

文章编号: 1004-4353(2017)01-0078-06

# 条石砌筑石墙灰缝抗剪性能研究

王兰<sup>1</sup>, 柴振岭<sup>2,3</sup>

( 1. 黎明职业大学 土木建筑工程学院, 福建 泉州 362000; 2. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;  
3. 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021 )

**摘要:** 石墙是石结构抵抗地震作用的重要抗侧构件,其抗剪性能对石墙单元及石结构整体地震反应至关重要. 本文首先对条石砌筑石墙灰缝抗剪性能的研究现状进行了分析,主要包括:已有试验研究的加载装置、研究参数和抗剪承载力计算方法,以及有限元数值模拟分析方法. 在此基础上,提出了石墙灰缝单向抗剪的剪切滑移本构模型,并采用 ABAQUS 有限元分析软件对石墙灰缝双剪试验进行了数值模拟,其结果与试验结果吻合较好.

**关键词:** 石砌体结构; 石墙; 抗剪性能; 抗震性能; 数值分析

**中图分类号:** TU502.6

**文献标识码:** A

## Research on the shear behavior of bed joints of stone masonry wall

WANG Lan<sup>1</sup>, CHAI Zhenling<sup>2,3</sup>

( 1. College of Civil and Structural Engineering, Liming Vocational University, Quanzhou 362000, China;  
2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 3. Key Laboratory for  
Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Xiamen 361021, China )

**Abstract:** The shear behavior of stone-mortar joints is an important parameters to estimate the seismic behavior of stone masonry buildings. This paper provides the process of shear behavior study on dry-laid stone masonry wall with inserted mortar joints, including experimental study as well as theoretical and simulated analysis of mortar joints shear behavior. The comparison of different test setups and the determination of joint shear strength are presented. In addition, based on the analysis, a simplified constitutive model for the shear-slip deformation of stone masonry joints is proposed, which can be used for numerical analysis. The simulated results predicted by this study shows the same trend to the available experimental results.

**Keywords:** stone masonry; stone wall; shear strength; seismic behavior; numerical analysis

### 0 引言

石结构建筑因其坚固耐久、自然美观、隔热防风等优点,在我国东南沿海村镇地区广泛分布,形成了独具地域特色的建筑文化. 石结构建筑多以石块砌筑的墙体(以下简称“石墙”)作为主要的竖向承重和抗侧构件. 不同地区石墙在块材形状、胶结材料和砌筑方法等方面存在差异. 石墙的砌筑

方法主要有:无浆干砌、无垫片铺浆砌筑、有垫片铺浆砌筑和有垫片干砌甩浆砌筑. 采用有垫片干砌甩浆砌筑方法的条石砌筑石墙是福建沿海地区石结构的主要特色.

通过对条石砌筑石墙的抗震性能研究<sup>[1-2]</sup>发现,石墙灰缝破坏是石砌体结构有别于其他砌体的重要特征;因此,研究条石砌筑石墙灰缝的抗剪

**收稿日期:** 2016-11-27

**作者简介:** 王兰(1983—),女,讲师,研究方向为工程结构抗震防灾.

**基金项目:** 福建省自然科学基金资助项目(2015J01212);福建省中青年教育科研计划项目(2015JA15832);黎明职业大学科研团队建设项目(LMTD2014106)

性能是研究石墙抗震性能的基础,建立石墙在地震往复作用下的剪切滑移力学模型是开展石结构精细化有限元数值分析的关键。目前,国内外仅少数科研机构或学者对石墙水平灰缝抗剪性能开展了研究。在国内,华侨大学、福建省建筑科学研究所等科研机构在 20 世纪 80—90 年代开展了一些石墙灰缝抗剪试验,例如:1981 年福建省建筑科学研究所<sup>[3]</sup>对有垫片铺浆砌筑小石墙进行了无竖向压应力的水平剪切试验,研究了砂浆强度、砂浆饱满度和石垫片数量对灰缝抗剪强度的影响;1986 年和 1995 年华侨大学<sup>[4-5]</sup>先后对 4 种砌筑方式石墙灰缝进行了单调加载水平剪切试验,研究了砌筑方式、砂浆强度和竖向压应力对灰缝抗剪性能的影响,提出了对应不同砌筑方式的抗剪强度计算公式。2006 年,华侨大学郭子雄团队开展了系列石结构构件性能及加固等研究<sup>[6-11]</sup>,其中包括石墙灰缝抗剪性能研究,如:2010 年黄群贤等<sup>[8]</sup>对有垫片干砌甩浆粗料石墙体进行了通缝抗剪试验,研究砂浆强度和竖向压应力对抗剪强度的影响,提出了基于库伦剪摩理论的抗剪计算公式;2010 年刘小娟等<sup>[9]</sup>对采用聚合物砂浆嵌缝加固的有垫片干砌甩浆石墙灰缝进行了通缝抗剪试验,研究了加固对石墙通缝抗剪承载力的影响;2011 年柴振岭等<sup>[10]</sup>开展了有垫片铺浆砌筑石墙通缝抗剪性能试验,研究了砂浆强度和竖向压应力水平对抗剪性能的影响;2012 年郭子雄等<sup>[11]</sup>开展了新型机器切割条石无垫片砌筑石墙灰缝双剪试验,研究了灰浆强度、压应力水平和界面处理方

式对石墙灰缝抗剪性能的影响。在国外,石结构建筑主要分布在欧洲地区,由于这些地区地震相对较少,仅有少数学者对石结构建筑的抗震性能进行了研究<sup>[12]</sup>,石墙灰缝抗剪性能的研究则相对更少。2004 年,P. B. Lourenço 等<sup>[13]</sup>开展了无砂浆干砌切割石块界面在水平往复荷载作用下的抗剪性能试验。

根据上述文献,本文对采用有垫片干砌甩浆砌筑的条石砌筑石墙灰缝抗剪研究进行归纳总结,分析此砌筑方式下影响石墙灰缝的抗剪性能的因素,比较不同抗剪承载力计算公式的差异。在此基础上,本文提出了石墙灰缝剪切滑移本构模型,对该本构模型在石墙灰缝抗剪行为数值模拟上的应用进行了初步探索,并对今后的研究提出了建议。

## 1 石墙灰缝抗剪性能的试验研究概况

### 1.1 试验加载装置

目前为止,已有的试验研究多数为单向推出剪切试验,以得到石墙灰缝抗剪强度为主要目的。试验目的决定试验加载装置的设计。在石墙灰缝抗剪性能试验研究中,为达到理想边界条件,不同文献提出了不同的试验装置,以实现石墙灰缝的理想剪切状态,减少施加剪力带来的附加弯矩影响。图 1 给出文献[3-5,8-11,13]所采用的试验装置,分为单条灰缝受剪(单剪,见图 1 a-d)和双条灰缝受剪(双剪,见图 1 e)试验装置。

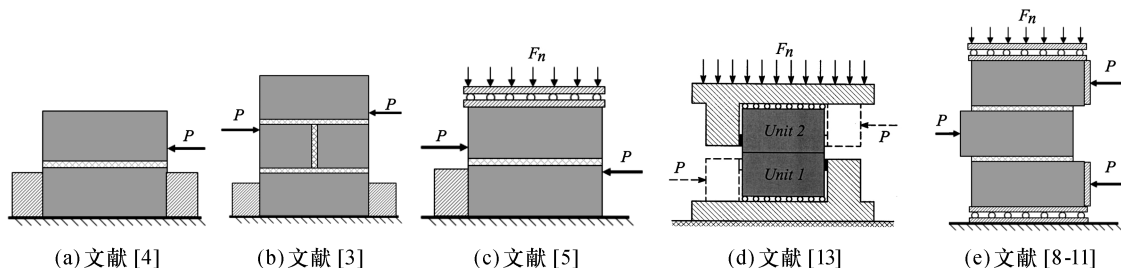


图 1 石墙灰缝剪切试验装置示意图

### 1.2 影响抗剪性能的关键参数分析

在已开展的有垫片干砌甩浆砌筑石墙灰缝试验中,对相关参数的研究有:砂浆强度、砂浆种类、砂浆饱满率和竖向压应力。有垫片干砌甩浆砌筑石墙灰缝由砂浆和主副石垫片组成。砌筑工序为:主石垫片定位调平石砌块(图 2 a)→甩入砂浆塞

满石块间的空隙(图 2 b)→塞入副石垫片(图 2 c)。因多道工序和砌筑块体及垫片的尺寸存在差异,因此试件也存在一定的差异,这些差异导致了试验数据离散性较大。尽管如此,综合对比不同的试验研究,仍可发现一定的规律性。

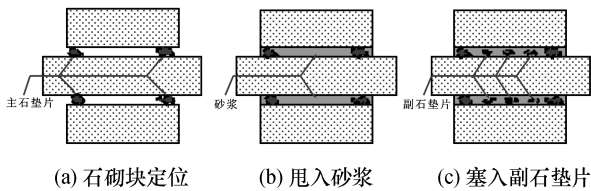


图 2 干砌甩浆砌筑工法示意图

表 1 为不同竖向压应力水平和砂浆强度下的峰值抗剪强度<sup>[8-10]</sup>. 图 3 为不同参数对峰值抗剪强度的影响曲线. 从表 1 和图 3 a 中可看出,在相同砂浆强度下,随着压应力的增大,峰值抗剪强度( $\tau_{\max}$ )近似线性增长;由图 3 b 可知,在相同压应力水平下,随着砂浆强度的提高,抗剪强度整体呈增加趋势. 随着砂浆强度与竖向压应力比值的增大,抗剪强度亦近似线性增长. 竖向压应力与砌筑砂浆强度的比值是影响砖砌体力学性能的主要因素之一. 图 3 c 给出了石墙竖向压应力与砂浆强度比值的影响趋势. 从图 3 c 中  $f_m=1.5$  MPa 对应的曲线可看出,随着  $\sigma_n/f_m$  数值的增大,抗剪强度的提高随之呈现减缓的趋势,线性拟合结果为:  $\tau_{\max} =$

$-0.0003(\sigma_n/f_m)^2 + 0.0218(\sigma_n/f_m) + 0.056$ ,  $R^2=1$ .  $f_m=4.1$  MPa 对应的曲线表明,在一定范围内,随着  $\sigma_n/f_m$  数值的增大,抗剪强度呈线性提高,线性拟合结果为:  $\tau_{\max} = 0.0412(\sigma_n/f_m) + 0.1519$ ,  $R^2=1$ . 从图 3 可以看出,由于石墙灰缝中存在石垫片且石砌块界面粗糙,使得  $\sigma_n/f_m$  对石墙抗剪承载力的影响较为复杂,其影响规律需要更多的试验加以验证.

表 1 不同竖向压应力和砂浆强度的峰值抗剪强度

$\sigma_n$ /MPa	$f_m$ /MPa	$\sigma_n/f_m$ /%	$\tau_{\max}$ /MPa
0	1.5	0	0.056
	4.1	0	0.156
	5.6	0	0.171
0.25	0.78	32.1	0.123
	1.5	16.7	0.341
	3.3	7.6	0.321
	4.1	6.1	0.396
	5.6	4.5	0.555
0.6	1.5	40.0	0.474
	4.1	14.6	0.756

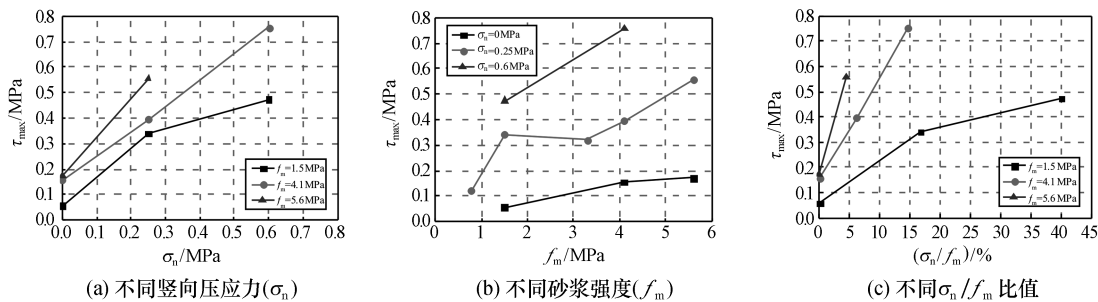


图 3 不同参数对抗剪强度的影响

图 4 为不同竖向压应力水平下的灰缝剪切应力与水平滑移曲线. 图中的数据是在文献[8]和文献[9]中选取的,除竖向压应力水平和砌筑时间不同外,其他条件均相同,故可进行比较. 由图 4 可知: ① 随竖向压应力增加,曲线初始阶段的刚度有所增大,整体抗剪强度显著提高. ② 随竖向压应力变化,曲线在抗剪强度峰值后期表现出不同的变化趋势. 具体表现为:当压应力为 0~0.25 MPa 时,曲线趋于平缓,抗剪强度基本保持稳定;当压应力为 0.6~0.95 MPa 时,曲线呈逐渐下降趋势,抗剪强度逐渐降低,且降低幅度随压应力增加而增大. 通过数据拟合,得到极限抗剪强度( $\tau_u$ )与滑移初期抗剪强度( $\tau_1$ )比值的计算公式:  $\tau_u/\tau_1 = 0.348\sigma_n - 0.072\delta_u + 2.129$ , 其中  $\delta_u$  为极限水平

位移.

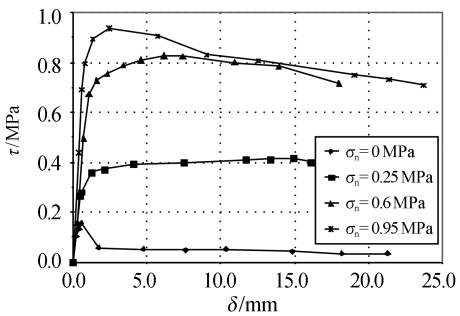


图 4 剪切应力-水平滑移曲线( $f_m=4.1$  MPa)

综合以上分析,竖向压应力、砂浆强度以及两者比值对石墙灰缝抗剪性能影响显著. 值得注意的是,已有试验尚未对石垫片数量、石砌块粗糙度等因素影响进行系统研究,因此该因素对抗剪性

能的影响程度有待进一步试验验证。

## 2 石墙灰缝抗剪承载力的计算公式

### 2.1 抗剪强度的计算公式

在有垫片的干砌甩浆灰缝中,因石垫片大小形状不均,料石块体表面粗糙,以及甩浆操作带来的砂浆不均匀分布,使得灰缝抗剪的机理十分复杂。已有研究表明<sup>[2-5,10]</sup>,灰缝抗剪承载力主要由灰缝与石材界面的粘结力、摩擦力和机械咬结力构成,砌筑砂浆强度和饱满度、竖向压应力水平、石垫块的数量等因素均对石墙灰缝抗剪强度产生影响。因有垫片干砌甩浆砌筑质量的不确定性和试验条件的差异,不同试验数据有较大差异性。目前,灰缝的抗剪行为主要是以库伦摩擦理论来进行研究的,其抗剪计算公式主要由试验数据统计回归得到。目前,有垫片干砌甩浆石墙灰缝抗剪强度的计算公式有如下几种:

1) 文献[4]模型。作者通过对一组共 6 个试件的干砌甩浆试件数据进行研究,提出了无竖向压应力下的干砌甩浆石墙灰缝抗剪强度计算公式:

$$f_v = 0.016 \times \sqrt{f_m}, \quad (1)$$

其中  $f_v$  为灰缝抗剪强度,  $f_m$  为砌筑砂浆强度,单位均为  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

2) 文献[8]模型。作者通过 13 组共 28 个试件的双剪试验研究,提出了同时考虑砂浆强度和竖向压应力水平的简化计算公式:

$$f_v = 0.068 \sqrt{f_m} + 0.843 \sigma_n, \quad (2)$$

其中  $\sigma_n$  为竖向压应力值。

3) 文献[5]模型。作者通过试验研究发现:受剪面存在粘结力、摩擦力和机械咬结力,但粘结力与摩擦力并不同时达到最大,因此经典库伦公式不适于石砌体抗剪强度的计算。灰缝开裂后粘结力消失,仅摩擦力和机械咬结力起抗剪作用,且在竖向压力下,摩擦系数为变量。基于上述研究,文献[5]的作者提出了以下计算石砌体抗剪极限荷载值的改进库伦公式:

$$Q_u = \max \left\{ \begin{aligned} &[(R_{\tau\tau}B + LB'C) + LB'f\sigma']A = \\ &(CB' + B'f\sigma')A \\ &\max \left\{ \begin{aligned} &(R'_j + f\sigma')A \\ &(R''_j + f''\sigma)A \end{aligned} \right. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中  $R_{\tau\tau}$  为干砌甩浆黏结抗剪强度的计算公式,

$$R_{\tau\tau} = \begin{cases} 0.43 \sqrt{R}, & \frac{\sigma'}{R} < 0.15; \\ \frac{0.43 \sqrt{R} \times 10^{-2}}{0.95 + 2.1(\sigma'/R)}, & \frac{\sigma'}{R} \geq 0.15, \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\sigma'$  为考虑砂浆饱满度后的砂浆实际压应力,  $R'_j$  和  $R''_j$  为广义粘结力,  $A$  为受剪面面积,  $R$  为砂浆标量(砂浆强度  $\times 10$ ),  $B'$  为砂浆实际饱满度(干砌甩浆试件为 18%),  $L$  为小于 1 的叠加系数,  $C$  为机械咬结力,  $f$  为摩擦系数, 应力单位为  $\text{kgf}/\text{cm}^2$  ( $1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 0.098\text{ N}/\text{mm}^2$ )。

对比公式(1)~(3)可知,当竖向压力为 0 时,公式中砂浆强度项前面的系数分别为 0.016、0.068 和 0.135,由此可以看出不同公式计算出的该系数存在明显的差异。该差异产生的原因主要是:公式(1)和公式(2)均基于原库伦公式,未对灰缝的受力机理进行细分,系数的确定均基于单一的有垫片灰缝试件的试验数据;公式(3)在库伦公式的基础上,对灰缝的抗剪行为进行了细化分析,对原库伦公式进行了改进,系数的确定基于多种情况(不同粗细料石、有无垫片等)的灰缝试件试验数据。

### 2.2 不同承载力的计算公式

影响条石砌筑石墙灰缝抗剪承载力的因素包括竖向压应力、砂浆强度、砂浆饱满率、垫片数量和块材粗糙度等。表 2 为上述 3 个承载力计算公式的对比情况。由表 2 可以看出:公式(1)仅给出了无竖向压应力下的抗剪强度计算公式,因此只能用于低水平竖向压应力情况下的石墙抗剪计算。公式(2)形式简单,考虑了竖向压应力和砂浆强度两个主要影响因素,有利于在工程中推广应用,但因试验试件有限,其系数值还有待更多数据的验证。公式(3)从抗剪破坏机理出发,考虑粘结力、摩擦力和机械咬结力的共同作用,将砂浆强度和饱满度、竖向压应力作为主要参数。由于该公式计算过程繁琐,对干砌甩浆石墙灰缝抗剪计算的相关系数未给出建议取值,因此不利于在工程中的应用。

表 2 抗剪承载力计算公式

公式	砂浆强度	竖向压应力	砂浆饱满率	石垫片影响	块材粗糙度
公式(1)	YES	NO	NO	NO	NO
公式(2)	YES	YES	NO	NO	NO
公式(3)	YES	YES	YES	NO	NO



3 有限元数值模拟研究

3.1 砌体有限元模型

砌体有限元模型主要分两大类:分离式模型和整体式模型<sup>[14]</sup>. 分离式模型是将灰缝与块体分开建模,采用不同的单元,接触面通常采用界面单元,如图 5(a)所示. 简化的分离式模型如图 5(b)

所示,该模型利用连接单元模拟砌块与砂浆间的相互作用. 在模拟石砌墙体单元受力行为和裂缝开展时,采用较精细的分离式模型可得到较直观的破坏过程. 整体式模型是将砌体单元作为一个整体建模,如图 5(c)所示. 在整体结构分析中,采用整体式模型可大大提高计算效率.

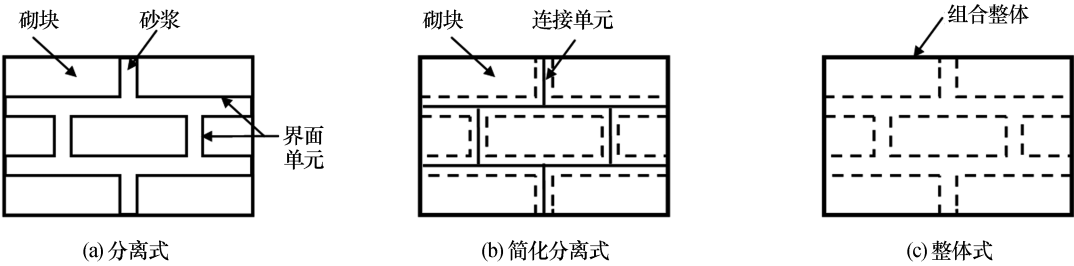


图 5 砌体有限元模型<sup>[14]</sup>

2009 年,R. Senthivel 等<sup>[14]</sup>利用 Lourenço 编写的 Fortran 程序,采用平面分离式模型对 3 种历史建筑石砌墙体抗剪性能进行模拟,得到了与试验较吻合的墙体模型破坏模式. 国内目前尚未见有关石墙方面数值模拟的研究. 石墙灰缝在地震作用下的非线性行为是影响石墙地震反应的关键,由于对该非线性行为研究得不足导致难以建立石墙精细化的有限元模型.

3.2 石墙灰缝剪切滑移本构模型

石墙灰缝摩擦滑移本构模型是石墙抗剪的基本力学性能,也是开展石墙有限元数值分析的理论基础和重要依据. 不同砌筑方式的石墙灰缝本构模型差异较大,目前尚无有垫片干砌甩浆砌筑石墙灰缝抗剪本构模型的研究.

根据文献[8]中的试验研究,可将石墙灰缝单向剪切滑移过程分为 3 个阶段:弹性阶段、粘结破坏阶段和摩擦滑移阶段. 对应这 3 个阶段,本文提出描述单向剪切摩擦滑移的三折线式本构模型,如图 6 所示. 该模型的关键点分别为:比例极限点( $\tau_p, \Delta_p$ ),最大荷载点( $\tau_m, \Delta_m$ ),滑移极限点( $\tau_u, \Delta_u$ ). 三折线段的刚度如图 6 所示,其中  $K_0 = \frac{\tau_p}{\Delta_p}$ ,  $K_1 = \frac{\tau_m - \tau_p}{\Delta_m - \Delta_p}$ ,  $K_2 = \frac{\tau_u - \tau_m}{\Delta_u - \Delta_m}$ ,  $\tau_p$  为比例极限切应力,  $\tau_m$  为最大切应力,  $\tau_u$  为极限切应力.

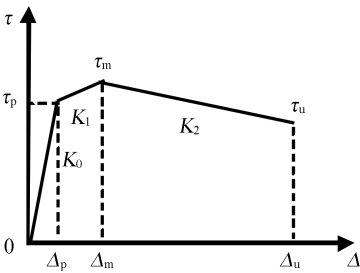


图 6 三折线式本构模型

3.3 石墙灰缝抗剪数值模拟

采用 ABAQUS 有限元分析软件对石墙灰缝双剪试验进行数值模拟. 石砌块采用实体单元,灰缝采用非线性弹簧单元,有限元模型如图 7 所示. 弹簧单元本构采用本文提出的三折线模型. 按上述条件对文献[8]中的试验进行模拟,并将数值模拟结果与试验数据进行对比,结果如图 8 所示. 图 8 表明采用该模型进行计算的结果与文献[8]中的试验结果吻合较好.

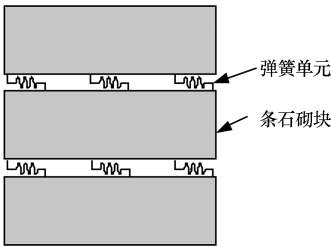


图 7 石墙灰缝单元有限元模型

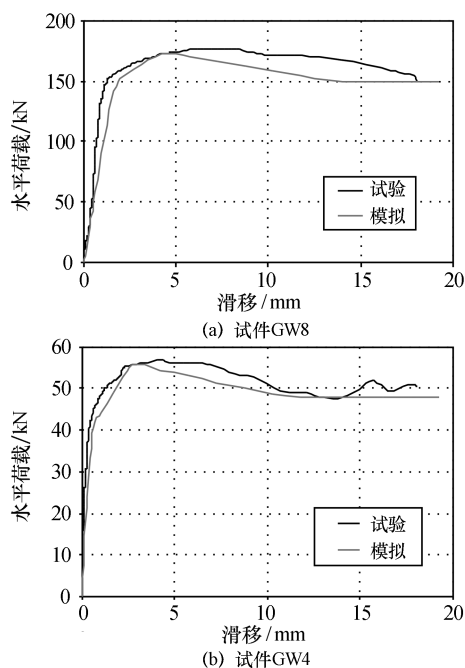


图8 荷载滑移曲线对比

## 4 结语

本文对有垫片干砌甩浆砌筑石墙灰缝抗剪性能的研究现状进行了研究分析,并对相关试验研究、抗剪承载力计算公式以及有限元模型等资料进行了比较分析,并提出简化的灰缝剪切滑移本构模型。本文通过研究分析,得到以下结论:

1) 竖向压应力和砂浆强度是影响石墙灰缝抗剪性能的关键因素。随着竖向压应力的提高,灰缝抗剪强度近似线性的提高;随着砂浆强度的提高,抗剪强度整体呈上升趋势,但其规律性无压应力明显。石垫片数量、条石界面粗糙度和砂浆饱满率等因素对抗剪强度的影响尚无定论,应开展进一步的研究。

2) 现有的灰缝抗剪承载力计算公式以库伦公式为理论基础,公式中仅考虑了竖向压应力和砂浆强度的影响。因此,应进一步开展石墙灰缝抗剪性能试验,通过系统性研究得到兼顾各关键因素影响的抗剪承载力计算公式。

3) 利用本文提出的灰缝单向剪切滑移本构模型,进行灰缝单向抗剪有限元分析,其数值模拟结果与文献[8]中的试验曲线吻合较好。

4) 已有试验均为单向推出剪切试验,可考虑进一步开展模拟地震作用的往复加载试验,研究在地震作用下石墙灰缝的受力机理。鉴于有限元

数值模拟研究相对滞后,在试验基础上,应进一步考虑石墙灰缝非线性行为的恢复力模型,为建立准确模拟地震作用下石墙灰缝剪切滑移特征的精细化有限元模型提供基础。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 施景勋,卢志红,林建华,等.对石墙抗震性能的研究和设计取值的建议[J].华侨大学学报(自然科学版),1993,14(2):191-199.
- [3] 福建省建筑科学研究所.有垫片料石墙体抗震抗剪性能及其加固效果的试验与研究[R].1992.
- [4] 刘木忠.料石砌体水平灰缝的抗剪强度[J].工程抗震与加固改造,1986(3):25-28.
- [5] 施养杭.石砌体抗剪强度计算的改进库伦公式[C]//第四届全国结构工程学术会议论文集(下).北京:清华大学出版社,1995.
- [6] 郭子雄,王兰,柴振岭,等.钢筋网改性砂浆加固石楼板受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(3):69-74.
- [7] Ye Y, Guo Z X, Liu Y, et al. Flexural behavior of stone beams reinforced with prestressed NSM CFRP bars[J]. Construction and Building Materials, 2014,54(3):466-476.
- [8] 黄群贤,郭子雄,刘阳.石墙通缝抗剪强度试验及其可靠性分析[J].武汉理工大学学报,2010,32(9):65-88.
- [9] 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研究[J].地震工程与工程振动,2010,30(6):106-111.
- [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.
- [11] 郭子雄,柴振岭,刘阳,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.
- [12] Lourenco P B, Oliveira D V, Roca P, et al. Dry joint stone masonry walls subjected to in-plane combined loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2005,131(11):1664-1673.
- [13] Lourenco P B, Ramos L F. Characterization of cyclic behavior of dry masonry joints[J]. Journal of Structural Engineering, 2004,130(5):779-786.
- [14] Senthivel R, Lourenco P B. Finite element modelling of deformation characteristics of historical stone masonry shear walls[J]. Engineering Structures, 2009,31(9):1930-1943.