

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.02.013

无筋砌体墙抗剪强度试验与计算

姚兆玮

(上海理工大学 环境与建筑学院 土木工程系, 上海 200093)

摘要: 结合试验研究砌体在压剪复合受力下砌体静力抗剪强度的计算方法,根据砂浆强度试验以及砌块强度试验结果,结合我国现行《砌体结构设计规范》建立无筋砌体构件复合受力状态下的抗剪强度估算公式,保持了与现行规范相同的可靠度。试验表明,文中计算式与试验较吻合,能表述不同轴压比下构件的抗剪强度。比较国内相近试验研究结果,文中公式计算值与其试验值也较吻合。此方法可为相关试验方案提供参考,估算无筋砌体墙的抗剪承载力。

关键词: 砖砌体;压剪破坏;既有结构;抗剪强度

中图分类号: TU362;TU317+.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)02-0071-05

Shear Strength Experiment and Calculation of Unreinforced Brick Masonry Wall

YAO Zhaowei

(Civil Engineering, School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this paper, the test and calculating method of static shear strength of unreinforced masonry wall were analyzed. According to strength test results of mortar and brick, and code for design of masonry structures, the shear strength formula of masonry under combined shear-compression action was derived, which is similar to the current structure design code. The correlated formula results are in good agreement with the experimental results introduced in the paper. The shear strength under different axial compression ratio can be expressed. By comparing the formulated results with other similar experiments in other studies, it shows that the calculated results of the formula given in the paper are in accordance with those results. The method of the present paper could provide valuable reference to experimental study design and the shear strength estimation of existing unreinforced masonry structures.

Keywords: brick masonry; shear-compression failure; existing structures; shear strength

在建筑结构中,砖砌体承重墙多处于平面内的压剪复合受力状态。随着轴压比的增大,砖砌体材料的破坏过程包括剪摩、剪压、斜压三个阶段与三种破坏形态^[1]。总结大量压剪实验结果,对于建立砖砌体的压剪破坏准则具有重要意义^[2]。对于既有砌体结构,虽然能够通过少量取样或原位测试等方法获得关于砌块强度以及砂浆强度的相关实验结果,且相应的无损检测方法也得以广泛应用,部分材料测试结果也能够满足要求^[3]。但用于评估结构整体以及单个砌体构件整体所需的砌体抗剪强度的研究来讲却并不能达到希望的效果。

本文结合无筋砌体墙静力试验研究,综合国内

相关无筋砌体墙的研究成果,结合我国现行砌体结构设计方法,总结提出建立无筋砌体构件复合受力状态下的抗剪承载力计算公式。为相关实验研究提供参考。

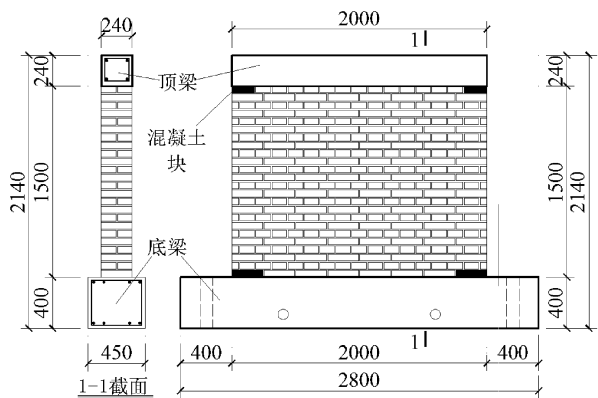
1 无筋砌体墙静力试验

1.1 试验设计

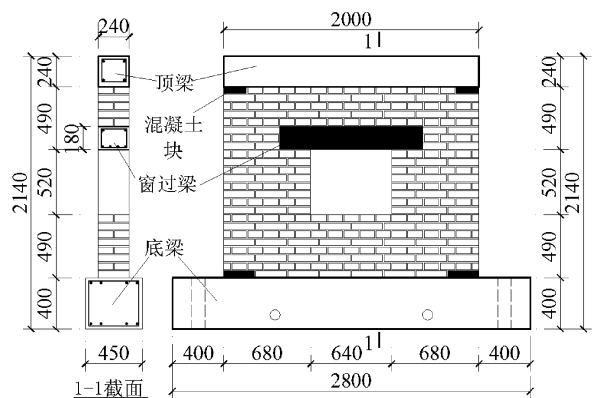
根据《砌体结构设计规范》^[4](GB 50003—2011),块体类别和砂浆强度等级对砌体抗剪强度的大小有着决定性的影响。根据我国既有砌体结构中常用的砂浆强度等级,试验中砌体墙试件的砂浆强度等级取 M5 和 M7.5 两种水平。

因砌体竖缝抗剪强度低,可将阶梯型截面近似按其水平投影的水平截面计算^[4]。故试验方案中将研究水平截面净面积对砌体墙抗剪强度的影响。

在竖向荷载和横向荷载的共同作用下,既有砌体结构中的底层墙受到的竖向力和剪切力最大,结合我国既有砌体结构现状,以 3 层既有砌体结构为原型,考虑砂浆强度等级、净截面面积因素的影响,以 3 片 1:2 缩尺砌体墙试件为基础进行静力试验研究。砌体试件采用 MU15 烧结普通砖砌筑,墙厚取 240 mm,灰缝厚度 10 mm,砌筑方式为一顺一丁。



(a) W1、W2 墙体试件



(b) W3 墙体试件

图 1 墙体试件设计图(单位:mm)

1.2 材料基本力学试验

试验中,考虑到砌块材料的基本力学性能,砌筑砂浆的基本力学性能都对砌体材料性能有所影响,且砂浆的抗拉、抗剪强度较低,是影响砌体材料性能的重要因素^[5-6]。故需要进行砌块砌筑砂浆的基本力学性能试验作为抗剪试验的准备工作。

(1) 砖的抗压强度试验。砌筑各墙体试件时,应随机从同批次砖块中选取 10 块完整的砖。根据《砌墙砖试验方法》^[7](GB/T 2542—2012)以及《烧结普通砖》^[8](GB 5101—2003)对砖块进行抗压强度试验并评定强度,由于样本容量为 60 大于 10,用平均值和变异系数评定结果,结果见表 1。

表 1 普通烧结砖抗压强度测试及强度等级评定结果

强度平均值 $/(N \cdot mm^{-2})$	标准差 $/(N \cdot mm^{-2})$	变异系数	评定强度等级
15.03	2.39	0.159	MU15

(2) 砂浆的立方体抗压强度试验。砌筑各墙体试件时,随机从同批次砂浆中预留 3 个砂浆立方体试件。根据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》^[9](JGJ/T 70—2009),对砂浆立方体试件进行抗压强度

对于开洞的墙体试件 W3,设计的过梁在保证有足够承载力的同时,其端部还应具有一定的支承长度。过梁尺寸为 1 115 mm × 180 mm × 240 mm(梁长 × 梁高 × 梁宽),内置 6Φ16 的 HRB335 纵向钢筋以及 Φ8@100 的双肢箍筋。

墙体试件的顶部设置一根钢筋混凝土顶梁,以方便进行竖向荷载和横向荷载的施加。顶梁尺寸为 2 000 mm × 240 mm × 240 mm(梁宽 × 梁高 × 梁厚),内置 4Φ16 的 HRB335 纵向钢筋以及 Φ8@200 的双肢箍筋。墙体试件尺寸参数如图 1 所示。

试验,结果见表 2。

表 2 砂浆立方体抗压强度测试结果

砂浆强度等级	强度平均值 $/(N \cdot mm^{-2})$	标准差 $/(N \cdot mm^{-2})$	变异系数
M5	4.20	0.39	0.093
M7.5	7.86	0.79	0.105

(3) 砌体试件抗压强度试验。根据《砌体基本力学性能试验方法标准》^[10](GB/T 50129—2011),对砌体试件进行抗压强度试验,试验结果见表 3。

表 3 砌体抗压强度测试结果

砌块强度等级	砂浆强度等级	实测强度平均值 $/(N \cdot mm^{-2})$
MU15	M5	3.85
	M7.5	4.65

1.3 无筋砌体墙静力试验

(1) 无筋砌体墙试件的设计轴压比。结合试验确定的砌体及砂浆强度等级可确定各墙体试件砌体的设计强度。根据《建筑结构荷载规范》^[11](GB 50009—2012)考虑静力试验条件以及实际砌体结构受力情况,永久荷载分项系数 γ_G 取 1.35 则砌体试

件轴向力情况如表 4,表 5 所示。

表 4 各砌体墙体试件设计轴压比

墙体编号	抗压强度设计值 f $/(N \cdot mm^{-2})$	实际轴向应力 σ_0 $/(N \cdot mm^{-2})$	设计轴压比
W1	1.80	0.47	0.3
W2	2.05	0.56	0.3
W3	2.05	0.56	0.3

表 5 各砌体墙试件试验中实际轴压比

墙体编号	抗压强度平均值 f $/(N \cdot mm^{-2})$	实际轴向应力 σ_0 $/(N \cdot mm^{-2})$	实际轴压比
W1	3.85	0.47	0.12
W2	4.65	0.56	0.12
W3	4.65	0.56	0.12

设计轴压比按式(1)计算

$$\frac{\sigma_y}{f} = \frac{1.35 \times \sigma_0}{f} \quad (1)$$

(2) 无筋砌体墙试件的加载。墙体试件上的竖向荷载由两个液压千斤顶进行施加,水平荷载则由液压伺服作动器进行施加。加载方式采用力-位移混合控制。即墙体开裂前,水平加载为以力控制阶段,每级荷载循环一周。之后加载改为以位移控制阶段,荷载每级均为开裂位移的整数倍,每级荷载循环两周。当试验过程中的水平荷载降低为峰值荷载的 85%时,可以认为墙体试件发生破坏,应停止试验。图 2 即为力-位移混合加载制度的示意图。图 3 为试验装置图。

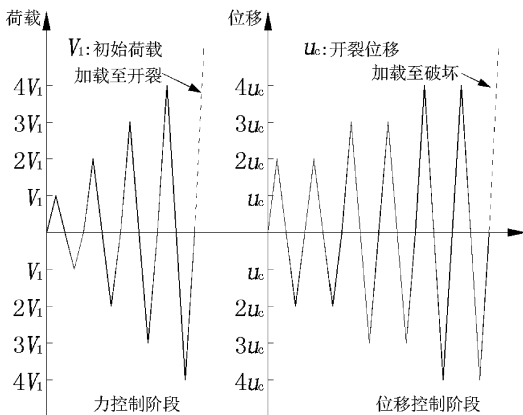


图 2 力-位移混合加载制度

2 无筋砌体墙抗剪强度

结合材料基本力学性能试验,参考规范的设计

计算方法,确定无筋砌体墙抗剪强度计算公式。并通过试验结果,对比验证计算方法的有效性。估计无筋砌体墙抗剪承载力。

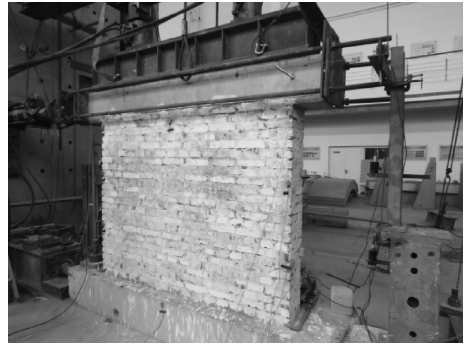


图 3 试验装置图

2.1 砌体平均抗压强度计算

规范^[4]附录 B 给出了由砌块强度等级及砂浆平均强度计算砌体平均强度的计算式为:

$$f_m = k_1 f_1^{1.1} (1 + 0.07 f_2) k_2 \quad (2)$$

式中: f_m 为砌体抗压强度平均值; f_1 为块体的抗压强度等级或平均值; f_2 为砂浆的抗压强度平均值; k_1 为与块体类别有关的参数,当块体种类采用烧结普通砖时, $k_1 = 0.78$; α_1 为与块体高度和砌体种类有关的参数。当块体种类采用烧结普通砖时, $\alpha_1 = 0.5$; k_2 为砂浆强度较低或较高的情况下,其对砌体的抗压强度的修正系数。当块体种类采用烧结普通砖,且 $f_2 < 1$ 时, $k_2 = 0.6 + 0.4 f_2$ 。采用该方法并与试验结果比较见表 6。

表 6 各砌体墙片抗压强度实测结果及计算结果比较

砌体墙编号	强度测试平均值 f_{m0} $/(N \cdot mm^{-2})$	强度计算平均值 f_m $/(N \cdot mm^{-2})$	误差 / %
W1	3.85	3.92	1.7
W2, W3	4.65	4.67	0.4

注:误差计算方法为 $|f_m - f_{m0}| / f_{m0} \times 100\%$ 。

可见规范提供的平均抗压强度计算方法有足够的精确度,可以为试验及相关计算提供可靠的保证。

2.2 砌体平均抗剪强度计算

砌体沿通缝破坏时无轴压情况下抗剪强度的计算式为^[4]:

$$f_{v,0,m} = k_3 \sqrt{f_2} \quad (3)$$

式中: $f_{v,0,m}$ 为砌体沿通缝破坏时无轴压抗剪强度平均值; k_3 为系数,当块体种类采用烧结普通砖时, $k_3 = 0.125$ 。计算结果见表 7。

表 7 无轴压砌体抗剪强度计算结果

砌块强度等级	砂浆强度等级	抗剪强度 $f_{v,0,m}$ /(N·mm ⁻²)
MU15	M5	0.257
	M7.5	0.348

根据砌规,无筋砌体构件抗剪承载力设计值计算方法为:

$$V = (f_v 0 + \alpha_2 \mu \sigma) A \quad (4)$$

$$\mu = 0.23 - 0.065 \frac{\sigma}{f} \quad (5)$$

$$\sigma = \gamma_G \sigma_0 \quad (6)$$

式中: V 为砌体抗剪承载力设计值; A 为水平净截面面积; $f_{v,0}$ 为砌体抗剪强度设计值; γ_G 为永久荷载分项系数。本文中取 $\gamma_G = 1.35$; α_2 为修正系数,当 $\gamma_G = 1.35$ 时取 0.64; μ 为剪压复合受力影响系数; f 为砌体抗压强度设计值; σ 为永久荷载设计值产生的水平截面平均压应力; σ_0 为试验中砌体水平截面平均压应力。可知,压剪复合受力情况下砌体的抗剪强度设计值计算方法为:

$$f_v = f_{v,0} + \alpha_2 \mu \sigma \quad (7)$$

我国建筑设计规范中对建筑材料强度按照不同材料类别受力形式结合统计规律选择具有 95% 保证率的统计值确定材料的强度标准值,强度设计值等指标。现行砌体结构规范中抗压强度标准值 / 抗压强度设计值为 1.6 (B 类施工等级,砌体材料分项系数 γ_1 取 1.6) 取值。而标准值 / 平均值则根据不同受力形式按照超保证率 95% 的不同分位值 (抗剪强度 0.67, 复合压剪强度 0.6, 抗压强度 0.72) 进行取值,进而保证设计值和试验值的统一性^[4]。试验中采用统计平均值与上述式(4),式(5),式(6),式(7)中取值存在如下换算关系:

$$f_v = \frac{0.6}{1.6} f_{v,m} \quad (8)$$

$$f_{v,0} = \frac{0.67}{1.6} f_{v,0,m} \quad (9)$$

$$f = \frac{0.72}{1.6} f_m \quad (10)$$

式中: $f_{v,m}$ 为复合压剪状态下砌体抗剪强度平均值; $f_{v,0,m}$ 为无轴向压力下砌体抗剪强度平均值; f_m 为砌体抗压强度平均值。

结合上述各式可以得到适用于试验设计以及验证计算的砌体复合压剪状态抗剪强度计算式:

$$f_v = 0.419 f_{v,0,m} + 0.199 \sigma_0 - 0.125 \frac{\sigma_0^2}{f_m} \quad (11)$$

$$f_{v,m} = 1.117 f_{v,0,m} + 0.531 \sigma_0 - 0.333 \frac{\sigma_0^2}{f_m} \quad (12)$$

为了与我国现行规范的可靠度保持一致,应当满足砂浆强度试验中砂浆强度变异系数不大于 0.2,且砌体抗压强度试验中砌体抗压强度变异系数不大于 0.17; 施工质量不低於一般。若不满足要求应当根据式(9)、式(10)两式进行相应调整,如 γ_1 取 1.8 (施工条件为 C 类)。

由式(12)可知复合压剪状态下,轴向压力对于砌体抗剪强度提高有利,这与摩尔库仑强度理论一致,但随轴向压力增加,强度不可能一直提高,考虑轴压比对砌体抗剪强度的影响,将轴压比单独提出,对式(11)或(12)求导有

$$0.796 - \frac{\sigma_0}{f_m} \quad (13)$$

可见,我国规范中结合大量试验结果所得统计结果显示,当轴压比小于 0.796 (≈ 0.8) 时可认为复合压剪状态对提高砌体墙构件的抗剪承载力有利,故试验中,对于砌体的实际轴压比应当控制不大于 0.8。而规范中亦规定相关经验公式在设计应用时,设计轴压比取值应限制在 0~0.8 之间。

2.3 砌体抗剪强度计算方法试验验证

由式(12)计算试验中各无筋砌体墙片抗剪承载力并比对试验结果见表 8,根据式(12)能够比较准确的估计无筋砌体墙的抗剪承载力试验结果,为试验提供较为准确的资料。

表 8 各砌体墙试件复合压剪试验抗剪强度比较

墙体编号	计算抗剪强度 /(N·mm ⁻²)	试验抗剪强度 /(N·mm ⁻²)	误差 /%
W1	0.520	0.733	-29.0
W2	0.684	0.859	-20.4
W3	0.684	0.656	4.3

注:误差计算方法为(计算值 - 试验值) / 试验值 × 100%

3 国内相关试验研究结果比对

由于国内既有砌体结构大量存在,而对其进行加固与改造的需求日益增加,国内诸多学者及研究机构对无筋砌体墙加固及改造方案做了大量试验研究。对于无筋砌体墙原状承载力的评估计算作为其中重要的基本课题,国内已经积累了大量的相近试验结果,可以作为本文研究的参考资料^[11-17]。

本试验个数较少,样本数量较不充足,为充分验证本文方法砌体墙抗剪强度计算的准确性,结合国内诸多试验研究的成果,对本文提出的无筋砌体墙

抗剪强度计算式(11)、式(12)进行验证。由式(12)可知,影响砌体抗剪强度的因素主要包括:无轴向压力下砌体抗剪强度平均值 $f_{v0,m}$;砌体抗压强度平均值 f_m ;试验中砌体水平截面平均压应力 σ_0 。由于各

文献中取值的方法不同,本文中将按照试验结果优先于按照规范计算结果选择样本参数。结果见表 9^[12-18]。

表 9 国内各文献中砌体墙试件复合压剪试验抗剪强度比较

墙体编号	σ_0	f_m	$f_{v0,m}$	σ_0/f_m	$f_{v,m}$	试验 $f'_{v,m}$	误差/%
Q1 ^[12]	0.000	3.788	0.125	0.000	0.140	0.402	65.16
Q2 ^[13]	0.643	2.898	0.198	0.222	0.515	0.292	-76.67
Q3 ^[14]	0.705	2.750	0.057	0.256	0.378	0.322	-17.48
Q4 ^[14]	1.154	5.570	0.162	0.207	0.715	0.614	-16.42
Q5 ^[14]	0.962	5.570	0.162	0.173	0.637	0.370	-72.00
Q6 ^[15]	0.800	2.898	0.198	0.276	0.573	0.653	12.28
Q7 ^[15]	1.000	2.898	0.198	0.345	0.637	0.728	12.41
Q8 ^[16]	1.200	4.193	0.395	0.286	0.966	0.667	-44.83
Q9 ^[17]	0.600	3.728	0.274	0.161	0.593	0.517	-14.81
Q10 ^[18]	0.700	3.365	0.290	0.208	0.649	0.496	-30.80

注:误差计算方法为 $(f_{v,m}-f'_{v,m})/f'_{v,m} \times 100\%$

由表 9 可知,式(12)可以较好的与试验结果相吻合。但由于砌体材料本身离散性较大,难以完全准确的预测试验的结果。

4 结 论

复合压剪状态对于砌体抗剪强度的提高有利,结合规范的计算方法建立的强度公式(12)能够为计算砌体墙的抗剪平均承载力提供一定的依据和参考,为试验设计提供便利。式(11)、式(12)与现行规范具有相同的可靠度,若有充足的试验参数,则能够通过式(11)对既有砌体结构设计承载力做出评估,对于既有结构维护、加固、改造等工程应用有指导价值。

参考文献:

[1] 方 亮,梁建国.砌体墙的破坏准则及剪压复合作用下抗剪承载力[J].工程力学,2012,29(10):263-267.
 [2] 蔡 勇,施楚贤,马超林,等.砌体在剪-压作用下抗剪强度研究[J].建筑结构学报,2004,25(5):118-123.
 [3] 翟传明,李劲松.烧结普通砖强度等级检测技术[J].房材与应用,2004(2):44-45.
 [4] 砌体结构设计规范:GB 50003—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
 [5] 郑人逢,孙 青,律 清,等.长丝机织土工布砌体结构加固静载试验研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(4):205-209.
 [6] 危加阳.砌筑砂浆性能及配合比设计探析[J].水利与

建筑工程学报,2014,12(2):207-212.
 [7] 烧结普通砖:GB/T 5101—2003[S].北京:中国标准出版社,2002.
 [8] 砌墙砖试验方法:GB/T 2542—2012[S].北京:中国标准出版社,2012
 [9] 建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T 70—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
 [10] 砌体基本力学性能试验方法标准:GB/T 50129—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
 [11] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
 [12] 王春江,朱震宇,李向民,等.砌体墙侧向受力性能精细有限元模拟[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(6):1024-1030.
 [13] 韦昌芹,周新刚.CFRP加固砌体结构的试验研究[J].工程力学,2006(S2):150-154.
 [14] 林 磊,叶列平.FRP加固砖砌体墙的试验研究与分析[J].建筑结构,2005,35(3):21-27.
 [15] 王 欣,陆洲导,吕西林.碳纤维技术在砌体结构抗震加固中的试验研究[J].工业建筑,2003,33(9):11-13.
 [16] 赵 彤,张晨军,谢 剑,等.碳纤维布用于砖砌体抗震加固的试验研究[J].地震工程与工程振动,2001,21(2):89-95.
 [17] 雷 真,周德源,王继兵.玄武岩纤维增强材料加固砌体砖墙的抗震性能[J].华南理工大学学报(自然科学版),2013(3):43-49.
 [18] 樊 越,左宏亮,郭 亮.粘贴 CFRP 砖砌体墙在低周反复荷载作用下的试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,28(2):208-214.