平荷载的增加,逐渐向洞口两侧墙体延伸,并在墙体中间出现最大损伤。

采用单侧面层加固后,模型首先在洞口角部处出现损伤,其余区域未出现损伤。加固墙体损伤多分布于洞口两侧墙体边缘区,集中于洞口角部、墙体中部及墙体角部。双侧面层加固后,首先在洞口

角部和墙体角部出现损伤,破坏时的损伤集中于墙体中部和洞口角部,产生较大应变,其中面层损伤部位与墙体损伤部位较为一致,呈现“X”形或“/ \”形。与 3 个墙体模型试件的拟静力试验结果对比,数值计算所得损伤部位与墙体裂缝分布区、发展过程与试验结果一致,模型的损伤区域逐步转移至洞口两侧的墙体,使洞口区域的损伤减小,且在相同水平荷载作用下,对应的应力及应变值更大,模型的塑性变形能力提高。但采用双侧面层加固后,与

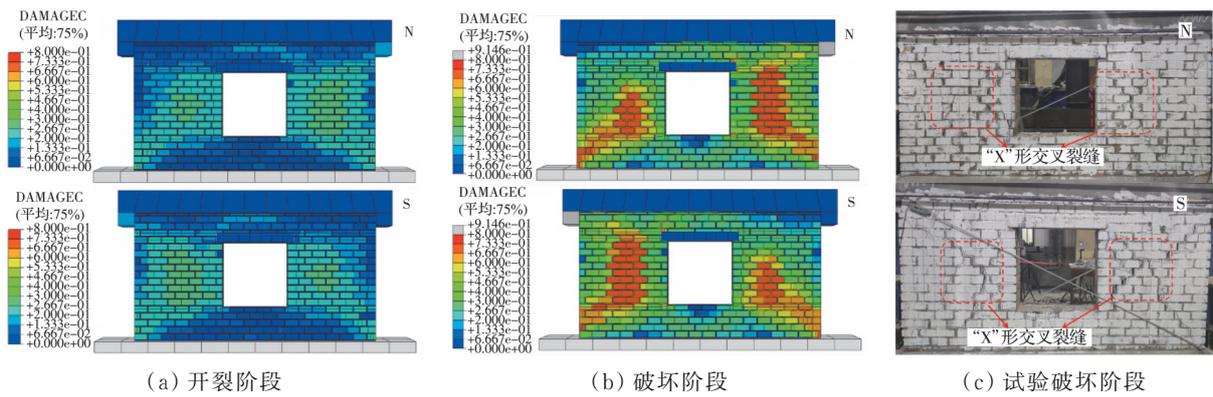


图 17 试件 NWV1

Fig. 17 NWV1 test piece

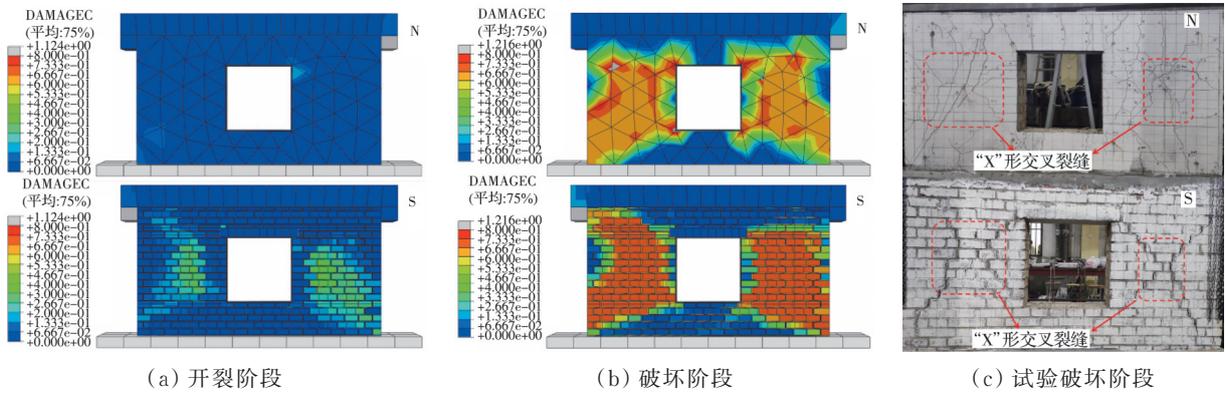


图 18 试件 SWV1

Fig. 18 SWV1 test piece

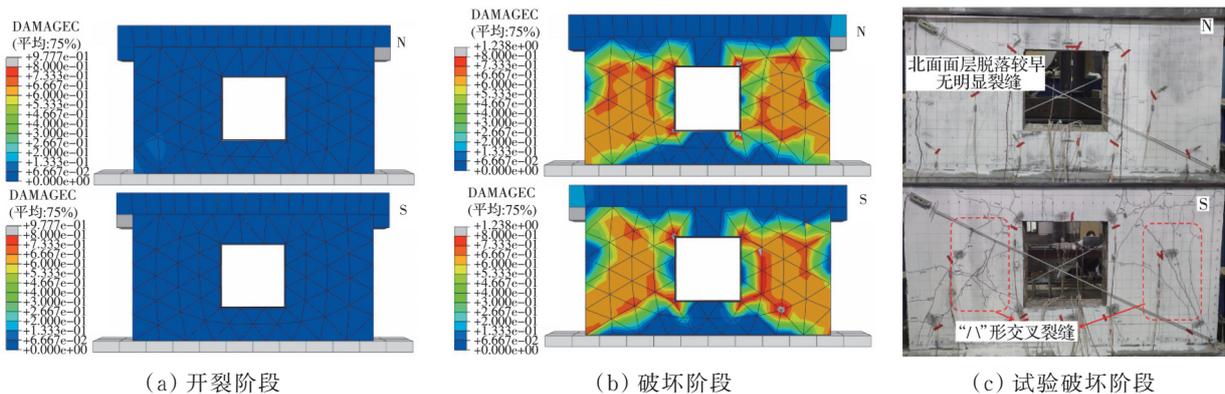


图 19 试件 DWV1

Fig. 19 DWV1 test piece

试验结果相比,面层的裂缝分布损伤区域变小。原因在于,试验中水平荷载增大后,面层与砖墙发生剥离,退出受力,但在数值模拟中面层与墙体保持单元连续,不发生脱离,所得模型的破坏模式与试验略有差异。

提取左侧墙体中部损伤较大部位点的位移,见图 20,在前期加载时,未加固墙体的位移最大,由于加固面层的约束,双侧面层加固模型的位移最小,未加固模型的位移最大。在加载后期,加固后墙体试件位移发生基线偏移,原因在于模拟分析时试件发生了塑性变形。

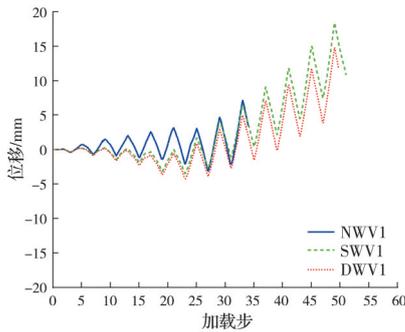


图 20 特征点位移

Fig. 20 Feature point displacements

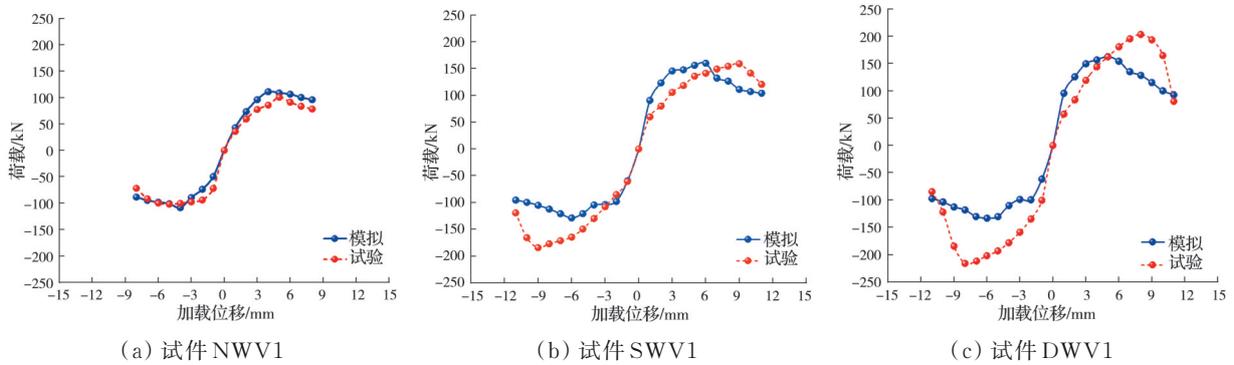


图 21 各试件有限元与试验荷载-位移骨架曲线对比

Fig. 21 Comparison of finite element and test load-displacement skeleton curves for each test piece

综合试验与数值计算结果(表 1)可见,试件 NWV1 的峰值荷载计算值与试验值较为接近,但破坏荷载相差较大。原因在于,试验过程中试件脆性破坏导致其破坏荷载下降幅度大,而有限元模拟时模型单元间保持变形连续,不发生脆性破坏,模型承载力达到峰值荷载后下降缓慢,导致试件破坏承载力较大。试件 SWV1 的负向峰值荷载相差较大,试件 DWV1 的峰值荷载相差较大,原因在于试验中试件 SWV1 在负向加载时面层突然与墙体发生脱落,加固面层的连接作用失效,负向承载力急剧下降,但在模拟过程中,面层与墙体保持连续而不发生脱落,导致模型正负向承载力较为接近,且下降平缓。在进行负向加载时,双侧面层加固模型发生

#### 4.4 骨架曲线对比

提取 3 个数值计算所得各试件的骨架曲线,并与试验结果对比,见图 21。可以看出,数值计算所得骨架曲线与试验结果基本一致。在正向加载过程中,相同加载位移条件下试件 NWV1 对应的荷载计算值均大于试验值;而在反向加载过程中,开裂前,相同位移对应的荷载试验值大于计算值,而后二者基本一致。在正向加载过程中,加固试件模型峰值前的计算值均大于试验值,在反向加载过程中,相同位移对应的荷载值,试验值则大于数值计算结果。

对比试验和数值计算所得骨架曲线发现,试件 NWV1 在试验以及有限元分析中的正反方向开裂点、峰值荷载点和破坏点的荷载较为接近,试件 SWV1、DWV1 特征点处的荷载值相差较大。

因砌体墙极易开裂且开裂后刚度降低,采用面层加固后可使试件刚度增大,但若加固时因面层与墙体间的连接强度不足,加载过程中墙体位移较大时,面层与墙体发生剥离,导致加固失效,承载力降低较快。

较大变形,产生局部平面外变形,此外,面层和墙面的连接与试验中存在一定的差异,致使两者结果不一致。因在地震作用下开洞砌体墙洞口角部易开裂破坏,随地震持续作用形成“X”形交叉贯穿裂缝;采用聚丙烯网-复合水泥砂浆进行面层加固后,面层对墙体的约束作用使其整体性能提高,早期刚度及承载力亦随之提高;当水平地震剪力增大后,加固面层界面发生局部黏结失效,加固面层逐步退出工作。

因此,开洞墙体加固后,加载初期加固面层参与受力,墙体刚度提高,墙体与面层共同工作性能较好,试件的峰值荷载提高;当墙体开裂后,洞口周边面层开裂后导致面层与墙体逐渐脱粘,后退出工作,试件的有效受力截面面积减小,墙体刚度快速

表 1 特征荷载试验结果与数值计算结果对比

Table 1 Comparison of test values and finite element analysis results for characteristic loads

| 特征荷载 | 试件      | 正向加载   |        |       | 负向加载   |        |       |
|------|---------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
|      |         | 试验值/kN | 计算值/kN | 偏差/%  | 试验值/kN | 计算值/kN | 偏差/%  |
| 峰值荷载 | 试件 NWV1 | 100.58 | 111.03 | 9.37  | 101.89 | 108.69 | 6.26  |
|      | 试件 SWV1 | 159.17 | 160.09 | 0.57  | 184.23 | 128.27 | 30.12 |
|      | 试件 DWV1 | 203.25 | 162.72 | 19.93 | 216.04 | 133.29 | 38.37 |
| 破坏荷载 | 试件 NWV1 | 78.43  | 95.91  | 18.22 | 71.88  | 88.37  | 18.66 |
|      | 试件 SWV1 | 120.62 | 104.16 | 13.65 | 119.21 | 95.41  | 19.96 |
|      | 试件 DWV1 | 80.54  | 92.71  | 13.13 | 84.61  | 97.37  | 13.10 |

退化,试件的极限荷载与未加固时的值接近。

对比数值计算与试验结果发现,正向加载时特征荷载与试验结果相差均在 20% 以内。因试验过程中墙体损伤累积后对特征荷载有一定影响,故正负向加载时的特征荷载值略有差异。

## 5 结论

1)在竖向荷载与水平往复荷载共同作用下,开洞砌体墙模型试件在洞口角部首先开裂,逐渐延伸后形成贯通的“X”形或“/ \”形剪切裂缝。

2)开洞墙体试件加固后的极限承载力、刚度及延性均有提高,其中双侧面层加固后承载力及刚度分别提高了 107.05% 和 46.55%,单侧面层加固后分别提高了 69.75% 和 11.68%,延性提高了 17% 和 16%。

3)对墙体进行面层加固后,面层参与受力,延缓了洞口破坏,变形能力得到提升,而后因黏结失效,面层与墙体发生脱黏破坏。

4)数值计算所得墙体模型的破坏特征与试验结果一致,表明所建模型合理,计算结果反映了试件破坏的力学机制。

## 参考文献

[1] 李胜才, D' Ayala Dina, 呼梦洁. 灌浆与钢箍加固震损砖墙的抗震性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(4): 36-41.  
LI S C, DINA D, HU M J. Experimental investigation on the aseismic behavior of seismic damage masonry wall retrofitted with grouting and steel hoops [J]. Civil Architecture and Environmental Engineering, 2014, 36(4):36-41.(in Chinese)

[2] 郭樟根, 刘佳亮, 孙伟民, 等. FRP 加固砌体结构的研究与应用[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2008, 30(1): 105-110.  
GUO Z G, LIU J L, SUN W M, et al. Research and application of FRP reinforced masonry structures [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2008, 30(1): 105-110. (in Chinese)

[3] 陶毅, 古金本, 信任, 等. CFRP 网格修复后多层砌体结构墙体的抗震性能[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(6): 1258-1267.  
TAO Y, GU J B, XIN R, et al. Seismic performance of multi-storey masonry wall repaired by carbon fiber reinforced polymer grids [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(6): 1258-1267. (in Chinese)

[4] 初圣林, 吴锋. 聚合物纤维网面层加固砌体的粘本构模型[J]. 大连交通大学学报, 2022, 43(2): 101-105.  
CHU S L, WU F. Bond-slip model of masonry reinforced by polymer fiber mesh [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2022, 43(2): 101-105. (in Chinese)

[5] DEL ZOPPO M, DI LUDOVICO M, BALSAMO A, et al. Fibre reinforced mortars for the out-of-plane strengthening of masonry walls [J]. Procedia Structural Integrity, 2023, 44: 2158-2165.

[6] 郭瑞, 任宇, 潘毅, 等. CFRP 网格-聚合物水泥砂浆加固 RC 梁的抗剪性能与计算公式[J]. 土木工程学报, 2020, 53(3): 1-10.  
GUO R, REN Y, PAN Y, et al. Shear strengthening effect and analytical model of RC beams reinforced by CFRP grid-PCM [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(3): 1-10. (in Chinese)

[7] BANERJEE S, NAYAK S, DAS S. Augmenting the seismic performance of masonry models using polypropylene band and steel wire mesh through shaking table testing [J]. Structures, 2020, 26: 340-347.

[8] BANERJEE S, NAYAK S, DAS S. Enhancing the flexural behaviour of masonry wallet using PP band and steel wire mesh [J]. Construction and Building Materials, 2019, 194: 179-191.

[9] DEBNATH P, CHANDRA DUTTA S, MANDAL P. Lateral behaviour of masonry walls with different types of brick bonds, aspect ratio and strengthening measures by polypropylene bands and wire mesh [J]. Structures, 2023, 49: 623-639.

[10] SADEK H, LISSEL S. Seismic performance of masonry walls with GFRP and Geogrid Bed joint reinforcement [J]. Construction and Building Materials, 2013, 41: 977-989.

[11] 黄艺, 王睿喆. 墙体开洞影响下房屋砖砌体结构地震易

- 损性分析[J]. 地震工程学报, 2019, 41(3): 574-580.
- HUANG Y, WANG R Z. Seismic vulnerability analysis of brick masonry structures with wall openings [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3): 574-580. (in Chinese)
- [12] 卢会芳, 谷倩, 孙成访, 等. 碳纤维布加固带窗洞砖墙抗震性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(2): 28-31.
- LU H F, GU Q, SUN C F, et al. Experimental study on seismic behavior of brick wall with a window reinforced by carbon fiber sheet [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27(2): 28-31. (in Chinese)
- [13] NOOR-E-KHUDA S. An explicit finite-element modeling method for masonry walls using continuum shell element [J]. Journal of Architectural Engineering, 2021, 27(4): 1-15.
- [14] 胡亮霞, 杨威, 朱尔玉, 等. 开洞砌体墙抗震性能的有限元分析[J]. 建筑结构, 2015, 45(17): 77-82.
- HU L X, YANG W, ZHU E Y, et al. Finite element analysis on seismic performance of masonry walls with openings [J]. Building Structure, 2015, 45(17): 77-82. (in Chinese)
- [15] 杨翌, 彭少民, 谷倩. 碳纤维布加固开洞砖墙体试验研究及有限元分析[J]. 建筑科学, 2009, 25(7): 33-36.
- YANG Z, PENG S M, GU Q. Experimental study and finite element analysis of brick wall with an opening strengthened by CFRP [J]. Building Science, 2009, 25(7): 33-36. (in Chinese)
- [16] 唐曹明, 罗瑞, 程绍革, 等. 水泥砂浆及钢筋网水泥砂浆单面加固低强度砖墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(10): 157-167.
- TANG C M, LUO R, CHENG S G, et al. Experimental study of seismic performance of low strength masonry walls reinforced with one-side cement mortar splint [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(10): 157-167. (in Chinese)
- [17] 张富文, 蒋利学, 郑士举. 单面钢筋网砂浆面层和混凝土板墙加固开洞砖墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(8): 108-117.
- ZHANG F W, JIANG L X, ZHENG S J. Experimental study on seismic performance of brick walls with openings strengthened by mortar layer with reinforcement grid and concrete slab on single-side [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(8): 108-117. (in Chinese)
- [18] 杨威, 朱尔玉, 郝节, 等. 开洞砖砌体两种加固方法的抗震对比试验[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(1): 62-66.
- YANG W, ZHU E Y, HAO J, et al. Seismic test research of two reinforcement methods about windowed brick masonry [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(1): 62-66. (in Chinese)
- [19] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 36-46.
- FENG P, QIANG H L, YE L P. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 36-46. (in Chinese)
- [20] 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [21] 刘玉璠, 赵均, 丁志娟, 等. 聚合物砂浆面层加固砖墙的有限元模拟与分析[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3): 169-171, 192.
- LIU Y F, ZHAO J, DING Z J, et al. Finite element modeling and analysis of the masonry wall strengthened with polymer mortar [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(3): 169-171, 192. (in Chinese)
- [22] 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)

(编辑 胡英奎)