

置换砂浆加固砌体在剪压复合受力下的试验研究

郑雪峰¹ 石建光¹ 谢益人² 郑煌典¹ 王新宇¹ 许志旭¹

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建厦门, 361005; 2. 厦门合立道工程设计集团股份有限公司, 福建厦门, 361005)

摘要 在满足历史建筑保护的要求下, 针对由砂浆性能退化引起的砌体结构安全性问题, 提出了置换部分原有砂浆恢复或增强砌体结构性能的置换砂浆加固砌体结构的方法。通过对置换砂浆前后、置换竖缝砂浆以及不同剪压比的砌体试件在剪压复合受力下的试验发现, 置换砂浆对提高砌体结构抗剪性能有明显影响, 提高幅度可以达到127.31%。置换竖缝砂浆的对比试验表明仅置换水平灰缝提高30.25%, 而同时置换水平与竖向灰缝承载力提高了127.31%。在水平与竖向都替换砂浆的情况下, 剪压比为1.483的试件承载力仅提高了0.92%, 而剪压比为2.373的试件承载力降低了27.54%。随着置换砂浆方式的不同, 破坏形式也发生改变。置换砂浆是一种非常有效的技术保护手段, 置换竖缝砂浆有明显效果, 剪压比增加, 加固效果降低。试验研究表明通过置换砂浆加固砌体结构是一种提高既有建筑结构安全性的有效措施。

关键词 置换砂浆 砌体结构性能 剪压作用 破坏形式

引 言

砌体结构是我国使用最多的结构形式, 尤其是一些历史保护性建筑的结构多为无筋砌体结构。在水平地震作用下, 由于墙体的抗剪能力较弱, 抗剪强度不足则成为引起砖砌体结构房屋破坏的主要原因。例如, 汶川地震和芦山地震中, 大量砌体结构房屋遭受破坏或倒塌。砌体结构在剪力作用下, 可能发生三种剪压破坏形式, 即沿水平灰缝破坏、沿齿缝破坏和沿阶梯形缝破坏。其中沿阶梯形缝破坏是在地震中砌体墙体最常见的破坏形式, 在外纵窗间墙尤为明显, 窗间墙X形裂缝是常见的破坏形式, 表现出明显的剪切破坏特征^[1]。根据砌体墙体地震中剪压受力的实际状态, 很多学者开展了相关的试验研究。

南昌大学土木工程系陈卓英等对红石砌体沿阶梯形截面的抗剪试验进行了研究。该试验试件为4片高宽比为0.6的长方形墙体, 由半细料红石砌块砌筑而成。该试验采用对角线加载的方法, 其试件墙体裂缝均首先在墙体中部的水平灰缝处出现, 并随荷载的增加, 沿水平与竖向灰缝呈阶梯状向加载对角线方向发展。红石砌体沿阶梯形截面抗剪的破坏形态与砖砌体基本相近。其抗剪强度主要

取决于灰缝砂浆与石块之间的切向黏接力，抗剪强度由砂浆的强度所控制^[2]。

黑龙江科技学院赵春香等对4片750mm（高）×750mm（宽）×235mm（厚）既有砌体墙片试件进行了对角加载剪压力学性能试验，测得了沿阶梯形缝的剪压破坏形态，对角压墙片破坏主要是沿对角加载方向首先出现阶梯形裂缝并继续发展贯穿而导致的^[3]。

上海理工大学彭斌等选取了3种组砌方式、2种灰缝厚度和10种压应力水平，通过特别设计的夹具对144个砖砌体试件进行了剪压破坏试验。当 σ_y/f_m 为0.40~0.70时，试件发生剪压破坏，其临界主裂缝明显，沿砌体中的2条水平灰缝开裂并贯穿中间砖块呈“之”字形，中间砖块处的裂缝与竖轴间的夹角约为 45° ^[4]。

本文研究置换部分原有砂浆恢复或增强砌体结构性能的置换砂浆加固砌体结构方法的有效性，开展了置换砂浆前后、置换竖缝砂浆以及不同剪压比的砌体剪压试验。

1 置换砂浆加固砌体试验的试件

1.1 试件设计

根据试验规范^[5, 6]、厦门大学结构实验室长柱试验机以及实际中砖的尺寸，设计了实际尺寸主要为700mm×700mm×225mm的剪压试件，试验试件如图1所示。

此次试验试件考虑的因素包括：①置换砂浆与未置换砂浆；②置换竖缝砂浆的影响；③不同剪压比的影响。由此一共设计了5个试件，具体试件参数如表1所示。

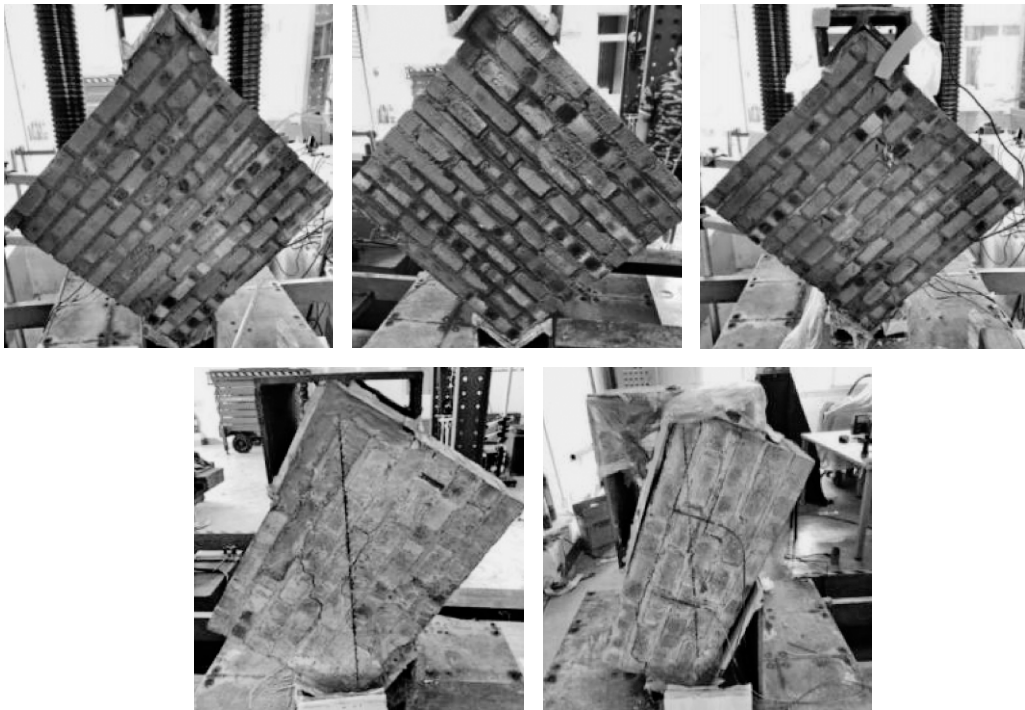


图1 试验试件图

表1 剪压试验试件设计

编号	L/mm	H/mm	B/mm	置换砂浆强度	竖缝影响	剪压比
1	700	700	225	—	—	1
2	700	700	225	M1	替换	1
3	700	700	225	M1	不替换	1
4	700	472	225	M1	替换	1.483
5	700	295	225	M1	替换	2.373

1.2 试件材料性能

1.2.1 砂浆的性能

此次试验用到的砂浆主要分为两种：模拟旧砂浆和水泥砂浆。模拟旧的黏土混合砂浆采用石灰、黏土、砂子、水配合而成，根据土工试验规范，分别在黏土砂浆硬化后拆模7天和28天后进行无侧限抗压试验，测得的平均抗压强度为0.625MPa。

替换用的水泥砂浆不仅需要满足强度的要求，还需要满足和易性和实际施工可行性的要求，因此对不同的配合比试验砂浆，除了进行抗压、抗折强度试验外，还测量了其收缩变形和稠度，并对是否泌水、水泥浆与沙子的黏聚进行肉眼观察。通过对各组砂浆7天和28天的变形测量，选定了一组砂浆的收缩率在允许范围内，达到了对于置换砂浆无收缩或微膨胀的要求，综合砂浆工作性和强度的测试，最终确定了砂浆配合比，置换砂浆的稠度为91.5mm，7天抗压强度为6.2MPa，28天抗压强度为11.1MPa。

1.2.2 砖的性能指标

砖的抗压强度平均值为12.31MPa，标准值为8.96MPa，变异系数0.15~0.21，根据规范《烧结普通砖》（GB/T 5101—2017）5.3可得，其强度等级为MU10。

1.3 试件制作

1.3.1 置换工艺

置换砂浆的工艺流程包括砂浆替换位置的确定、原有砂浆的清除、清除砂浆后的处理、墙体的污染防护、新砂浆的填入、新砂浆层的外部养护、新砂浆层的防护，部分工艺过程图如图2所示。

在根据墙体尺寸和受力状态确定了置换砂浆的位置之后，其主要的工艺流程可分为以下五个步骤：①掏缝；②清孔；③墙体保护；④灌浆；⑤人工压缝及美缝。置换时换缝的方式、换缝的长度、换缝的深度等需要根据墙体尺寸和受力状态确定。此次试验的试件均采用X形交叉换缝形式，深度为40mm。

1.3.2 试件养护过程

此次试验的试件砌筑由专业的砖工完成，置换砂浆过程由专业的小工完成。整批试件在室外养



图2 置换砂浆部分工艺过程图

护时间不少于28天，在此期间做好防雨防暴晒等措施。同时为了方便试验加载时捕捉裂缝，在每个试件的表面都抹上一层薄薄的白灰，方便观察，不影响强度。

2 置换砂浆加固砌体试验的现象和结果

2.1 破坏过程

此次试验采用位移控制，加载速度控制在0.5mm/min，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。试件在加载过程中首先与底座、顶座整体预紧，预紧阶段结束后，力-位移曲线的上升段斜率先较平缓后较陡峭，试件剪压承载力达到峰值后，试件灰缝内部裂缝迅速发展，试件承载力失效。试件失去承载力后，力-位移曲线呈直线剧烈下降，整个过程未出现明显的开裂声音，试件表面灰缝处裂缝也较不明显，未出现大裂缝，砖块未见明显断裂。以下为此次试验的5个试件具体破坏过程。

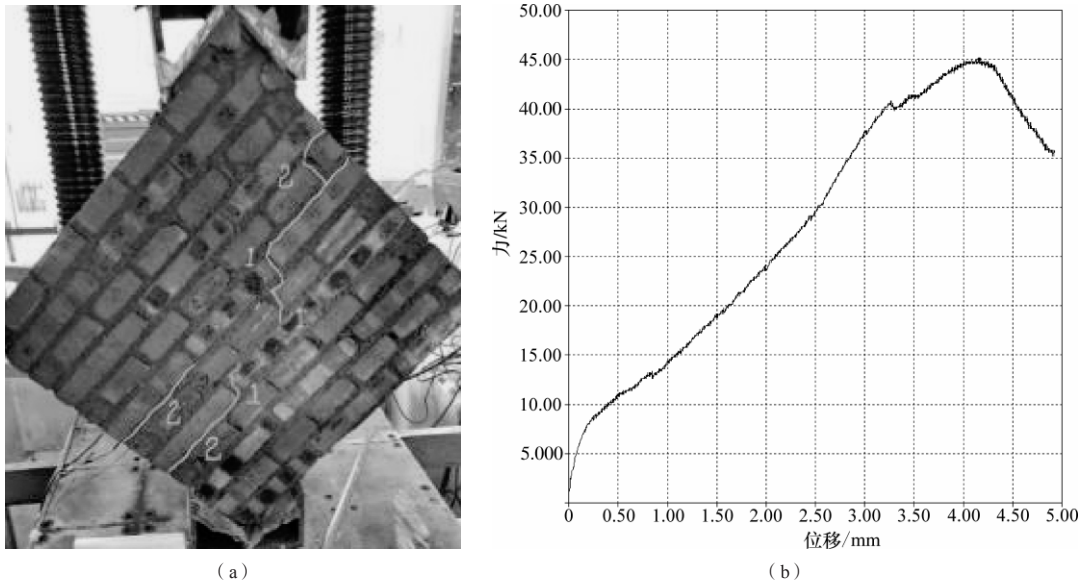


图3 1#试件裂缝图(a)及力-位移曲线图(b)

1#试件：为未置换砂浆的对照组。加载过程中，力加载到45kN之后不再上升，最后曲线呈直线剧烈下降，属于脆性破坏，整个过程未出现明显的开裂声音。同时，旧砂浆不断被压紧，裂缝集中在旧砂浆上，砖表面未见明显裂缝。旧砂浆上的裂缝发展顺序如图3(a)所示，主要集中在中间段，最先从中间区域竖缝开始发展，并向两边不断扩展，直至内部裂缝贯通，试件失去承载力，属于剪压破坏，并最终在试件的中间段呈一定的阶梯形状。

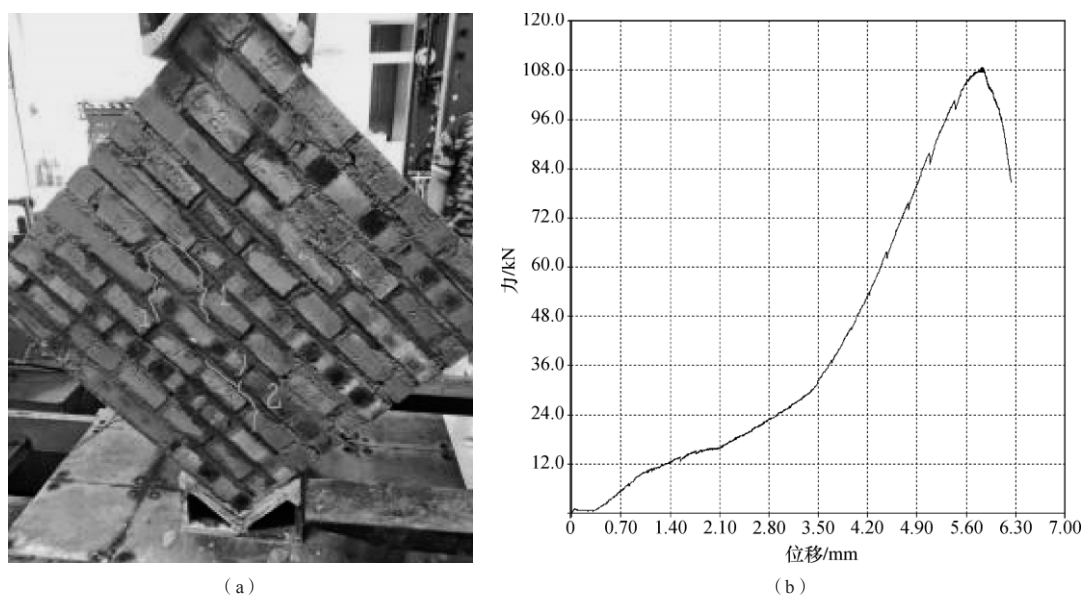


图4 2#试件裂缝图(a)及力-位移曲线图(b)

2#试件：为X形置换砂浆组。加载过程中，力上升到108.2kN为峰值，之后迅速呈直线下降，属于脆性破坏，整个过程未出现明显的开裂声音。同时，旧砂浆与置换砂浆均受到不同程度的挤压，由于加固区的强度和刚度比较大，所以裂缝主要集中在竖向中间段并且处于加固区，裂缝发展顺序如图4(a)所示，沿着灰缝发展，但表面未见明显的阶梯状和贯通裂缝，属于剪压破坏。

3#试件：为X形未置换竖缝组。加载过程中，力上升到62kN之后承载力不再上升，属于脆性破坏，整个过程未出现明显的开裂声音。同时，旧砂浆与置换砂浆均受到不同程度的挤压，由于加固区的强度和刚度比较大，但加固区未能形成有效的传力路径，所以裂缝主要集中在加固区与未加固区砂浆交界处，砖表面未见明显裂缝。且裂缝均从竖缝最先开裂，裂缝发展顺序如图5(a)所示，试件表面裂缝分布较为零散，未见明显的阶梯状和贯通裂缝，属于剪压破坏。

4#试件：剪压比为1.483。加载过程中，力上升到109.2kN之后承载力不再上升，属于脆性破坏，整个过程未出现明显的开裂声音。同时，旧砂浆与置换砂浆均受到不同程度的挤压，裂缝首先从加固区与未加固区砂浆处开裂，并最终形成贯通裂缝，砖表面未见明显裂缝。试件表面裂缝发展顺序如图6(a)所示，属于剪压破坏，裂缝呈一定的阶梯形状。

5#试件：剪压比为2.373。加载过程中，力上升到78.4kN之后承载力不再上升，属于脆性破坏，整个过程未出现明显的开裂声音。同时，由于试件的高宽比较小，X形加固区占比较大，所以裂缝直接从加固区砂浆处开裂，并最终形成贯通裂缝，砖表面未见明显裂缝。试件表面裂缝发展顺

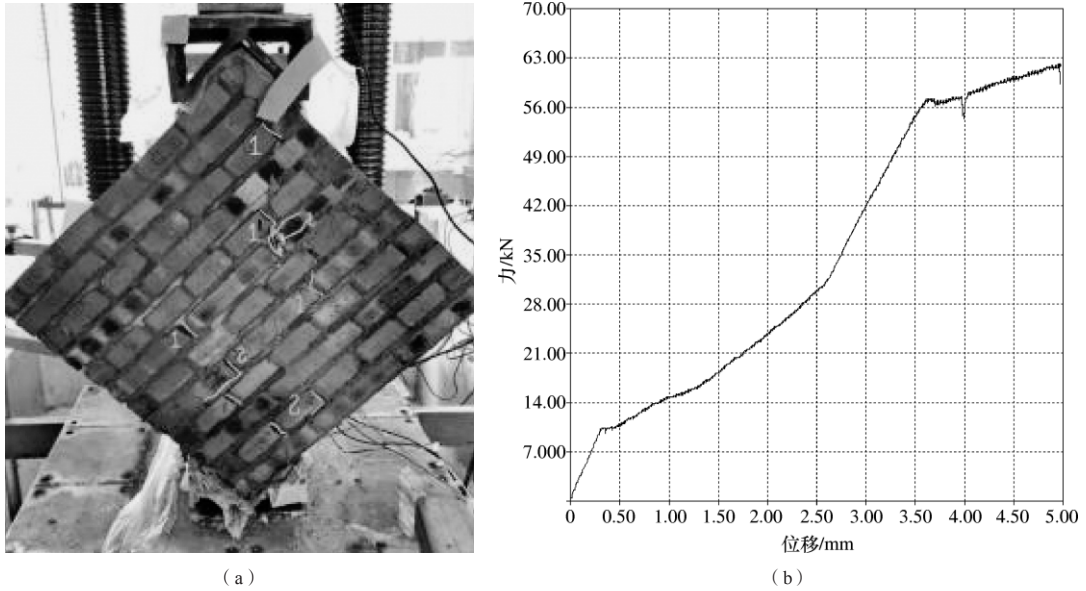


图5 3#试件裂缝图(a)及力-位移曲线图(b)

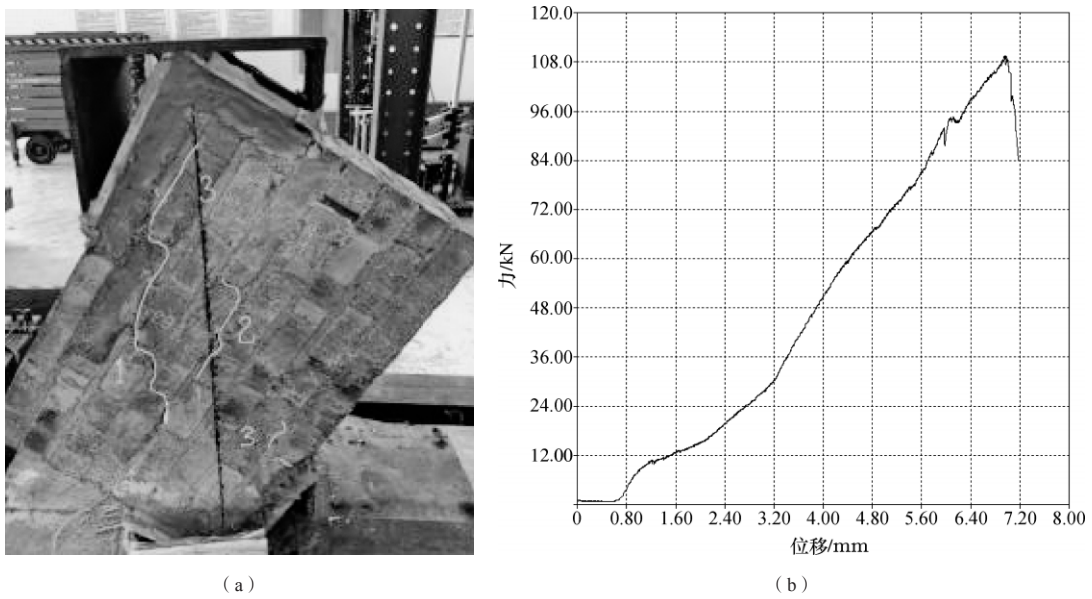


图6 4#试件裂缝图(a)及力-位移曲线图(b)

序如图7(a)所示,呈贯通裂缝破坏,未见明显阶梯形状,属于斜压破坏。

2.2 试验结果

本次试验试件的加载终值如表2所示。

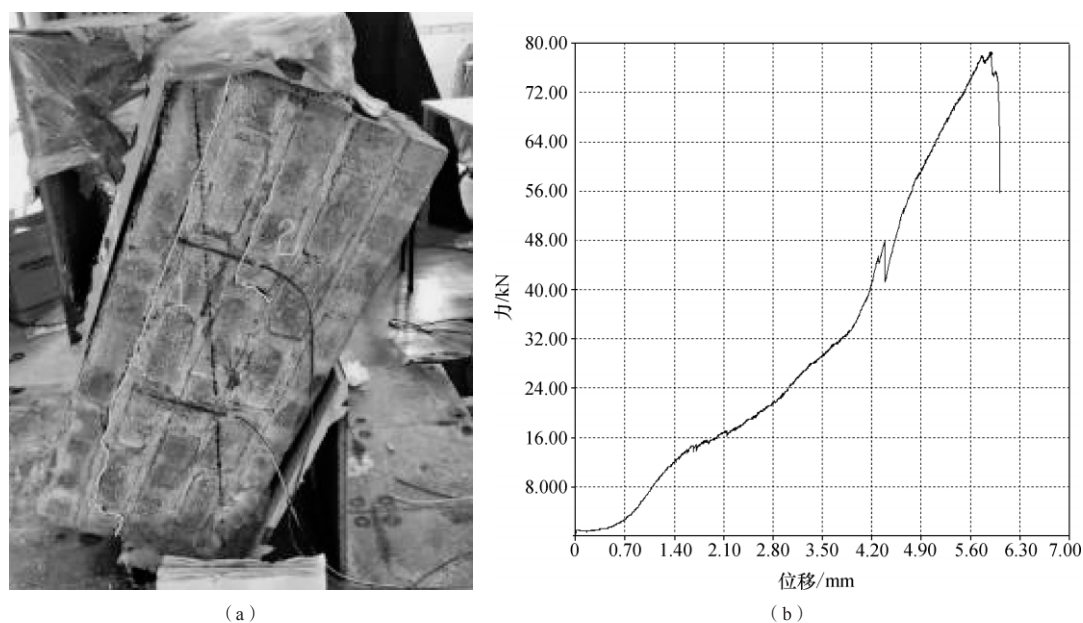


图7 5#试件裂缝图(a)及力-位移曲线图(b)

表2 剪压试验试件加载终值

编号	自变量	加载终值/kN	不同自变量下提高百分比/%		
			置换砂浆前后	置换竖缝砂浆	不同剪压比
1#	对照组1(24墙)	45	—	—	—
2#	X形40mm	108.2	140.44	140.44	—
3#	不置换竖缝	62		37.78	
4#	剪压比1.483	109.2			0.92
5#	剪压比2.373	78.4			-27.54

整理表2数据,可初步分析得到每个自变量下,置换砂浆所提高(或减少)的比例:

(1) 置换砂浆前后:对比1#和2#的数据,可以算出,2#替换了水泥砂浆之后的承载力提高了140.44%。

(2) 置换竖缝砂浆:对比1#、2#和3#的数据,可以算出,2#替换了竖缝的试件承载力提高了140.44%,3#未替换竖缝的试件承载力提高了37.78%。

(3) 不同剪压比:对比2#、4#和5#数据,可以算出,4#剪压比为1.483的试件承载力比2#剪压比为1的试件承载力升高了0.92%,5#剪压比为2.373的试件承载力比2#剪压比为1的试件承载力降低了27.54%。

结 语

从置换砂浆前后、置换竖缝砂浆以及不同剪压比的砌体试件在剪压复合受力下的试验中,我们可以发现试件在剪压复合受力的情况下,往往形成阶梯形裂缝而发生剪压破坏,是由于砌体单元所

受的主拉应力大于砌体的抗拉强度。而阶梯形裂缝最先从试件中部开始出现，慢慢向两侧发展直至承载力失效，内部裂缝贯通，外部裂缝未见明显贯通。根据主拉应力破坏理论可知，只要试件破坏的裂缝经过加固区，加固就有效果。从上面的数据可以看出：

(1) 经过置换砂浆X形加固后的试件的抗剪承载力明显提高，提高幅度可达140.44%。根据主拉应力理论，置换砂浆后，加固区的强度和刚度均变大，且形成了有效的传力路径，从而提高了抗剪承载力。

(2) 经过加固的试件，其中替换竖缝的试件承载力提高了140.44%，未替换竖缝的试件承载力提高了37.78%，前者比后者升高了102.66%，说明在竖缝饱满的情况下，竖缝直接影响传力路径，因此竖缝对剪压承载力的影响明显，故替换竖缝对加固效果具有较大影响。

(3) 不同剪压比，试件呈现出不同的破坏形态，大致可分为三种：剪摩破坏、剪压破坏、斜压破坏。此次试验中，剪压比为1.483的试件承载力最高，其次为剪压比为1的试件，最后为剪压比为2.373的试件。不同的剪压比呈现出不同的破坏形态。

参 考 文 献

- [1] 雷涛. 汶川地震和芦山地震中砌体结构房屋震害分析 [J] . 建筑与装饰, 2013, (23): 46-47.
- [2] 陈卓英, 刘漫漫, 虞锦晖. 红石砌体沿阶梯形截面的抗剪试验研究 [J] . 南昌大学学报 (工程技术版), 1994, 16 (3): 10-16.
- [3] 赵春香, 南景富. 既有砌体墙片对角加载受剪性能试验研究 [J] . 建筑科技, 2011, (11): 82.
- [4] 彭斌, 王冬冬, 宗刚, 等. 砖砌体材料压剪破坏准则试验研究及验证 [J] . 建筑材料学报, 2017, 20 (4): 586-591.
- [5] 四川省建设委员会. GBJ 129—90 砌体基本力学性能试验方法标准 [S] . 1990-01-01.
- [6] 美国材料与试验协会ASTM. E519/E519M—15 砌体组合中对角线张力 (剪切) 的标准试验方法 [S] . 2010-06-01.