

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201903019



# 机锯条石砌筑灰缝的抗剪性能试验

庄思思, 郭子雄, 柴振岭

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以砂浆强度和压应力为主要参数,对 12 片水泥砂浆砌筑机锯条石石墙进行单调双剪静力加载试验,研究石墙灰缝的破坏过程和抗剪机理.试验结果表明:试件灰缝都呈现显著的剪切脆性破坏,破坏过程可分为弹性、开裂和摩擦滑移 3 个阶段;在弹性阶段,切应力-位移曲线近似线性关系,开裂后应力仍增加,直至灰缝形成通缝,应力明显下降并稳定在一定范围,承载力仅由砂浆与石材间的摩擦强度承担;灰缝抗剪强度随着压应力或砂浆强度的增加而增加,压应力的效应更显著;对试验数据进行回归分析,得到水泥砂浆砌机锯条石砌筑灰缝抗剪强度计算公式.

**关键词:** 石砌体; 机锯条石; 抗剪强度; 破坏模式

**中图分类号:** TU 363 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)04-0489-05

## Experimental Investigation of Shear Capacity of Sawn Stone Masonry Joint

ZHUANG Sisi, GUO Zixiong, CHAI Zhenling

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Taking the mortar strength and compressive stress as the main parameters, 12 sawn stone walls with mortar joint were tested under monotonic static loading, to investigate the failure process and shear mechanism. The results indicate that the failure mode of all walls is brittle, including 3 stages, the elastic, the cracking and the friction-sliding stages; in the elastic stage, the shear stress-displacement curve is nearly linear, in the cracking stage, the shear stress still increases, after the penetrating crack is formed, the shear stress decreases obviously, then stabilizes at a certain range, the load-carrying capacity is only provided by the friction strength between mortar and stone; as the compressive stress and mortar strength increase, the shear strength of mortar joint increases, but the effect of compressive stress is more significant; the formula for the shear strength between mortar strength and compressive stress is presented based on the regression analysis of the test results.

**Keywords:** stone masonry structure; sawn stone masonry; shear strength; failure modes

石结构房屋是我国村镇住宅的主要结构形式<sup>[1-3]</sup>. 石材作为最古老的建筑材料之一,具有取材方便、坚固耐久、质朴美观等优点,对不同加固方式砌筑下石墙抗震性能试验的研究表明<sup>[4-7]</sup>,遭受外力作用时,石砌块本身破坏程度不大,灰缝是石结构中最为脆弱的部位.刘木忠<sup>[8]</sup>研究表明,料石砌体的灰缝抗剪强度主要是由石砌体的粘结强度与砂浆强度决定.在此基础上,柴振岭等<sup>[9-10]</sup>开展了干砌甩浆粗料石墙体和有垫片铺浆砌筑石墙灰缝抗剪性能试验,并提出相应的灰缝抗剪强度公式.刘小娟等<sup>[11]</sup>对聚合物砂浆嵌缝加固后的干砌甩浆石墙灰缝进行抗剪试验,研究加固对石墙通缝抗剪承载力的影响.黄群贤

**收稿日期:** 2019-03-08

**通信作者:** 庄思思(1986-),女,实验员,主要从事工程结构抗震防灾的研究. E-mail: hutaojiazi@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 福建省科技计划重大项目(015Y4007);福建省自然科学基金资助项目(2015J01212)

等<sup>[12]</sup>对干砌浆粗料石墙体灰缝进行抗剪试验后,提出基于库伦剪摩理论灰缝抗剪强度计算公式,并对其可靠性进行分析. Vasconcelos 等<sup>[13]</sup>考虑砂浆灰缝含水率的影响,对干砌灰缝与砂浆砌灰缝的抗剪性能进行试验研究. 近年来,随着石材的开采和切割加工技术的改进,学者提出新型机器切割加工石材的技术. 然而,机器切割石材使界面光滑平整,会影响石材和灰缝之间的粘结抗剪性能. 郭子雄等<sup>[14]</sup>对新型机器切割条石无垫片砌筑石墙进行抗震性能试验,研究表明,机锯细料石墙的抗剪极限荷载较传统粗料石墙有大幅度提高,但后期退化快、延性差,剪力键对承载力提高效果不明显. 基于此,郭子雄等<sup>[15]</sup>进行水泥净浆砌筑机锯石墙灰缝抗剪性能试验,研究不同砂浆强度、压应力和界面处理方式对石墙灰缝抗剪性能的影响. 但水泥净浆并非常用的传统砂浆,在实际工程中极少使用,且试验结果表明,灰缝强度退化很快. 因此,有必要展开有关机器切割条石砌体灰缝抗剪性能的研究. 本文利用新型机器切割技术对石材进行规整切割加工,对 12 片水泥砂浆砌筑机器切割条石砌体试件进行单调双剪静力试验,分析灰缝的抗剪机理与破坏过程,并与传统粗料石石墙灰缝的抗剪性能<sup>[9-10]</sup>进行对比.

## 1 试件概况

### 1.1 试件设计和制作

设计 12 片水泥砂浆砌筑机器切割条石砌体试件,试件的主要参数和试验结果,如表 1 所示. 表 1 中:MSWF1~6 为不同试验参数对应的试件编号,每组 2 个试件; $\sigma_n$  为压应力; $f_m$  为水泥砂浆强度; $V_{\max}$  为最大剪力; $\tau_{\max}$  为抗剪强度极限值; $\Delta_{cr}$  为灰缝开裂时的水平滑移量; $\Delta_{\max}$  为峰值荷载对应的灰缝水平滑移量; $\kappa_1$  表示试验结束时,灰缝的残余抗剪能力, $\kappa_1 = \tau_u / \tau_{\max}$ , $\tau_u$  为抗剪强度残余值; $\bar{V}_{\max}$ , $\bar{\tau}_{\max}$ , $\bar{\tau}_u$ , $\bar{\kappa}_1$  分别表示各参数的平均值.

表 1 石墙的主要参数和试验结果

Tab. 1 Main parameters and test results of walls

试件编号	$\sigma_n$ /MPa	$f_m$ /MPa	$V_{\max}$ /kN	$\tau_{\max}$ /MPa	$\bar{V}_{\max}$ /kN	$\bar{\tau}_{\max}$ /MPa	$\Delta_{\max}$ /mm	$\Delta_{cr}$ /mm	$\bar{\tau}_u$ /MPa	$\bar{\kappa}_1$ /%
MSWF1-1	0.1	23	68	0.596			0.93	0.65		
MSWF1-2	0.1	23	70	0.614	69.0	0.605	1.75	0.80	0.135	23.1
MSWF2-1	0.3	23	95	0.833			1.42	0.56		
MSWF2-2	0.3	23	103	0.904	99.0	0.868	2.11	1.44	0.257	30.4
MSWF3-1	0.5	23	148	1.298			2.60	0.87		
MSWF3-2	0.5	23	153	1.342	151.5	1.320	2.12	2.11	0.471	36.2
MSWF4-1	0.1	16	67	0.588			1.31	0.57		
MSWF4-2	0.1	16	63	0.553	65.0	0.570	1.50	0.55	0.185	34.7
MSWF5-1	0.3	16	77	0.675			0.93	0.81		
MSWF5-2	0.3	16	83	0.728	80.0	0.702	0.70	0.34	0.218	31.8
MSWF6-1	0.5	16	106	0.930			1.50	0.62		
MSWF6-2	0.5	16	100	0.877	103.0	0.904	1.30	0.60	0.400	45.7

试件由 3 块机器切割花岗岩条石叠砌形成双剪试件,石材的轴心抗压强度为 101.8 MPa. 试件的尺寸为 200 mm×225 mm×570 mm,灰缝的厚度约为 5 mm,上、下条石与中间条石之间错开 30 mm. 水泥砂浆试件石墙的尺寸和实物图,如图 1 所示.

### 1.2 试验加载

采用平推双剪的加载方式,首先,利用电动稳压油泵,将液压千斤顶在石墙上压板施加竖向荷载,保持荷载恒定;然后,利用高精度液压千斤顶进行水平匀速加载,加载速率控制在 5 kN·min<sup>-1</sup>. 加载装置,如图 2 所示.

水平与竖向荷载均采用压力传感器数据传输,灰缝(剪切面)水平剪切位移利用位移传感器进行量测,精度为 0.01 mm. 借助 DH3817 型静态应变测试仪,全程采集数据,并对裂缝进行观测,做好相应记录,破坏状态以试件出现灰缝剪切滑移且荷载急剧下降为标志.

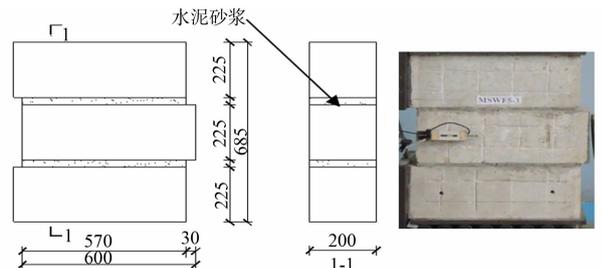


图 1 水泥砂浆石墙(单位:mm)

Fig. 1 Cement mortar walls (unit: mm)

## 2 结果与分析

### 2.1 试件的破坏过程

所有试件的破坏都发生在条石界面和灰缝的粘结处,属于脆性的剪切破坏.初始裂缝发生在灰缝的上表面与石材的粘结处,这主要是由于在养护和安装就位的搬运过程中,容易造成试件损伤.灰缝的破坏过程分为弹性、开裂和摩擦滑移 3 个阶段.在加载的初始阶段,水平灰缝变形均较小,伴有灰缝内部细微砂浆劈裂的声响.灰缝在低压应力( $\sigma_n = 0.1 \text{ MPa}$ )的作用下,试件一旦开裂,裂缝沿水平方向迅速延伸形成通缝,承载力快速下降;当压应力( $\sigma_n$ 为 0.3, 0.5 MPa 时)较大时,试件灰缝开裂较晚,裂缝发展比较慢,直到加载后期灰缝裂通,并在灰缝的角部和中部出现砂浆剥落、外鼓的现象,如图 3 所示.

由表 1 可知:当剪切位移为 0.34~2.11 mm 时,灰缝开裂,承载力仍有些许增加.由于摩擦作用,灰缝裂通后,试件承载力下降到一定值,且维持不变,试件峰值荷载对应的水平位移滑行量在 0.70~2.60 mm 之间.传统粗料石墙的灰缝破坏过程<sup>[9-10]</sup>则主要分为开裂前的弹性阶段和开裂后的摩擦滑移阶段,它具有一定延性,当灰缝裂通时,水平承载力即达到峰值,水平滑移快速增加,但承载能力保持不变或有所下降.这与上述试件的破坏过程存在明显的差异.

### 2.2 结果分析

不同试件的切应力( $\tau$ )-位移( $\Delta$ )曲线,如图 4 所示.由图 4 可知:加载初期,切应力-位移曲线基本呈线性关系,灰缝处于弹性变形阶段,变形很小,不超过 2.11 mm,此时,抗剪强度由石材界面本身的剪切摩擦强度与石材砂浆之间粘接强度共同承担,石材界面平整,界面的剪切摩擦强度很低,灰缝的砂浆强度较高,灰缝剪切粘结强度也较高;当灰缝开裂后,灰缝抗剪强度仍有些许增加,直至灰缝形成通缝,粘结强度完全丧失,强度急剧退化,此时,承载力由砂浆与石材间的摩擦强度承

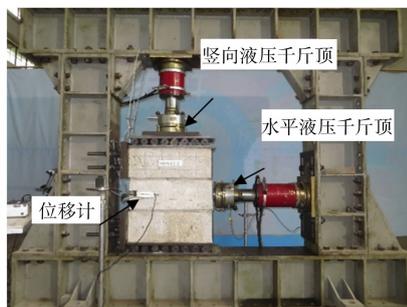


图 2 试验装置  
Fig. 2 Test setup



图 3 灰缝典型破坏形态  
Fig. 3 Typical failure mode of mortar joint

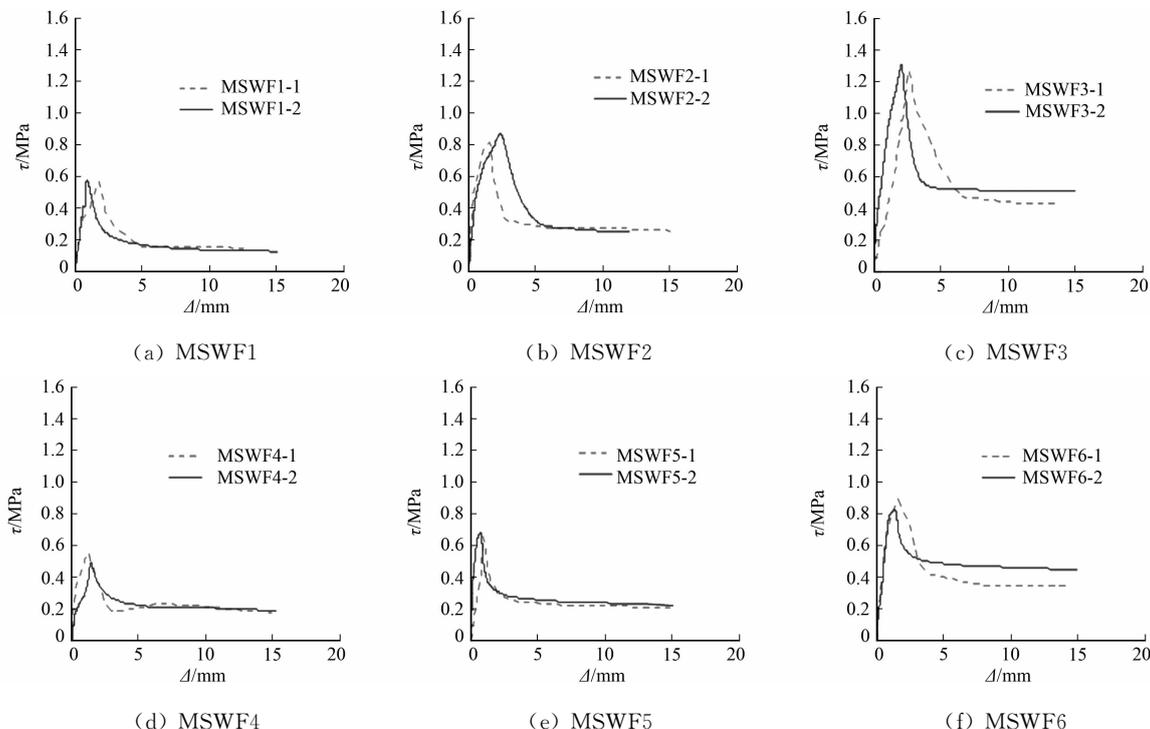


图 4 不同试件的切应力-位移曲线

Fig. 4 Shear stress-displacement curves of different specimens

担,抗剪强度明显下降,并稳定在一定范围(不低于抗剪强度极限值的23%)。

传统粗料石石墙灰缝切应力-位移曲线<sup>[10]</sup>,如图5所示。由图5可知:在达到最大承载能力后,存在明显的摩擦滑移阶段,承载能力保持不变或略微下降。

由表1还可知:通缝后,残余抗剪强度主要受压应力的影响,砂浆强度的提高对残余抗剪强度变化量的影响不明显。将表1中每组试件的灰缝极限抗剪强度平均值作为该组试件的极限抗剪强度值,绘制压应力-切应力的关系曲线,结果如图6所示。由图6可知:灰缝抗剪强度随着压应力和砂浆强度的增加而增加。当压应力由0.1 MPa提高到0.3 MPa时,MSWF2组的灰缝极限抗剪强度较MSWF1组提高了45%,MSWF5组的极限抗剪强度较MSWF4组提高了23%;当压应力由0.3 MPa提高到0.5 MPa时,MSWF3组的极限抗剪强度较MSWF2组提高了52%,MSWF6组的极限抗剪强度较MSWF5组提高了29%;当砂浆强度由16 MPa提高到23 MPa时,MSWF4组的极限抗剪强度较MSWF1组提高了6%。同理可得,MSWF5组的极限抗剪强度较MSWF2组提高了23%,MSWF6组的极限抗剪强度较MSWF3组提高了46%。由此可认为,压应力对灰缝抗剪强度的影响效果显著,砂浆强度对灰缝抗剪强度的影响次之。

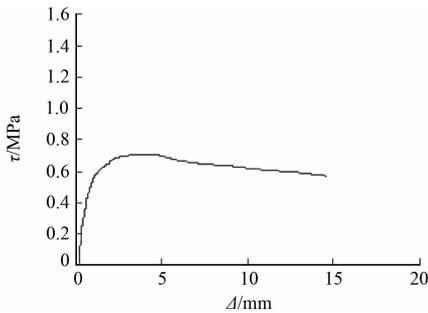


图5 传统粗料石石墙切应力-位移曲线  
Fig. 5 Shear stress-displacement curve for the traditional coarse stone wall

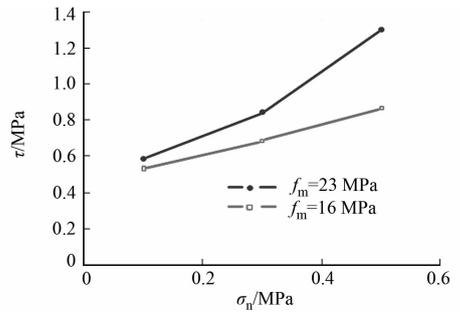


图6 压应力和砂浆强度对抗剪强度的影响  
Fig. 6 Effect of compressive stress and mortar strength on shear strength

### 2.3 灰缝抗剪强度建议公式

对试验数据进行回归分析,得到水泥砂浆砌机锯条石石墙灰缝抗剪强度的计算公式,即

$$\tau = 0.114 \sqrt{f_m} + 0.909 \sigma_n \quad (1)$$

机锯条石砌体灰缝抗剪强度的实测值和理论值的比较,如表2所示。表2中: $\tau_c$ 表示抗剪强度理论值; $\tau_E$ 表示抗剪强度实测值。

表2 机锯条石砌体灰缝抗剪强度的实测值和理论值的比较

Tab. 2 Comparison between calculation results and theoretical results of mortar joint shear strength for sawn stone walls

试件编号	$\sigma_n$ /MPa	$f_m$ /MPa	$\tau_E$ /MPa	$\tau_c$ /MPa	$\tau_c/\tau_E$
MSWF1-1	0.1	23	0.596	0.638	1.070
MSWF1-2	0.1	23	0.614	0.638	1.038
MSWF2-1	0.3	23	0.833	0.819	0.984
MSWF2-2	0.3	23	0.904	0.819	0.906
MSWF3-1	0.5	23	1.298	1.001	0.771
MSWF3-2	0.5	23	1.342	1.001	0.746
MSWF4-1	0.1	16	0.588	0.547	0.930
MSWF4-2	0.1	16	0.553	0.547	0.989
MSWF5-1	0.3	16	0.675	0.729	1.079
MSWF5-2	0.3	16	0.728	0.729	1.001
MSWF6-1	0.5	16	0.930	0.910	0.979
MSWF6-2	0.5	16	0.877	0.910	1.038

由表2可知:除了试件组MSWF3外,其他试件组的理论结果和实测结果的比较值均在误差的允许范围内,理论结果和实测结果相吻合,可为工程实践与设计提供设计依据。

### 3 结论

1) 水泥砂浆砌机锯条石石墙灰缝呈现显著的剪切脆性破坏.灰缝破坏过程可分弹性、开裂和摩擦滑移3个阶段.由于摩擦作用,试件承载力下降到一定值后,会维持不变.

2) 在加载初期,切应力-位移曲线基本呈线性关系,灰缝处于弹性变形阶段,在剪切位移为0.34~2.11 mm时,灰缝开裂.灰缝开裂后,应力仍增强,直至灰缝形成通缝,应力明显下降并稳定在一定范围,试件抗剪强度极限值对应的灰缝位移在0.70~2.60 mm之间,此时,砂浆与灰缝的粘结强度完全丧失,承载力仅由砂浆与石材间的摩擦强度承担.与传统粗料石石墙灰缝进行对比,其破坏过程及抗剪机理存在明显的差异.

3) 随着压应力或砂浆强度的增加,灰缝抗剪强度增加.压应力对灰缝抗剪强度的影响效果显著,砂浆强度对灰缝抗剪强度的影响次之.

4) 对试验数据进行线性回归,得到水泥砂浆砌机锯条石砌体灰缝抗剪强度的计算公式.计算结果表明:实测结果和理论结果吻合良好.

以上内容可在实际工程中为机器切割条石的加工工艺提供设计依据.

### 参考文献:

- [1] 周云,郭永恒,葛学礼,等.我国石结构房屋抗震性能研究进展[J].工程抗震与加固改造,2006,28(4):105-110. DOI:10.16226/j.issn.1002-8412.2006.04.023.
- [2] 刘阳,郭子雄,杨勇,等.闽南地区农村住宅安全性现状及防灾建议[J].华侨大学学报(自然科学版),2007,28(1):63-67. DOI:10.3969/j.issn.1000-5013.2007.01.017.
- [3] 郭子雄,黄群贤,柴振岭,等.石结构房屋抗震防灾关键技术与展望[J].工程抗震与加固改造,2009,31(6):47-51,68. DOI:10.16226/j.issn.1002-8412.2009.06.013.
- [4] 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(增刊1):136-141. DOI:10.15951/j.tmgxb.2010.si.096.
- [5] 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. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2011.03.008.
- [6] 徐天航,郭子雄,柴振岭,等.钢筋网片改性砂浆加固砌体墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(12):120-125. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2016.12.015.
- [7] LOURENCO P B,RAMOS L F.Characterization of cyclic behavior of dry masonry joint[J].Journal of Structures Engineering,2004,130(5):779-786.
- [8] 刘木忠.料石砌体水平灰缝的抗剪强度[J].工程抗震,1986(3):25-29.
- [9] 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(增刊2):340-344.
- [10] 柴振岭,郭子雄,胡奕东,等.剪-压复合作用下铺浆砌筑石墙灰缝抗剪性能试验研究[J].工业建筑,2011,41(9):63-66. DOI:10.13204/j.gyjz201109014.
- [11] 刘小娟,郭子雄,胡奕东,等.聚合物砂浆嵌缝加固石墙灰缝抗剪性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2010,30(6):106-111.
- [12] 黄群贤,郭子雄,刘阳.石墙通缝抗剪强度试验及其可靠度分析[J].武汉理工大学学报,2010,32(9):65-68. DOI:10.3963/j.issn.167124431.2010.09.015.
- [13] VASCONCELOS G,LOURENCO P B.Experimental characterization of stone masonry in shear and compression [J].Construction and Building Materials,2009,23(11):3337-3345. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.045.
- [14] 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. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2011.03.009.
- [15] 郭子雄,柴振岭,胡奕东,等.机器切割条石砌筑石墙灰缝抗剪性能试验研究[J].工程力学,2012,29(6):92-97. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2010.08.0611.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)