

结构胶增强砖石砌体的抗剪性能试验研究与分析

孙隽骁,段绪胜*,王少杰

山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018

摘要: 砖石砌体是由砖石块材和砂浆砌筑而成的, 由于灰缝砂浆的抗剪强度低, 严重影响了砖石砌体的抗剪性能。本文提出对灰缝钻孔灌注建筑结构胶, 提高灰缝砂浆抗剪强度的新方法。经试验和分析, 硅酮结构胶可以提高块间粘连度, 环氧结构胶可以提高灰缝的抗剪强度。

关键词: 砖石砌体; 结构胶; 抗剪强度

中图分类号: TU501

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2017)01-0079-05

Experimental Research and Analysis of the Shear Behavior of Masonry Strengthened by Structure Adhesive

SUN Jun-xiao, DUAN Xu-sheng*, WANG Shao-jie

College of Water Conservancy and Civil Engineering/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

Abstract: Stone masonry is made of stone and mortar. The shear behavior is seriously affected by weak shear strength of mortar joint. The mortar joint is drilled and implanted structure to improve the shear strength of mortar joint. After tests and study, the silicone structure adhesive improved the tenacity of mortar joint, the epoxy structure adhesive improved the shear strength of mortar joint.

Keywords: Stone masonry; structure adhesive; shear strength

砖石建筑是中国古代建筑的重要组成部分, 其历史与中国古建筑的历史兴衰密切相关。砖石建筑是指利用砖石块材、以一定结构形式砌筑的建筑物或构筑物^[1]。在我国一些古村落里, 砖石更是传统民居的重要建筑材料。近年来, 我国地震频发, 因此对砖石类传统民居、文化遗迹的加固及修缮技术研究尤为必要。

为了增强砌体结构的抗剪性能, 兰州理工大学土木工程学院宋彧教授提出了采用斜拉筋加固墙体的措施^[2], 新疆大学建筑工程学院提出了以钢丝网水泥砂浆加固墙体的方法^[3], 以上加固方法均为对墙体进行整体加固。但是, 在加固传统石砌房屋的同时应保证其原本建筑的形式和风格^[4]。Paulo B. Lourenco^[5]等通过试验研究发现, 灰缝砂浆是影响砌体抗剪强度的重要因素。本文采用对灰缝砂浆置换补强的方法, 使用建筑结构胶对石砌体灰缝钻孔注胶。此加固方法具有工艺简单、施工方便、工期短、造价低等特点。试验结果研究, 砖石砌体的抗剪性能有很大提高, 并且不破坏石砌墙体的原本建筑形式和整体风格。

1 试验概况

1.1 试件制作与设计

砖石建筑中使用的块材事先需要经过加工、打磨, 使其形状比较规则、美观。本试验采用混凝土砌块和石块。本试验采用的混凝土实心砌块在形状、质量、强度(强度等级 C40)及表面粗糙度(事先经过了凿毛)都接近砖石建筑中使用的块材, 而且混凝土实心砌块本身也是一种比较坚硬的砖石块材。对于一些现役的砖石建筑, 砌筑时间比较久远, 在当时砌筑使用的砂浆强度都比较低, 有些古老的砖石建筑更是使用灰浆进行砌筑。所以, 本试验使用强度等级 M 2.5 以下的砌筑砂浆(抗压强度为 0.14 MPa)。

结构胶增强砖石砌体的抗剪性能试验共设计4组试件, 其编号为SQ、PQ、GQ、HQ。其中, SQ试件是由石块和砂浆组成; PQ试件是由混凝土砌块和砂浆组成; GQ试件是由混凝土砌块、硅酮结构胶和砂浆组成; HQ试件是由混凝土砌块、环氧结构胶和砂浆组成。采用的石块尺寸为 $b \times t \times h = 240$

收稿日期: 2016-10-14

修回日期: 2016-11-03

作者简介: 孙隽骁(1988-),男,研究生,主要从事结构鉴定与加固。E-mail:shunxiao@126.com

***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:HuangSheng@qq.com

mm×180 mm×200 mm，混凝土砌块尺寸为 $b \times t \times h = 300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。试件主要参数见表 1。

表 1 受剪试件主要参数

Table 1 Main parameters of the sheared specimens

砌体编号 No.	设计尺寸 Size			事件数量 Amount	灰缝厚度/mm Thickness of block gap	钻孔深度/mm Drilling depth
	b/mm	t/mm	h/mm			
SQ	240	180	200	3	15	
PQ	300	200	200	3	15	
GQ2	300	200	200	3	15	20
GQ4	300	200	200	3	15	40
HQ2	300	200	200	3	15	20
HQ4	300	200	200	3	15	40

注: 1. b 为试件宽度; t 为试件厚度; h 为试件高度; 2. GQ2、HQ2为钻孔深度20 mm试件; GQ4、HQ4为钻孔深度40 mm试件。

Note: 1. b for the specimen width; t for the thickness of the specimen; h for the specimen height. 2. GQ2、HQ2 for drilling depth 20 mm; GQ4、HQ4 for drilling depth 40 mm.

对砌筑完成的试件，依据《砌体基本力学性能试验方法标准》(GB/T 50129—2011) [6]的规定，对试件进行养护。试件养护完成后，对灰缝进行钻孔注胶，如图1所示。试验使用了两种建筑结构胶，分别是硅酮结构胶（密封胶）、环氧结构胶（植筋胶）。硅酮结构胶常用于玻璃幕墙的密封[7]，抗撕裂性能良好；环氧结构胶主要成分是环氧树脂，在结构加固中应用广泛[8]。

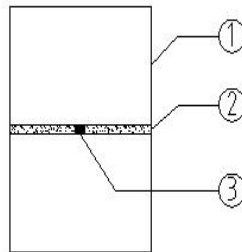


图 1 注胶后的试件示意图

Fig.1 The schematic specimen after drilling structure adhesive

注: 1. 砌块 Masonry 2.砂浆 Mortar 3. 结构胶 Structure adhesive

1.2 加载装置和测量方案

本实验在山东农业大学结构实验大厅完成。加载装置示意图，如图2所示。

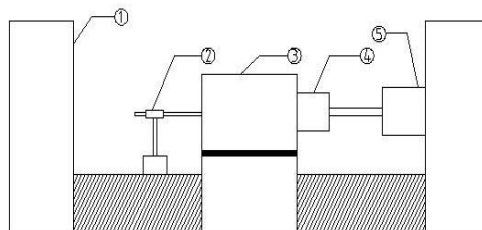


图 2 加载装置示意图

Fig.2 The schematic of loading device

注: 1. 反力墙 Reaction wall 2.百分表 Dial indicator 3.试件 Specimen 4.力学传感器 Mechanical sensors 5.千斤顶 Jack

试件安装就位后，首先对试件施加0.1 kN的水平荷载，用以检查试验仪器的灵敏度及安装牢固性。采用匀速连续加载对受剪试件施加荷载，保证试件在2~3 min内破坏，加载过程中保持加载速率不变。当受剪面被剪坏即认为试件破坏，记录试件的破坏荷载，观察试件破坏特征。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

PQ 系列试件和 SQ 系列试件加载初期，试件表面及灰缝处无明显破损，直到加载力达到破坏荷载时，试件突然沿灰缝断裂。PQ 系列试件和 SQ 系列试件破坏形态一样，如图 3、4 所示，表现为明显的脆性破坏，在试件加载过程中从灰缝的开裂至完全分离，整个过程时间较短。而且，两组试

件的破坏受剪面,均发生在砂浆层的受剪面。



图 3 PQ系列试件破坏形态图

Fig.3 The modes failed by PQ masonries



图 4 SQ系列试件破坏形态图

Fig.4 The modes failed by SQ masonries

对于 GQ 系列试件,加载力达到破坏荷载时,灰缝砂浆出现通缝破坏,此时砂浆退出工作。根据 GQ 系列试件的破坏形态图,如图 5 所示,与 PQ 系列试件对比,GQ 系列试件从砂浆开裂到完全裂开的过程时间也比较短。但是,与 PQ 试件不同的是,GQ 试件的砂浆虽然裂开,硅酮结构胶仍然对上下砌块起着拉结作用。



图 5 GQ系列试件破坏形态图

Fig.5 The modes failed by GQ masonries

对于 HQ 系列试件的加载破坏过程可以分为两个阶段,初始加载阶段,砂浆开裂环氧结构并未开裂,随着加载力继续增大进入第二阶段,环氧结构胶开始开裂,最后形成通缝。在整个加载过程中砖石砌块并没有破坏,而是砖石砌块间的灰缝砂浆出现裂缝。根据 HQ 系列试件的破坏形态图可知,与 PQ 试件对比,其受剪面是由砂浆受剪面和环氧结构胶受剪面共同组成,如图 6 所示。



图 6 HQ系列试件破坏形态图

Fig.6 The modes failed by HQ masonries

2.2 砌体抗剪强度

根据《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)^[9]的规定,砌块砌体抗剪强度平均值采用式(1)进行计算 $f_{v,m} = k\sqrt{f_1}$ (1)

$f_{v,m}$ —试件的抗剪强度平均值 (N/mm²);

k —与砌体种类有关的参数,对于混凝土砌块取 0.069,毛料石取 0.188;

f_1 —砂浆抗压强度平均值 (N/mm²)。

SQ 系列试件和 PQ 系列试件的抗剪强度,根据《砌体基本力学性能试验方法标准》(GB/T 50003—2011)^[6]中规定,采用式(2)进行计算:

$$f_{v,i} = \frac{V}{A} \quad (2)$$

$f_{v,i}$ —试件的抗剪强度 (N/mm²);
 V —试件的破坏荷载值 (kN);
 A —试件的受剪面积 (mm²)。

SQ 系列试件和 PQ 系列试件的抗剪强度规范算值与实际测试值对比分析见表 2。

表 2 SQ 系列试件、PQ 系列试件的抗剪强度试验结果

Table 2 The results from SQ and PQ specimens in the shearing resistance test

编号 No.	受剪面积 A/mm^2	破坏荷载 P_u/kN	抗剪强度实测值 $f_{v,i}/\text{MPa}$	抗剪强度规范值 $f_{v,m}/\text{MPa}$	$f_{v,m}/f_{v,i}$	破坏位移 l/mm	抗剪强度平均值 \bar{f}_v/MPa	破坏位移平均值 \bar{l}/mm
SQ-1	43200	3.0	0.070	0.070	1.000	0.70	0.072	0.71
SQ-2	43200	3.1	0.071	0.070	0.986	0.71		
SQ-3	43200	3.2	0.074	0.070	0.950	0.72		
PQ-1	60000	1.5	0.025	0.026	1.040	0.65	0.027	0.66
PQ-2	60000	1.6	0.027	0.026	0.963	0.66		
PQ-3	60000	1.7	0.028	0.026	0.929	0.66		

从表 2 中可以看到 SQ 试件和 PQ 试件的试验值与规范值拟合较好。

GQ 系列试件的抗剪强度试验结果见表 3。

表 3 GQ 系列试件的抗剪强度试验结果

Table 3 The results from GQ specimen in the shearing resistance test

试件编号 No.	受剪面积 A/mm^2	破坏荷载 P_u/kN	破坏位移 l/mm	破坏位移平均值 \bar{l}/mm
GQ2-1	60000	1.6	20.61	20.60
GQ2-2	60000	1.7	20.62	
GQ2-3	60000	1.6	20.60	
GQ4-1	60000	1.7	30.61	30.62
GQ4-2	60000	1.8	30.62	
GQ4-3	60000	1.8	30.63	

通过对表 2 和表 3 的分析, 硅酮结构胶对砌块的抗剪承载能力提高很小, 但是增强了块间粘连度 (破坏位移)。20 mm 钻孔深度时块间粘连度增加了 20 mm, 40 mm 钻孔深度时块间粘连度增加了 30 mm。

为了求出加入环氧结构胶的砌块的抗剪强度, 这里引入置换率、复合强度两个变量。置换率指结构胶有效受剪面积占总受剪截面面积的百分比。复合强度指对注入结构胶的砌体, 结构胶与砂浆共同工作时, 提供的抗压强度。

对加入结构胶的砌体的抗剪强度采用式 (3) 进行计算: $f_v = \frac{V}{A}$ (3)

f_v —试件的抗剪强度 (N/mm²);
 V —试件的破坏荷载值 (kN);
 A —试件的受剪面积。

对加入结构胶的砌体的置换率采用式 (4) 进行计算, 复合强度采用式 (5) 进行计算:

$$\beta = \frac{A_1}{A} \tag{4}$$

$$f = f_1(1 - \beta) + f_2\beta \tag{5}$$

f —试件的复合强度 (N/mm²);
 f_1 —试件的砂浆抗压强度 (N/mm²);
 f_2 —试件的结构胶抗压强度 (N/mm²);
 β —试件的置换率 (%);
 A_1 —结构胶的受剪面积 (mm²);
 A —试件的受剪面积 (mm²)。

其中, 砂浆的抗压强度为 0.14 MPa, 环氧结构胶的抗压强度为 8.0 MPa。

HQ 系列试件的复合强度见表 4。

表 4 HQ 系列试件的复合强度

Table 4 The combined strength of HQ specimens

试件编号 No.	受剪面积 A/mm^2	结构胶受剪面积 A_1/mm^2	置换率 $\beta/\%$	复合强度 f/MPa
HQ2-1	60000	280	0.46	0.180
HQ2-2	60000	400	0.67	0.192
HQ2-3	60000	700	1.17	0.232
HQ4-1	60000	1575	2.63	0.347
HQ4-2	60000	625	1.04	0.222
HQ4-3	60000	800	1.33	0.244

表 4 中, 结构胶的受剪面积是 HQ 试件破坏后, 用网格尺对结构胶受剪面进行量取的有效面积。HQ 系列试件的抗剪强度试验结果见表 5。

表 5 HQ 系列试件的抗剪强度试验结果

Table 5 The results from HQ specimens in the shearing resistance test

试件编号 No.	受剪面积 A/mm^2	破坏荷载 P_u/kN	抗剪强度 f_v/MPa	破坏位移 l/mm
HQ2-1	60000	4.9	0.081	0.60
HQ2-2	60000	5.1	0.085	0.61
HQ2-3	60000	5.6	0.094	0.65
HQ4-1	60000	7.0	0.117	0.68
HQ4-2	60000	5.4	0.091	0.62
HQ4-3	60000	5.7	0.096	0.63

根据表 3、表 4 中的数据, 确定加入环氧结构胶砌体的抗剪强度值平均值 f_{vm} , 采用式 (6) 进行计算

$$f_{vm} = a\sqrt{f} \quad (6)$$

f_{vm} —试件的抗剪强度平均值 (N/mm^2);

a —待定系数;

f —砂浆抗压强度平均值 (N/mm^2)。

经过对试验值的回归分析, 得出加入环氧结构胶砌体的抗剪强度平均值为 $f_{vm} = 0.194\sqrt{f}$ 标准差 $s=0.0027$, 变异系数 $C_v=0.014$ 。

根据式 (1) 中的参数 k , 混凝土砌块为 0.069, 毛料石为 0.188, 加入环氧结构胶的砌体为 0.194。环氧结构胶可以提高砖石砌体的灰缝抗剪强度。

3 结论

(1) 提出了该种注胶加固砖石砌体的新方法。

(2) 揭示了两种不同胶在加固中的破坏模式, 即硅酮结构胶是大变形破坏、环氧结构胶是强度破坏。

(3) 提出了环氧结构胶与砂浆共同工作的抗剪极限强度计算方法。

参考文献

- [1] 侯卫东. 中国古代砖石建筑及其保护修复概述[J]. 中国文物科学研究, 2012(2):50-53
- [2] 宋 彧, 原国华, 周乐伟. 斜拉筋加固砌体结构抗震性能试验研究[J]. 建筑科技, 2009, 40(1):42-44
- [3] 胡 荻, 阿肯江·托呼提, 黄 斌. 钢丝网水泥砂浆加固土坯砌体抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(6):108-115
- [4] 杨 新. 中国古建筑维修保护价值观[J]. 中国文物科学研究, 2014(2):21-25
- [5] Lourenco PB, Ramos LF. Characterization of cyclic behavior of dry masonry joints[J]. Journal of Structural Engineering, 2004(4):779-786
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 50129-2011 砌体基本力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
- [7] 司林刚. 高强度硅酮结构胶在抗爆玻璃幕墙中的应用[J]. 中国建筑防水, 2015(17):22-26
- [8] 洪 林, 王天祯. 环氧树脂应用领域市场分析[J]. 热固性树脂, 2011, 26(3):54-58
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50003—2011 砌体结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011