

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.05.032

干砌甩浆石砌体抗压加固试验研究

王慧芳

(福建省泉州市住房和城乡建设局总工程师办公室, 福建 泉州 362000)

摘要:干砌甩浆石砌体是闽南地区石结构房屋常见的墙体类型之一,其整体性表现较差。钢筋网水泥砂浆面层加固法是砖砌体常用的加固方法之一,为了研究该方法对干砌甩浆石砌体的加固效果,对4个干砌甩浆石砌体加固试件进行了抗压试验。结果表明:素石砌体和加固石砌体在破坏前均有明显的征兆,钢筋网水泥砂浆面层加固法对提高石砌体初裂荷载作用不大,但对提高其极限承载力效果显著。

关键词:石砌体;干砌甩浆;钢筋网水泥砂浆面层;受力特性

中图分类号: TU317⁺.1; TU363

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)05—0187—05

Experimental Study on Compressive Reinforcement of Dry-laid Stone Masonry

WANG Huifang

(Office of Chief Engineer, Housing and Urban - Rural Development of Quanzhou of Fujian Province, Quanzhou, Fujian 362000, China)

Abstract: Dry-laid stone masonry is one of the common wall types of stone structure houses in southern Fujian. Its integrity performance is poor. Steel-meshed cement mortar splint is one of the commonly used reinforcement methods for brick masonry. In order to study the reinforcement effect of this method on dry-laid stone masonry, four dry-laid stone masonry specimens were tested under compression. The results show that both the stone masonry and the reinforced stone masonry have obvious signs before the damage. The reinforcement method of steel mesh cement mortar surface layer has little effect on improving the initial cracking load of stone masonry, but it has significant effects on improving its ultimate bearing capacity.

Keywords: stone masonry; dry-laid construction method; steel mesh cement mortar splint; force characteristics

福建省闽南地区现存有大量的石结构房屋,据统计,仅泉州地区的石结构房屋建筑面积达1.61亿m²,其中,干砌甩浆法是其石砌体最常见的砌筑方法之一^[1-2]。因干砌甩浆法的施工工艺特性,其石砌体灰缝中的砂浆多不饱满,石块间传力不均衡,再加上其砌筑砂浆常掺有不小比例的黄土,导致采用该砌筑方法的石砌体构件的整体性和承载力均大幅度降低。

目前,对于采用干砌甩浆法砌筑的石砌体,国内外学者已对其进行了一定的研究。柴振岭等^[3]、郭子雄等^[4-5]和许秀林等^[6]对干砌甩浆石砌体进行了轴心抗压、抗剪和低周往复等一系列加载试验,研究

了该类石砌体的抗压、抗剪和耗能等性能。施养杭等^[7-9]研究了石粉灌浆加固的石砌体进行了抗震性能研究。李梁峰^[10]和徐天航等^[11]对采用钢筋网砂浆面层加固的石砌体进行了一系列的抗震性能研究。胡奕东等^[12]、郭子雄^[13]和刘小娟等^[14]对采用钢筋-聚合物砂浆嵌缝法加固的石砌体构件进行了一系列的抗震性能研究。黄凯等^[15]提出了采用丁字销键拉结加固石砌体的方法,并进行了抗震性能研究。然而,对于采用钢筋网水泥砂浆面层加固的干砌甩浆石砌体的抗压性能的研究文献报道较少。

本文通过对采用钢筋网水泥砂浆面层加固的干

砌体浆石砌体进行抗压试验,研究其破坏形态和承载力等性能,为现有石砌体结构的加固改造提供参考。

1 试验概况

1.1 试件制作

(1) 石砌体砌筑。为使试验结果更贴近实际情况,粗料石取自泉州崇武当地民房拆除后所得的粗料条石,其尺寸约为 $1\ 000\ \text{mm} \times 200\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$;砌筑砂浆采用当地常见的自拌砂浆,其体积配合比为水泥:砂:白灰:黄土 = 1:2:2:2,实测其立方体抗压强度为 $0.4\ \text{MPa}$;垫块由大花岗岩石碎裂后所得。石砌体由当地匠人砌筑,共制作了 4 个石砌体试件,试件尺寸如表 1 所示。

(2) 石砌体加固。采用钢筋网水泥砂浆面层对石砌体进行加固,加固面层所用砂浆重量配合比为:水泥:砂 = 1:2,实测立方体抗压强度为 $22.2\ \text{MPa}$ 。加固面层横向钢筋为 $\Phi 6@150$,竖向钢筋如表 2 所示,钢筋材性试验结果如表 3 所示,横向与竖向钢筋采用点焊连接。

为了使加载过程中石砌体与加固面层能共同承担竖向荷载,在加固石砌体前,预先在石砌体顶部和底部分别增设钢筋混凝土分配梁。加固时,竖向钢筋上下端分别植入上下钢筋混凝土分配梁中。为模拟构件在实际中先承压后加固的应力水平,在加固前,对 S-2、S-3 两个石砌体用锚杆施加预 $0.8\ \text{MPa}$ 压应力的竖向荷载。加固后的试件截面尺寸如表 1 所示。

表 1 石砌体试件加固前后尺寸

试件编号	高度/mm	长/mm		宽/mm	
		加固前	加固后	加固前	加固后
S-1	1150	400	—	200	—
S-2	1160	380	535	200	305
S-3	1140	385	523	210	338
S-4	1180	435	530	215	300

表 2 石砌体试件加固规格及加压方式

试件编号	竖向钢筋	横向钢筋	加载方式	是否预压
S-1	—	—	轴压	否
S-2	10 Φ 10	$\Phi 6@150$	轴压	是
S-3	10 Φ 14	$\Phi 6@150$	轴压	是
S-4	6 Φ 14 + 4 Φ 10	$\Phi 6@150$	偏压	否

1.2 加载制度和测点布置

(1) 加载制度。试验在福州大学土木工程学院实验室进行,采用 $10\ 000\ \text{kN}$ 微机控制电液伺服拉

压试验机,其中素石砌体、S-2 和 S-3 采用轴压加载;S-4 采用偏压加载,现场加载装置如图 1 所示。

表 3 钢筋材性试验

钢筋直径/mm	弹性模量/ $10^5\ \text{MPa}$	屈服强度/MPa	屈服应变/ $\mu\epsilon$
10	167	330	1674
14	199	345	1758



图 1 试件加载装置

试验采用物理对中、分级均匀加载制度,具体加载步骤为:①按《砌体结构设计规范》中给出的公式对构件的破坏荷载进行预估;②预压后,卸载并记录试验数据,然后开始分级加载;③每次分级增加荷载为预估值的 10%,即 $5\ \text{t}$,在 $2\ \text{min}$ 内匀速施加,而后持载时间 $1\ \text{min}$,后再施加下一级的荷载;④当试件出现第一条裂缝时,改用位移控制进行加载,当承载力降低至原构件承载力峰值的 80% 时,判断该试件已经丧失承载能力达到破坏状态,最大荷载读数为该试件的破坏荷载值。

(2) 测点布置。在试验加载的过程中,分级记录竖向荷载、竖向变形。其中,加载荷载和试件竖向变形由试验机直接读出,构件变形由粘贴在构件内外的应变片读出,构件加固后内部的条石位移则有百分表读出。加固面层外砂浆表面应变片(C1—C4)和百分表(B1—B4)布置位置如图 2 所示,面层内钢筋应变测点位置如图 3 所示,其中 S1—S6 为测量竖向钢筋的应变片,H1—H2 为测量横向钢筋的应变片。

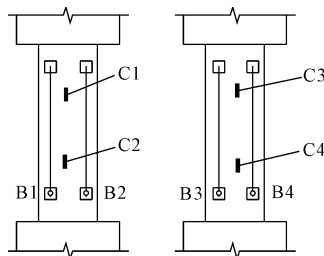


图 2 加固面层外应变片和百分表布置示意图

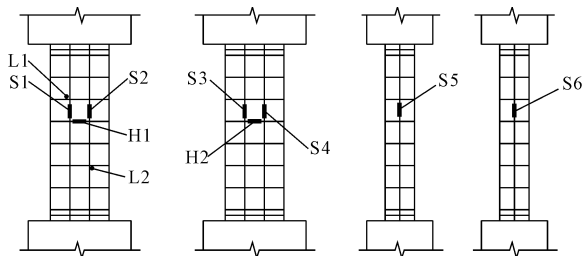


图3 加固面层内钢筋应变片布置示意图

2 试验现象

(1) 试件 S-1。试件 S-1 为素石砌体,在荷载为 399.9 kN 时,发出清脆破碎响声,在构件短边顶部出现第一条竖向裂缝(见图 4);随着加载的进行,第三、四匹石块发生明显错位,第一、二和四匹石块产生裂缝并持续扩大;荷载为 671.0 kN 时,构件短边出现竖向通缝,此时构件已经不能再作为受力构件继续承载,认为已经到达素石砌体的极限承载状态。



(a) 初裂状态 (b) 极限状态

图4 试件 S-1 初裂和极限状态

(2) 试件 S-2。试件 S-2 在荷载为 449.0 kN 时,短边一侧构件顶部出现裂缝,并不断向下蔓延;当荷载达到 800.0 kN 时,构件另一侧短边砂浆鼓曲,两侧短边和长边交界处均出现加固面层脱开现象;荷载为 915.0 kN 时,构件长边顶部砂浆大量掉落(见图 5),承载力下降达 80% 以上,可判定构件破坏,期间峰值荷载为 960.1 kN。

剔除面层水泥砂浆后,可见该试件长边中部钢筋屈曲,短边中偏下部钢筋屈曲,石材基本完整,砌筑砂浆全部压碎,如图 6 所示。

(3) 试件 S-3。试件 S-3 在加载力为 449.0 kN 时,长边上部和下部均出现竖向裂缝,之后裂缝主要在上部出现,并向下蔓延;荷载为 1 262.0 kN 时,构件顶部砂浆掉落,底部砂浆开裂;荷载为 1 270.0 kN 时,构件短边一侧砂浆鼓曲,面层脱开;荷载为 1 314.4 kN 时,构件承载力开始出现下降,

并一度下降至 1 081.0 kN,随后继续上扬至峰值 1 634.8 kN,期间构件不断发出脆响,砂浆大量掉落并漏出内侧钢筋(见图 7),面层分离,短边一侧出现巨大竖向通缝;构件承载力掉落至 80% 后,可判定构件已经破坏。

剔除面层水泥砂浆后,可见该试件长边顶部钢筋屈曲,短边顶部钢筋屈曲;石砌体长边多条贯穿裂缝,短边石材多处压碎,如图 8 所示。



图5 试件 S-2 极限状态



图6 试件 S-2 面层剔除后状况



图7 试件 S-3 极限状态



图8 试件 S-3 面层剔除后状况

(4) 试件 S-4。S-4 在加载力为 443.0 kN 时,偏心一侧砂浆隆起;荷载为 600.0 kN 时,构件远离加载端一侧短边出现横向裂缝,荷载为 670.0 kN 时,构件长边一侧砂浆崩落,横向钢筋暴露;持载阶段,靠近加载侧短边处砂浆鼓起,随后露出内侧钢筋,荷载为 730.0 kN 时,长边一侧钢筋屈曲并露出;荷载为 970.0 kN 时,构件完全破坏(见图 9、图 10)。

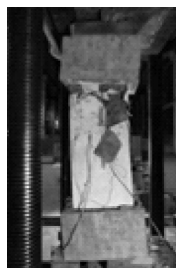


图9 试件 S-4 极限状态

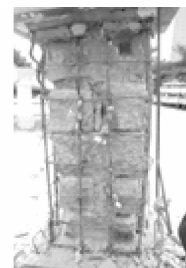


图10 试件 S-4 剔除面层后状况

3 结果分析

3.1 承载力分析

提取试件竖向荷载-应变曲线如图 11 所示,试

件主要结果如表 4 所示,由此可知:

(1) 相比于未加固石砌体 S-1,采用钢筋网水泥砂浆加固的试件 S-2 和 S-3 的极限承载力分别增长了 43% 和 143%,说明该加固方法对提高试件承载力效果显著。

(2) 在素石砌体各项参数保持不变的前提下,加固面层配筋的多少和加载方式的改变,对试件的初裂荷载无明显作用,其初裂荷载始终稳定在 440 kN ~ 450 kN 之间。

(3) 通过比较试件 S-2 和 S-3 的极限荷载与初裂荷载的比值可以发现:配筋量越大,构件从开裂到破坏有越长的延展空间。

(4) 偏心加压方式将显著降低试件的极限承载力。

(5) 未加固试件的荷载 - 应变曲线的斜率远小于加固试件,说明加固面层对试件的抗压刚度贡献较大。

表 4 试件初裂荷载和极限荷载

试件编号	初裂荷载 /kN	极限荷载 /kN	极限荷载 初裂荷载
S-1	399.94	671.00	1.67
S-2	449.71	960.05	2.13
S-3	444.90	1634.82	3.67
S-4	443.71	970.05	2.19

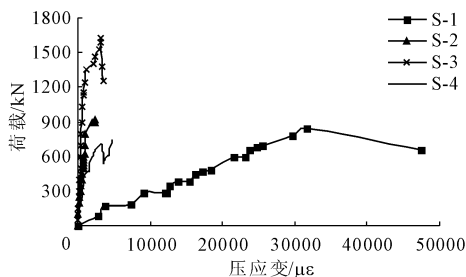


图 11 试件荷载 - 应变曲线

3.2 竖向钢筋应变

图 12 为加固试件部分竖向钢筋应变与加压荷载之间的变化曲线,由图 12 可知:

(1) 试件 S-2 开裂前,竖向钢筋应变与加压荷载基本呈线性关系;试件初裂后,竖向钢筋应变先急剧增大或减小,后又与加压荷载约呈线性变化,其主要是由于试件开裂后,加固面层刚度急剧减小,试件内部发生应力重分布,部分钢筋的大部分应力被卸除转由其他部分承担,直至试件破坏。

(2) 试件 S-3 竖向钢筋应变与试件 S-2 变化趋势不同。试件初裂后,竖向钢筋应变基本上没有

发生太大的突变情况,开裂前后曲线斜率基本一致;当加载至 1 200 kN 时,竖向钢筋应变发生突变,其平均应变约为 $800 \mu\epsilon$;其后在小幅度增荷期间,个别竖向钢筋应变迅速增大直至屈服,其主要与该阶段加固面层砂浆的开裂和脱落有关。

(3) 试件 S-4 在试件初始开裂前,偏心侧竖向钢筋应变变化较大,与加压荷载呈非线性变化;远离偏心侧竖向钢筋应变较小,其荷载 - 应变曲线基本呈竖线向上升。试件开裂后,钢筋应变增大速率明显加快,远离偏心侧竖向钢筋由受压状态直接转为受拉状态,与偏心侧受压钢筋几乎同时达到屈服。

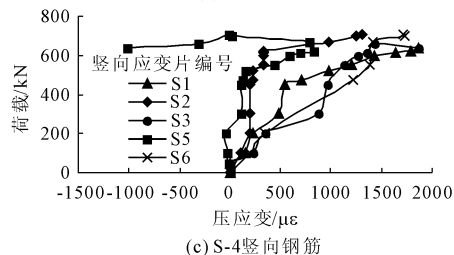
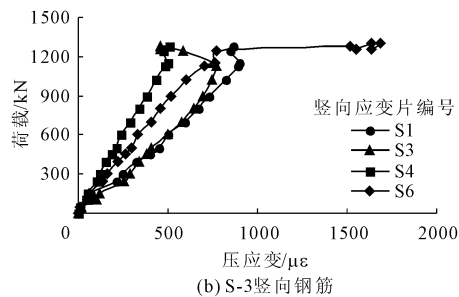
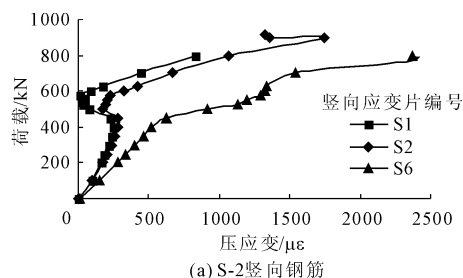


图 12 竖向钢筋荷载 - 应变曲线

3.3 横向钢筋应变

提取试件加固面层部分横向钢筋的应变如图 13 所示,由图 13 可知:

(1) 试件初始开裂前,横向钢筋应变较小,最大值仅为 $300 \mu\epsilon$,其增长幅度也相对较为缓慢,说明试件开裂前,横向钢筋参与受力程度较小;除偏心受压试件 S-4 的横向钢筋应变有小幅度突变外,其余试件横向钢筋荷载 - 应变曲线均较为平缓。

(2) 试件初始开裂后,因加固面层的开裂和外鼓失稳,各试件的部分横向钢筋应变增长幅度明显变大,有的甚至发生急剧突变情况。试件破坏时,各

试件横向钢筋的应变基本均达到了屈服状态。

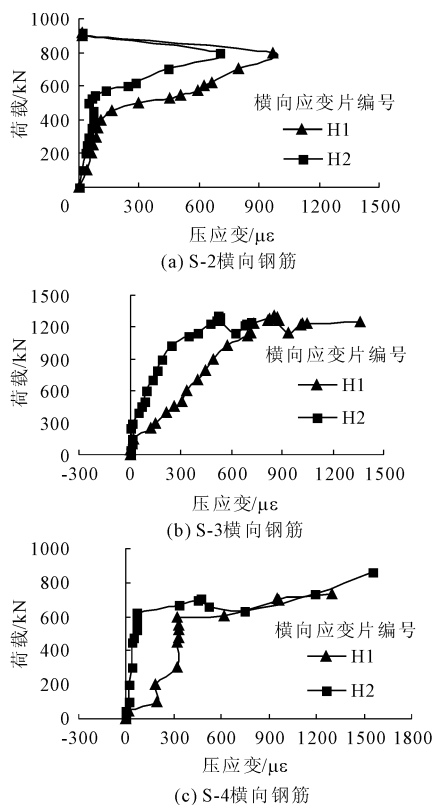


图13 横向钢筋荷载-应变曲线

4 结论

根据前述试验分析,本文可得出以下结论:

(1) 素石砌体和采用钢筋网水泥砂浆面层加固的石砌体在破坏前均有明显的征兆,其中,加固试件的破坏征兆荷载段明显高于素石砌体。

(2) 钢筋网水泥砂浆面层对石砌体初裂时的抗压承载力影响不大,但对其极限承载力有显著提高。

(3) 加固面层竖向钢筋在试件开裂前,其应力与加压荷载基本呈线性关系;试件开裂后,竖向钢筋应力呈非线性变化,到一定荷载时会出现突变情况;试件破坏时,竖向钢筋均能达到屈服。

(4) 加固面层横向钢筋在试件开裂前,其参与受力程度较小;试件开裂后,横向钢筋的应变急剧增大,其对试件横向约束作用明显。

参考文献:

- [1] 王慧芳. 泉州地区石结构房屋现状调查分析[J]. 福建建筑,2018(11):34-37.
- [2] 张颖,王辉山,蔡辉腾,等. 福建沿海石结构房屋抗震性能调查与分析[J]. 内陆地震,2016,30(3):211-220.
- [3] 柴振岭,郭子雄,胡奕东,等. 干砌甩浆砌石墙通缝抗剪强度试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,31(S2):340-344.
- [4] 郭子雄,柴振岭,胡奕东,等. 条石砌筑石墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(3):57-63.
- [5] 郭子雄,柴振岭,胡奕东,等. 机器切割料石砌筑石墙灰缝构造及抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(3):64-68.
- [6] 许秀林,郭子雄,柴振岭,等. 条石砌体轴心受压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2017,38(12):148-153.
- [7] 施养杭. 石粉在石砌体结构抗震加固中的应用研究[D]. 天津:天津大学,2003.
- [8] 施养杭,林建华. 新型灌浆材料在砌体抗震加固中的应用及其可靠性研究[J]. 建筑结构学报,2005,26(4):117-122.
- [9] 施养杭,余建星,华建兵. 石粉灌浆石砌体的抗震抗剪强度及其应用研究[J]. 世界地震工程,2004,20(1):29-34.
- [10] 李梁峰. 钢筋网水泥砂浆面层加固石墙抗剪性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(2):140-146.
- [11] 徐天航. 钢筋网片-改性砂浆加固石墙抗震性能研究[D]. 泉州:华侨大学,2016.
- [12] 胡奕东,郭子雄,柴振岭,等. 嵌缝加固条石砌筑石墙的抗震性能初探[J]. 工程抗震与加固改造,2009,31(6):24-27,41.
- [13] 郭子雄,柴振岭,胡奕东,等. 嵌缝加固条石砌筑石墙抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(S1):136-141.
- [14] 刘小娟. 钢筋-聚合物砂浆嵌缝加固石墙抗震性能试验研究[D]. 泉州:华侨大学,2011.
- [15] 黄凯,陈潇魁,王雷. 丁字销键拉结加固干砌条石墙抗震性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(6):195-201.