

引用本文:石建光,郑雪锋,林树枝,等.灰缝厚度及水泥砂浆抹面对历史建筑砌体结构性能的影响[J].建筑科学与工程学报,2020,37(1):67-74.

SHI Jian-guang, ZHENG Xue-feng, LIN Shu-zhi, et al. Influence of Mortar Thickness and Cement Mortar Surface Strengthening on Behavior of Masonry Structure in Historical Buildings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1): 67-74.

DOI:10.19815/j.jace.2019.01017

灰缝厚度及水泥砂浆抹面对历史建筑砌体结构性能的影响

石建光¹, 郑雪锋¹, 林树枝^{1,2}, 谢益人³

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门市建设局, 福建 厦门 361005;

3. 厦门合立道工程设计集团股份有限公司, 福建 厦门 361004)

摘要:在保证最小干预原则的前提下,对由于砂浆性能退化引起的历史建筑砌体结构安全性不足问题,提出了置换砂浆加固砌体结构的方法。以鼓浪屿历史建筑砌体结构为工程背景,模拟其结构力学性能,考虑不同灰缝厚度和单双面水泥砂浆抹面对历史建筑砌体结构性能的影响,共设计 6 个砌体试件,并进行了剪压复合试验。结果表明:在置换砂浆深度都是 40 mm 的情况下,灰缝厚度对砌体结构抗剪性能的影响十分显著,5 mm 灰缝厚的试件比 10 mm 灰缝厚的试件承载力下降幅度为 68.6%,而 20 mm 灰缝厚的试件比 10 mm 灰缝厚的试件承载力下降了 8.7%;在都未置换砂浆的情况下,单面水泥砂浆抹面的试件比未抹面的试件承载力提高了 13.4%,双面水泥砂浆抹面的试件比未抹面的试件承载力提高了 19.6%;灰缝厚度和单双面水泥砂浆抹面对砌体结构的影响较为显著,在采用置换砂浆加固砌体结构时需要考虑这些影响;试验结果可以为历史建筑砌体结构的加固提供一定的参考依据。

关键词:历史建筑;置换砂浆;砌体加固;剪压试验;灰缝厚度;砂浆抹面

中图分类号:TU362

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)01-0067-08

Influence of Mortar Thickness and Cement Mortar Surface Strengthening on Behavior of Masonry Structure in Historical Buildings

SHI Jian-guang¹, ZHENG Xue-feng¹, LIN Shu-zhi^{1,2}, XIE Yi-ren³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;

2. Xiamen Construction Bureau, Xiamen 361005, Fujian, China; 3. Xiamen Hordor

Engineering Design Group Co., Ltd., Xiamen 361004, Fujian, China)

Abstract: On the premise of guaranteeing the principle of minimum intervention, the method of replacing mortar to strengthen masonry structure was put forward to solve the problem of insufficient safety of masonry structure in historical buildings caused by deterioration of mortar performance. Taking the masonry structure of Gulangyu historical building as the engineering background, the existing mechanical properties of the structure were simulated, and six masonry specimens were designed considering the influence of different mortar thickness and the masonry

收稿日期:2019-04-09

基金项目:厦门市鼓浪屿万古山风景名胜区管委会科研项目(XDHT2017470A)

作者简介:石建光(1962-),男,内蒙古包头人,教授,工学博士,E-mail:jgshi798@xmu.edu.cn.

structure strengthened with single or double-faced cement mortar on the behavior of the masonry structure in historical buildings. The shear-compression composite test was carried out. The results show that the mortar thickness has a significant effect on the shear resistance of masonry structures when the mortar replacement depth is 40 mm. The bearing capacity of specimens with 5 mm mortar thickness is 68.6% lower than that with 10 mm mortar thickness, while that with 20 mm mortar thickness is 8.7% lower than that with 10 mm mortar thickness. Without mortar replacement, the bearing capacity of specimens coated with single cement mortar is 13.4% higher than that of specimens without strengthening, and that of specimens coated with double cement mortar is 19.6% higher than that of specimens without strengthening. The mortar thickness and the strengthening with single-faced or double-faced cement mortar have significant effects on masonry structure. These effects need to be considered when using replacement mortar to strengthen masonry structure. The test results can provide some reference for the strengthening of masonry structure in historical buildings.

Key words: historical building; mortar replacement; masonry strengthening; shear-compression test; mortar thickness; mortar surface

0 引言

当历史建筑结构安全性不足,需要进行结构修缮与加固时,结构技术的选择要考虑建筑保护的真实性原则、最小干预原则、可识别性原则及可逆性原则^[1-2],尽可能复建原有结构体系,采用符合传统做法的结构加固方法。目前用于砌体结构的保护技术有许多种,其中砂浆置换法就是把砌体结构中的部分低强度砂浆用高性能砂浆置换,形成新旧 2 种砂浆组成的砌体结构,达到提高砌体结构抗震性能的目的^[3]。

目前国内外对置换砂浆法的研究还未形成统一的规范,大多数处于试验阶段。例如,西南交通大学魏智辉等^[4]通过砌体抗压强度试验得出,置换砂浆后的砌体构件破坏荷载比未置换的砌体构件均有提高,提高幅度与置换深度、置换砂浆强度有关,最大的达到 30%。厦门大学邓华^[5]针对砂浆强度低引起的砌体强度不足,研究了采用不连续替换砂浆层注浆加固砌体结构的方法,试验表明砌体试件的抗剪、抗压承载力都明显提高。

以鼓浪屿历史建筑砌体结构为工程背景进行研究,发现鼓浪屿存在大量不同灰缝厚度以及单双面水泥砂浆抹面的砌体结构。因此,应当充分考虑灰缝厚度以及水泥砂浆抹面对砌体结构性能的影响。

根据《砌体结构工程施工质量验收规范》(GB 50203—2011),砖砌体的灰缝应横平竖直,厚薄均匀,水平灰缝厚度及竖向灰缝宽度宜为 10 mm,但不应小于 8 mm,也不应大于 12 mm^[6]。当砌体处于受压状态时,灰缝厚度越大,砂浆的横向变形就越

大,砖内横向拉应力也越大,从而一定程度上加剧了砌体内的复杂应力状态,砖内拉应力就随之增大。当水平灰缝厚度过小时,常常由于砖表面的不平整,不足以改善砌体内的复杂应力状态,因而砌体抗压强度也降低^[7]。

在恒定的竖向压力和水平反复剪力的作用下,由经过一定程度风化的灰缝砂浆连接的砌块结点破坏可以用加“帽子”的库仑准则来描述^[8]。根据上海理工大学彭斌等^[9]的试验表明,在常见的范围内,灰缝厚度对其压剪破坏准则的影响并不明显,且压剪状态下灰缝砂浆可采用库仑破坏准则,适用于由灰缝处产生贯通斜裂缝而导致失去抗剪承载力的砂浆破坏。

水泥砂浆面层加固法是一种砌体结构抗震加固常用的有效方法,能够提高墙体的抗震能力。《砌体结构加固设计规范》(GB 50702—2011)给出了水泥砂浆面层加固砖墙的抗震受剪承载力计算公式,如式(1)所示^[10]。

$$\left. \begin{aligned} V &\leq V_{ME} + V_{sj} / \gamma_{RE} \\ V_{sj} &= 0.02fbh + 0.2f_y A_s h / s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: V 为考虑地震组合的墙体剪力设计值; V_{ME} 为原砌体抗震受剪承载力; V_{sj} 为采用钢筋网水泥砂浆面层加固后提高的抗震受剪承载力; γ_{RE} 为承载力抗震调整系数; f 为砂浆轴心抗压强度设计值; b 为砂浆面层厚度; h 为墙体水平方向长度; f_y 为水平向钢筋的设计强度值; A_s 为水平向单排钢筋截面面积; s 为水平向钢筋的间距。

公式(1)可看作是砖砌体、钢筋及面层砂浆三部

分承载力之和,其中面层砂浆的承载力为 $V_{ms} = 0.02fbh$ 。

清华大学李明等^[11]通过 8 片低强度砂浆砖砌体经钢筋网砂浆抹面加固后的抗侧力对比试验,得出了钢筋网水泥砂浆抹面加固低强度砖砌体可以显著提高墙体的水平承载能力和抗侧移刚度。天津大学黄忠邦^[12]通过水泥砂浆及钢筋水泥砂浆面层加固砖砌体试验,得出了双面水泥砂浆面层加固砖墙后,一般可比原砖墙的抗剪能力提高 1 倍。

不同的灰缝厚度以及单双面水泥砂浆抹面对砌体结构具有一定程度的影响。现有的研究建立在砌体基本力学性能试验方法上,其试验结果具有一定的局限性。本文通过设计 6 个砌体试件在剪压复合受力下的试验,分析了不同因素下试件的破坏模式以及对承载力的影响,更好地模拟了实际工况,为历史建筑砌体结构的加固提供一定的参考依据。

1 砌体试验试件

1.1 试件设计

根据相关试验规范^[13-14]和砖块的实际尺寸等因素,设计了实际尺寸为 700 mm×700 mm×225 mm 的剪压试件,试验试件如图 1 所示。

设计的试验试件考虑因素包括:①灰缝厚度;②单双面水泥砂浆抹面。第 1 组灰缝砂浆的置换形式为 X 形交叉换缝形式,X 形区域内置换水平缝和竖缝,X 形带宽为 225 mm,深度为 40 mm,由此可估算置换砂浆占全部砂浆的比例约为 20.53%;第 2 组未置换灰缝砂浆,其水泥砂浆抹面厚度为 10 mm。共设计了 6 个试件,试件参数如表 1 所示。

表 1 剪压试验试件参数

Tab. 1 Parameters of Shear-compression Test Specimens

试件 编号	长度/ mm	高度/ mm	厚度/ mm	是否置 换砂浆	灰缝厚度/ mm	水泥砂浆 抹面形式
1 [#]	700	700	225	是	10	
2 [#]	700	700	225	是	5	
3 [#]	700	700	225	是	20	
4 [#]	700	700	225	否		无
5 [#]	700	700	225	否		单面
6 [#]	700	700	225	否		双面

1.2 试件材料性能与加载

砂浆性能:此次试验用到的砂浆分为旧砂浆和置换砂浆 2 种。旧砂浆为黏土混合砂浆,其平均强度为 0.625 MPa^[15]。置换砂浆为水泥砂浆,其稠度为 91.5 mm,7 d 强度为 6.2 MPa,28 d 强度为 11.1 MPa^[16]。此次试验试件砌筑时采用的是旧砂浆,换

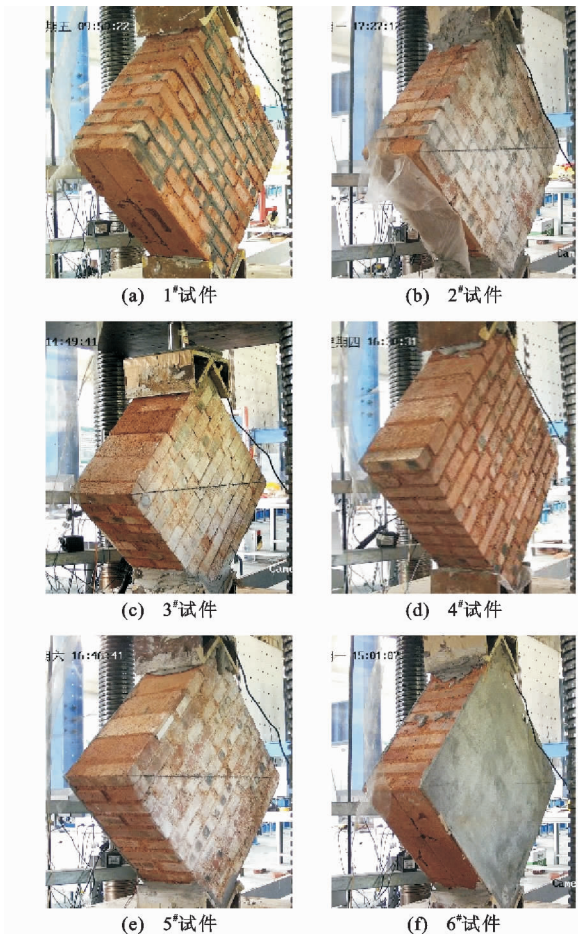


图 1 试验试件

Fig. 1 Test Specimens

缝以及抹面均采用置换砂浆。

砖的性能:此次试验所用砖的抗压强度平均值为 12.31 MPa,标准值为 8.96 MPa,变异系数为 0.15,故强度等级为 MU10^[17]。

此次试验过程中 6 个试件均采用位移控制,加载速度控制在 0.5 mm·min⁻¹,同时通过位移计测量了试件的水平变形和竖向变形(图 2),加载过程中当承载力达到峰值,力-位移曲线不再上升时即停止加载^[18]。

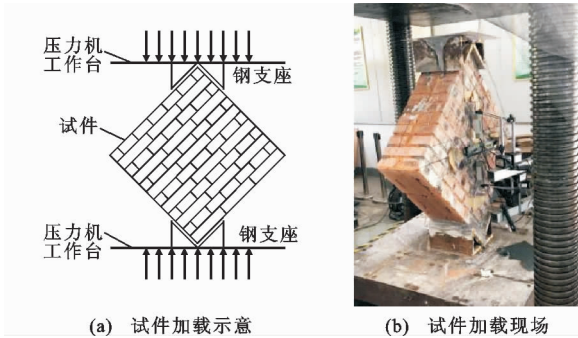


图 2 试验试件加载

Fig. 2 Loading of Test Specimens

2 灰缝厚度变化的试验结果

2.1 破坏过程

灰缝厚度变化的加载过程中,3 个试件的旧砂浆与置换砂浆均受到不同程度的挤压,且第 1 道裂缝都出现在试件的中部,接着裂缝不断发展,最后在试件内部形成贯通裂缝,试件承载力失效。表 2 为

灰缝厚度变化的试验破坏过程。由表 2 的破坏形态可看出,试件的实际破坏阶梯形缝长度均可以看作 1 道水平通缝与数道竖缝的长度之和,估算可得 1[#],2[#],3[#] 试件破坏时的实际阶梯形缝长度分别为 875,992,933 mm,其中跨过置换砂浆区域的长度分别为 583,758,817 mm,可初步推断试件最终破坏时的贯通裂缝长度比较接近。

表 2 灰缝厚度变化的试验破坏过程

Tab. 2 Test Failure Process for Specimens with Varying Mortar Thickness

试件编号	开裂位置	裂缝形态	破坏形态
1 [#]			
2 [#]			
3 [#]			

1[#] 试件加固区的强度和刚度比较大,裂缝主要集中在试件的垂直受力方向并且处于加固区内,但未见明显的阶梯形裂缝。2[#] 试件整体受到一定程度挤压,挤压过后砖块之间发生滑移现象,裂缝呈现多道明显阶梯形。3[#] 试件加固区与非加固区的强度和刚度相差较大,加固区所分配的荷载较大,加固区裂缝不断发展延伸至非加固区直至贯通,最终呈现出一道明显的阶梯形裂缝。

2.2 力-位移曲线分析

从图 3 可以看出,1[#],2[#],3[#] 试件的承载力峰值分别为 108.2,34.0,98.8 kN,达到峰值时的位移分

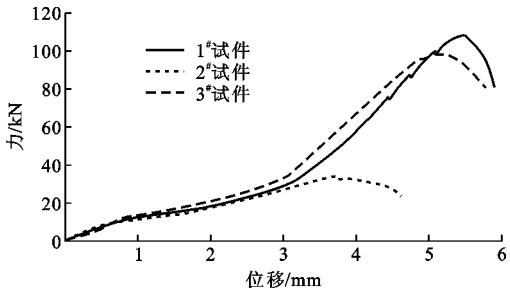


图 3 不同灰缝厚度的试件力-位移曲线

Fig. 3 Force-displacement Curves of Test Specimens with Varying Mortar Thickness

别是 5.50,5.10,3.75 mm。各个试件承载力达到峰值后曲线下降剧烈,均属于脆性破坏,加载过程中未出现明显的开裂声音。1#与 3#试件力-位移曲线形状相似,具有一定的重合度,说明破坏模式相似;而 2#试件灰缝厚度为 5 mm,试件中旧砂浆与置换砂浆各自所占的比例分别约为 79.47%和 20.53%,而旧砂浆的黏结强度较低以及砖块本身的不平整性,从而导致砖块之间未能形成可靠有效的黏结,使得试件出现了一定的滑移,最终的承载力与位移均与 1#和 3#相差较大。

3 单双面水泥砂浆抹面试件试验结果

3.1 破坏过程




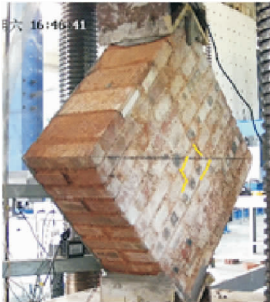
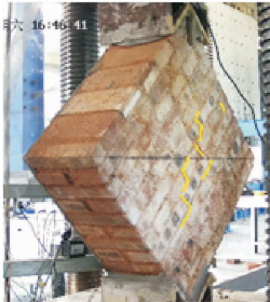



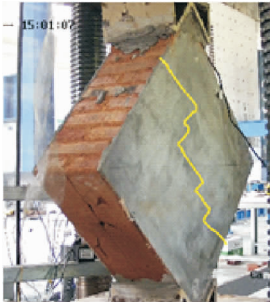
单双面水泥砂浆抹面试件均未置换砂浆,所以

在加载过程中,试件的砂浆层不断被压紧,裂缝均集中在旧砂浆上发展并最终贯通,砖块表面未见明显裂缝。由于砖砌体及抹面砂浆二者的材料性质不同,因而达到各自最大强度值的时间有先后,此次试验中当抹面砂浆一开裂,试件即裂通破坏。与灰缝厚度变化试验类似,第 1 道裂缝都出现在试件的中部,随着裂缝的不断发展,直至在试件内部形成贯通裂缝,试件承载力失效,属于剪压破坏^[19]。

由表 3 的破坏形态可估算出:4#,5#,6#试件破坏时的实际阶梯形缝长度分别为 933,875,933 mm,其中跨过的区域均为旧砂浆,可以看出,3 个试件的贯通裂缝较为接近。4#和 5#试件裂缝均呈现一定的阶梯形,6#试件由于外立面被水泥砂浆包裹着,裂缝未见明显阶梯形。

表 3 单双面水泥砂浆抹面试件破坏过程

Tab.3 Failure Process of Specimens Strengthened with Single or Double-faced Cement Mortar

试件编号	开裂位置	裂缝形态	破坏形态
4#			
5#			
6#			

3.2 力-位移曲线分析

从图 4 可以看出,4#,5#,6#试件的承载力峰值分别为 47.6,54.0,58.2 kN,达到峰值时的位移分

别是 5.10,4.45,4.40 mm。各个试件达到峰值后承载力开始下降,4#试件由于是纯旧砂浆且外立面无水泥砂浆抹面,故相比之下整体的延性较大;5#

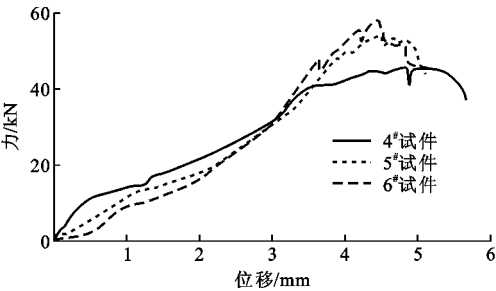


图 4 单双面水泥砂浆抹面试件力-位移曲线
Fig. 4 Force-displacement Curves of Specimens
Strengthened with Single or Double-faced
Cement Mortar

和 6[#] 试件力-位移曲线形状相似,重合度较高,说明破坏模式也相似;试件外立面存在水泥砂浆抹面,与内部的旧砂浆相比刚度较大,故达到承载力峰值时的位移较小。

4 试验结果分析与总结

从不同灰缝厚度、单双面水泥砂浆抹面的砌体试件在剪压复合受力下的试验结果可以发现,试件往往形成阶梯形裂缝而剪坏,是由于砌体单元所受的主拉应力大于砌体的抗拉强度而导致剪切破坏^[20]。根据主拉应力破坏理论,只要试件破坏的裂缝经过加固区,加固就有效果。通过对比 1[#] 与 4[#] 试件可知,X 形置换砂浆使试件的剪压承载力提高了 127.3%,初步说明置换砂浆对试件的剪压承载力具有明显的提高作用。各试件的试验加载结果如表 4 所示。

表 4 剪压试验加载结果

Tab. 4 Loading Results of Shear-compression Test

试件 编号	自变量	承载力峰 值/kN	承载力峰值 对应的位移/ mm	承载力提高比例/%	
				灰缝厚度	水泥砂 浆抹面
1 [#]	10 mm 灰 缝厚度	108.2	5.50		
2 [#]	5 mm 灰 缝厚度	34.0	3.75	-68.6	
3 [#]	20 mm 灰 缝厚度	98.8	5.10	-8.7	
4 [#]	无砂浆 抹面	47.6	5.10		
5 [#]	单面水泥 砂浆抹面	54.0	4.45		13.4
6 [#]	双面水泥 砂浆抹面	58.2	4.40		19.6

4.1 灰缝厚度的影响

初步分析试验数据可得,以 10 mm 灰缝厚试件为基准,5 mm 灰缝厚的试件承载力之所以较低,是由于该试件内 79.47% 的灰缝为旧砂浆,黏结力很低,同时砖块表面较为不平整,所以砂浆无法使砖块之间形成有效的连接,最终导致试件的承载力较低且试验过程中出现了滑移。

根据彭斌等^[9]的试验结果可知,在常见的范围内,灰缝厚度对压剪破坏准则的影响并不明显,故 1[#] 与 3[#] 试件的破坏准则一致。根据规范^[6]可知灰缝厚度大于 10 mm 时,其抗压承载力将会有一定程度的下降。本次试验中 20 mm 灰缝厚的试件承载力比 10 mm 灰缝厚的试件低了 8.7%,降低的幅度较小,主要原因可从以下 4 点分析:①灰缝由不同的砂浆组成,两者的强度和刚度相差较大,且置换砂浆对试件的剪压承载力有明显的提高作用;②本次加载为剪压复合受力试验,在一定的竖向压力作用下,试件的抗剪承载力将有一定程度的提高;③计算值应有安全储备,一般应比试验值小;④本次试验的试件制作工艺不同于一般的非加固试件,试件历经置换局部砂浆等一系列工艺,非一次成形,对其承载力可能存在一定的影响。

4.2 单双面水泥砂浆抹面的影响

以 4[#] 试件为基准,将 5[#] 和 6[#] 试件的数据与其进行对比可知,5[#] 单面水泥砂浆抹面的试件承载力比 4[#] 试件提高了 13.4%,6[#] 双面水泥砂浆抹面的试件承载力比 4[#] 试件提高了 19.6%。从图 4 可以看出,当达到承载力峰值时 4[#] 试件的位移相对大一些,是由于试件内部全是旧砂浆,与砖块之间的匹配性较好,旧砂浆受到挤压剪切,故呈现出比较大的位移。5[#] 与 6[#] 试件承载力达到峰值时的位移有所降低,是由于水泥砂浆面层比灰缝旧砂浆的刚度与强度要高,约束了灰缝的一部分变形,从而导致位移降低。

在砖砌体的外立面抹上水泥砂浆之后,水泥砂浆与试件咬合在一起,将会对砌体结构起到一定的约束作用,约束内部砂浆层的部分变形,使其抗剪能力有一定提高,所以经水泥砂浆面层加固后的试件承载力提高。当水泥砂浆抹面的厚度一定时,其覆盖面积越大,约束作用越明显,试件承载力提高越明显。

根据公式(1),面层砂浆的抗震受剪承载力为 $V_{ms}=0.02fbh$ 。将本次试验的数据代入式(1)可得,5[#] 试件受剪承载力提高 1.4 kN,6[#] 试件受剪承

载力提高 2.8 kN,而本次试验单面和双面剪压承载力提高的幅度分别为 6.4 kN 和 10.6 kN。试验值明显大于计算值,主要原因为:①本次加载为剪压复合受力试验,在一定的竖向压力作用下,试件的抗剪承载力将有一定程度的提高;②水泥砂浆面层的强度和刚度与灰缝砂浆相差较大,约束了试件部分变形的同时,承担了一部分外荷载;③计算值应考虑安全系数,一般比试验值小;④面层水泥砂浆与试件表面咬合比较好,起到一定的协作性,提高了试件承载力,故呈现出试验值大于计算值的试验结果。

5 结 语

(1)在置换砂浆深度都是 40 mm 的情况下,灰缝厚度对砌体结构抗剪性能的影响十分显著。由于 5 mm 灰缝厚的试件砂浆无法使砖块之间形成有效的连接,产生了滑移,故 5 mm 灰缝厚的试件比 10 mm 灰缝厚的试件承载力下降 68.6%。20 mm 灰缝厚的试件比 10 mm 灰缝厚的试件承载力仅下降了 8.7%,主要是因为不同砂浆、加载方案以及制作工艺的影响。

(2)在未置换砂浆的情况下,单面水泥砂浆抹面的试件比未抹面的试件承载力提高了 13.4%,双面水泥砂浆抹面的试件比未抹面的试件承载力提高了 19.6%。单面和双面水泥砂浆面层加固对承载力的提高程度均大于理论计算值,主要是因为加载方案、面层水泥砂浆与灰缝砂浆强度、刚度相差较大,且面层砂浆与砖砌体表面接触咬合较好。

(3)综合来看,灰缝厚度为 10 mm 时,加固效果最好。同时,在探究单双面水泥砂浆抹面对砌体结构性能的影响时,可以发现单双面试件的承载力仅相差 6.2%,而单面比双面更经济,故在承载力许可的情况下,建议实际工程可考虑单面水泥砂浆抹面。

(4)为获得更完善的破坏机理,进一步的研究应设计更多不同参数变化的试件,并增加同种参数下试件的数量。

参考文献:

References:

- [1] 杨昌鸣,张帆.近代历史建筑清水砖墙修复初探[J].建筑学报,2010(增1):51-54.
YANG Chang-ming,ZHANG Fan. Primary Research of Restoration of Fair Brick Masonry in Modern Historical Buildings[J]. Architectural Journal,2010(S1):51-54.
- [2] 张松,周瑾.论近现代建筑遗产保护的制度建设

[J].建筑学报,2005(7):5-7.

ZHANG Song,ZHOU Jin. On the System Construction of Modern Architectural Heritage Protection[J]. Architectural Journal,2005(7):5-7.

- [3] 谢益人,石建光.砂浆置换法加固砌体结构的技术要点[J].墙材革新与建筑节能,2018(12):55-58.

XIE Yi-ren,SHI Jian-guang. Technical Key Points of Strengthening Masonry Structures by Mortar Replacement Method[J]. Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings,2018(12):55-58.

- [4] 魏智辉,潘毅,邱洪兴,等.勾缝加固砖砌体墙的抗压性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):184-188.

WEI Zhi-hui,PAN Yi,QIU Hong-xing,et al. Experimental Study on Compressive Behavior of Masonry Walls Strengthened with Pointing Mortar[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2017,49(12):184-188.

- [5] 邓华.震后建筑垃圾估算与再利用和砌体注浆加固方法研究[D].厦门:厦门大学,2010.

DENG Hua. Study on Estimation and Reuse of Construction Waste and Reinforcement Method of Masonry Grouting After Earthquake[D]. Xiamen: Xiamen University,2010.

- [6] GB 50203—2011,砌体结构工程施工质量验收规范[S].

GB 50203—2011, Code for Acceptance of Constructional Quality of Masonry Structures[S].

- [7] 徐军平,李年维.砂浆水平灰缝厚度对砌体质量的影响[J].华东船舶工业学院学报,2000,14(4):26-28.

XU Jun-ping,LI Nian-wei. Effect of Mortar Joint Thickness on Masonry Envelope Quality[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute,2000,14(4):26-28.

- [8] LOURENCO P B, RAMOS L F. Characterization of Cyclic Behavior of Dry Masonry Joints[J]. Journal of Structural Engineering,2004,130(5):779-786.

- [9] 彭斌,顾祥林.灰缝砂浆在压剪状态下的破坏准则[C]//顾祥林.2005年全国砌体结构基本理论与工程应用学术会议论文集.上海:同济大学出版社,2005:22-28.

PENG Bin, GU Xiang-lin. Failure Criteria of Mortar Beds Under Shear and Compression[C]//GU Xiang-lin. 2005 National Conference on Basic Theory and Engineering Application of Masonry Structures. Shanghai: Tongji University Press,2005:22-28.

- [10] GB 50702—2011,砌体结构加固设计规范[S].

GB 50702—2011, Code for Design of Strengthening

- Masonry Structures[S].
- [11] 李 明,王志浩. 钢筋网水泥砂浆加固低强度砂浆砖砌体的试验研究[J]. 建筑结构,2003,33(10):34-36.
LI Ming, WANG Zhi-hao. Experimental Study on Brick Masonry Walls with Low Strength Mortar Strengthened with Steel-meshed Cement Mortar[J]. Building Structure,2003,33(10):34-36.
- [12] 黄忠邦. 水泥砂浆及钢筋网水泥砂浆面层加固砖砌体试验[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版,1994,27(6):764-770.
HUANG Zhong-bang. The Study on the Adopting Cover with Cement Mortar and the Cover with Reinforced Cement Mortar to Strengthen Brick Masonry [J]. Journal of Tianjin University:Science and Technology,1994,27(6):764-770.
- [13] GB/T 50129—2011,砌体基本力学性能试验方法标准[S].
GB/T 50129—2011, Standard for Test Method of Basic Mechanics Properties of Masonry[S].
- [14] ASTM E519/E519M-15, Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages [S].
- [15] GB/T 50123—1999,土工试验方法标准[S].
GB/T 50123—1999, Standard for Soil Test Method [S].
- [16] JGJ/T 70—2009,建筑砂浆基本力学性能试验方法标准[S].
JGJ/T 70—2009, Standard for Test Method of Basic Properties of Construction Mortar[S].
- [17] GB/T 5101—2017,烧结普通砖[S].
GB/T 5101—2017, Fired Common Bricks[S].
- [18] 钱义良,王增泽. 砖砌体沿阶梯形截面抗剪强度的试验方法及其分析[J]. 建筑结构,1981,11(4):23-30.
QIAN Yi-liang, WANG Zeng-ze. Test Method and Analysis of Shear Strength of Brick Masonry Along Stepped Section[J]. Building Structure,1981,11(4):23-30.
- [19] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
SHI Chu-xian. Masonry Structure Theory and Design [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press,2011.
- [20] 蔡 勇,施楚贤,马超林,等. 砌体在剪-压作用下抗剪强度研究[J]. 建筑结构学报,2004,25(5):118-123.
CAI Yong, SHI Chu-xian, MA Chao-lin, et al. Study of the Masonry Shear Strength Under Shear-compression Action[J]. Journal of Building Structures,2004,25(5):118-123.