

承重型横孔连锁混凝土砌块砌体的抗剪性能

张敬书^{1,2†}, 郭航^{1,2}, 王政^{2,3}, 刘乐^{2,4}, 赵俊^{2,5}

- (1. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室(兰州大学), 甘肃 兰州 730000;
2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 3. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075;
4. 天津天华北方建筑设计有限公司, 天津 300000; 5. 深圳瑞捷工程咨询股份有限公司, 广东 深圳 518129)

摘要:为研究承重型横孔连锁混凝土砌块砌体的抗剪性能,采用 3 种块型的砌块制作了砌体抗剪试件.每种块型的砌块试件均以 3 种砂浆强度为变量.首先对试件进行了静力剪切加载试验,观察试验现象,记录剪切破坏荷载.然后分析了影响砌体抗剪强度的主要因素,并和其他混凝土砌块砌体抗剪强度的试验结果以及规范计算值进行了对比.最后提出了考虑有效黏结面积计算混凝土砌块砌体抗剪强度的方法.研究表明:承重型横孔连锁混凝土砌块砌体的剪切破坏均为砂浆与混凝土砌块接触面的黏结剪切破坏.计算砌体抗剪强度时,应采用砂浆与砌块接触面的有效黏结面积;在此基础上,提出了承重型横孔连锁混凝土砌块砌体抗剪强度的计算方法,该方法不但可以准确计算该砌块砌体的抗剪强度,而且可以计算其他类型混凝土砌块砌体基于黏结剪切破坏的抗剪强度.

关键词:承重型横孔连锁混凝土砌块;抗剪试验;黏结破坏;抗剪强度;有效黏结面积

中图分类号:TU311.4;TU317.1

文献标志码:A

Shear Behavior of Load-bearing Horizontal-hole Interlock Concrete Block Masonry

ZHANG Jingshu^{1,2†}, GUO Hang^{1,2}, WANG Zheng^{2,3}, LIU Le^{2,4}, ZHAO Jun^{2,5}

- (1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China (Lanzhou University) of the Ministry of Education, Lanzhou 730000, China;
2. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
3. College of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
4. Tianjin Tianhua North Architectural Design Co Ltd, Tianjin 300000, China;
5. Ruijie Engineering Consulting Co Ltd, Shenzhen 518129, China)

Abstract: To investigate the shear behavior of Load-bearing Horizontal-hole Interlock Concrete Block (LB-HHICB), three kinds of blocks were used to fabricate the shearing specimens and each took three mortar strengths as variables. At first, a static shear loading test was carried out to investigate the failure profiles and shear failure loads of the specimens. Then, the main factors affecting the shear strength of the masonry were analyzed and compared with other similar test results and specification values. Finally, a method was proposed to calculate the shear strength of LB-HHICB considering the effective bonding area. The study showed that the shear failure of LB-HHICB was mainly bond failure of the interface between mortar and concrete block. When calculating the shear strength of masonry, the effective bonding area between mortar and concrete block was employed. Based on it, the calculation method on shear strength of LB-HHICB was put forward. This calculation method can not only accurately calculate the shear strength of this kind of block but also calculate the other types of concrete block based on the shear bond failure.

Key words: load-bearing horizontal-hole interlock concrete block (LB-HHICB); shear tests; bond failure; shear strength; effective bonding area

* 收稿日期:2019-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678283), National Natural Science Foundation of China(51678283)

作者简介:张敬书(1966—),男,甘肃天水人,兰州大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: jshzhang@lzu.edu.cn

混凝土砌块砌体由砂浆和砌块砌筑而成, 墙的延性较小, 砌体的抗剪强度是影响结构抗震性能的主要因素^[1]. 因此, 对砌体抗剪性能的研究, 直接关系到砌体结构在地震区的应用.

由于砌体的非均匀性和各向异性, 砌体在剪切作用时的力学特性与均质、各向同性材料不同^[2-3], 因此主要采用试验方法来研究砌体的抗剪强度, 从而建立砌体抗剪强度的计算方法.

由于砌块和砂浆的强度相对比较高, 因此在一般情况下, 砌体剪切破坏主要是砂浆与砌块之间黏结面的剪切破坏^[1,4], 即黏结剪切破坏. 对砌体黏结剪切破坏的研究较多. Mosalam 等^[5]和 Sarangapani 等^[6]研究发现, 砂浆与砌体黏结面的摩擦以及两者之间的化学键是黏结抗剪强度的主要组成部分. Lawrence 等^[7]认为, 砂浆与砌块的黏结作用是由于水泥水化产物渗透到砌块的空隙中形成的. Walker^[8]和 Jonaitis 等^[9]发现, 水泥水化产物的强度除了与水胶比有关外, 还与砌块表面温湿度相关. Thamboo 等^[10]和方萍等^[11]认为, 砂浆外加剂对黏结抗剪强度有较大提升作用. 此外, Sathiparan 等^[12]研究发现, 砌块的孔洞率对砌体抗剪强度有很大影响. 对于实际工程中的混凝土砌块而言, 在砌块类型、砌筑方式确定后, 砂浆强度是影响砌体抗剪强度的决定性因素^[13-14]. 施楚贤等^[15]、叶燕华等^[16]、黄靓等^[17]对砌块砌体进行了静力剪切试验, 分析了混凝土空心砌块砌体的破坏模式及其抗剪强度.

横孔连锁混凝土砌块是一种新型砌块, 具有砌筑效率高和节省砂浆的优点. 最初只有吴方伯研发的一种口字形的块型^[18], 一般仅用于填充墙. 承重型横孔连锁混凝土砌块^[19-20]的抗压强度较高, 可用于承重墙. 刘深和张敬书等^[21]对其抗压性能进行了试验研究, 认为该砌块强度可满足多层砌体结构承重墙的承压要求. 但该砌块砌体尚未进行剪切试验研究, 还没有适合于该砌块砌体抗剪强度的计算方法. 因此, 本文将对承重型横孔连锁混凝土砌块砌体的抗剪强度进行试验研究, 拟提出该砌体抗剪强度的计算方法.

1 试验概况

1.1 试件参数及材料性能

试验采用的承重型横孔连锁混凝土砌块均采用砌块成型机制作, 混凝土配合比相同. 砌块类型如图 1 所示, 共 3 种, 分别为 240 mm、290 mm 厚 H 形砌块和 240 mm 厚田字形砌块, 编号分别为 BH-240、

BH-290、BT-240.

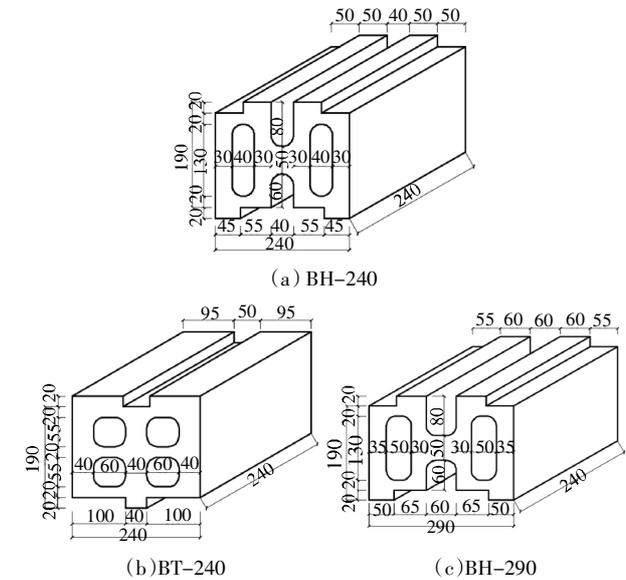


图 1 承重型横孔连锁混凝土砌块类型(单位:mm)

Fig.1 Type of LB-HHICB (unit:mm)

每种类型砌块分别采用 3 种不同强度的砂浆砌筑. 剪切试验前, 采用《砌体基本力学性能试验方法标准》(GB/T 50129—2011)^[22]的方法, 分别测得了砌块和砂浆的抗压强度. 测试结果见表 1.

表 1 试件基本参数

Tab.1 Basic parameters of the specimens

试件编号	块体强度 f_1 /MPa	砂浆强度 f_2 /MPa
BH-240	15.60	6.21, 9.92, 13.49
BH-290	13.20	6.21, 9.92, 13.49
BT-240	13.00	6.21, 9.92, 13.49

1.2 试件制作

《砌体基本力学性能试验方法标准》^[22]规定, 中、小型砌块砌体的剪切试验应采用双剪试件. 本试验的试件如图 2 所示, 分为上、中、下 3 个部分, 上部和下部为一个整块砌块, 中部为两个半块砌块. 砌块之间砌筑砂浆的厚度均为 10 mm. 试件有三个受力面, 各受力面均铺设一层 15 mm 厚的抹面砂浆. 试件尺寸为 240 mm×240 mm×610 mm.

每种类型砌块每种砂浆强度各设一组试件, 每组试件的数量为 8 个, 共制作了 72 个试件.

1.3 试验加载及量测

试件加载如图 3 所示. 首先将试件平放于试验台座上, 试件上下各垫一块 20 mm 厚钢板. 然后启动试验机在试件上施加向下的力. 加载到任意一个受剪面发生破坏即判定试验结束.

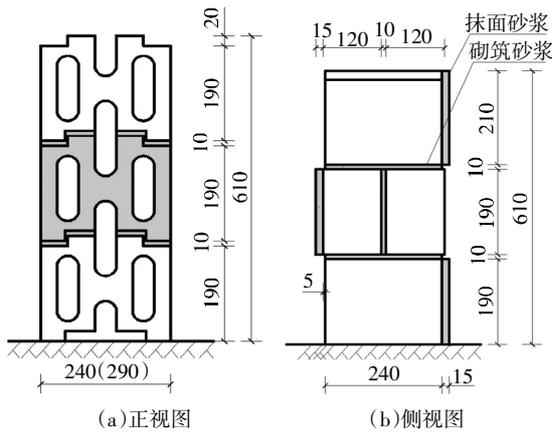


图2 BH-240(290)型试件(单位:mm)
Fig.2 Specimen of BH-240 (290) (unit:mm)

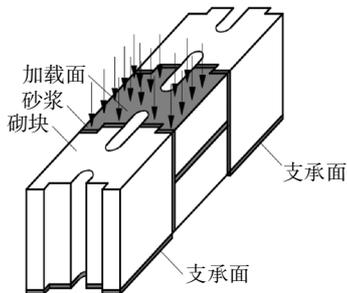


图3 试件加载示意图
Fig.3 Diagram of specimen loading

2 试验结果

2.1 试验现象及破坏形态

试件从加压到破坏的过程可分为两个阶段. 最初加载时试件无明显变化,随着荷载增加,试件底部砌块与砂浆之间开始出现微裂纹;之后随着荷载的增加,裂纹很快向上延伸;最后砂浆与砌块突然分开,荷载急剧下降,试件发生剪切破坏.

在72个试件中,除一个试件发生了两个剪切面的破坏外,其余试件均为单个受剪面的破坏. 破坏均发生在砂浆和砌块之间的接触面上,为黏结剪切破坏. 破坏照片如图4所示.



图4 试件剪切破坏照片
Fig.4 Shear failure photographs

2.2 极限荷载和抗剪强度

各组砌块砌体剪切试验的极限荷载见表2.

试件破坏前均为两个剪切面共同受力. 设一侧砂浆与砌块黏结面的面积为 A ,则所承担剪力为 $N_v/2$,故试件的抗剪强度 f_v 按式(1)计算.

$$f_v = \frac{N_v/2}{A} = \frac{N_v}{2A} \quad (1)$$

式中: N_v 为试验测得的极限荷载.

值得注意的是,式(1)中, A 为试件的一个受剪面面积. 根据《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)^[23]要求, A 应为砌体截面面积,即包含孔洞的毛面积 A_n . 但孔洞并不参与抗剪,实际参与抗剪的为扣除孔洞的净面积,即有效面积 A_n . 故本文分别按 A_n 、 A_n 计算砌体抗剪强度 f_{va} 、 f_{vn} ,结果见表2.

3 分析与讨论

3.1 抗剪强度影响因素分析

砌体的抗剪强度主要与砂浆强度、制作和试验条件及砌块表面粗糙度等因素有关. 由于本试验的混凝土砌块的混凝土配合比相同,均采用同一个砌块成型机制作,因此,可认为砌块表面粗糙度相同. 故本文从砂浆强度、施工水平和试验条件对抗剪强度加以分析.

3.1.1 砂浆强度

由表2可看出,3种砌块砌体的抗剪强度随着砂浆强度的增大而增大. 其原因是本文砌体试件的剪切破坏主要表现为砂浆与混凝土之间的黏结破坏. 砂浆强度越高,水泥用量越多,砂浆与砌块之间的水泥浆体也越多,因此,砂浆与砌块之间的黏结抗剪强度也越高.

3.1.2 制作和试验条件

制作及试验条件对砌体的抗剪强度也有重要影响. 本文试件破坏类型多为砂浆与砌块之间的黏结面发生破坏,且绝大多数为单个剪切面破坏.

从图2所示的试件制作来看,试件均竖直进行制作. 砌筑完毕后,也是竖放进行养护. 由于自重作用,两层砌筑砂浆中,上层的密实度小于下层,因此其黏结抗剪强度也不同.

再从图5所示的试验加载来看,试件并不是中心对称的,加载钢板中心偏向中间砌块左侧的砂浆缝,试件整体为偏心受力. 最终试件破坏形式绝大多数表现为单个剪切面的破坏.

表 2 剪切试验结果
Tab.2 Shear test results

试件编号	f_2 /MPa			N_i /kN				\bar{N}_i /kN	A_a /mm ²	A_n /mm ²	\bar{f}_{va} /MPa	\bar{f}_{vm} /MPa		
BH-240-Mb5	63.2	85.2	71.5	48.5	59.3	69.1	53.8	—	64.37	139 934	116 612	0.460	0.552	
BH-290-Mb5	6.21	60.3	101.2	68.4	95.9	84.0	61.1	54.5	93.3	77.34	166 322	132 002	0.465	0.586
BT-240-Mb5	68.4	76.6	52.6	69.2	40.0	42.7	69.0	—	59.79	137 448	137 448	0.435	0.435	
BH-240-Mb10	50.1	54.9	70.7	73.5	81.6	102.2	60.0	—	70.43	139 934	116 612	0.500	0.600	
BH-290-Mb10	9.92	123.0	54.3	80.0	51.6	52.0	67.9	118.7	—	78.21	166 322	132 002	0.470	0.592
BT-240-Mb10	94.6	95.1	53.9	101.5	101.8	60.8	75.2	—	83.27	137 448	137 448	0.606	0.606	
BH-240-Mb15	55.3	88.6	116.6	61.0	49.5	61.5	86.3	53.2	71.5	139 934	116 612	0.508	0.610	
BH-290-Mb15	13.49	69.2	56.6	121.2	58.3	90.9	115.8	81.6	88.3	85.24	166 322	132 002	0.513	0.646
BT-240-Mb15	68.9	106.4	100.6	112.5	104.1	100.6	79.0	72.3	93.05	137 448	137 448	0.678	0.678	

注: f_2 为砂浆强度; “—” 表示因故未测得数据或为离群值。

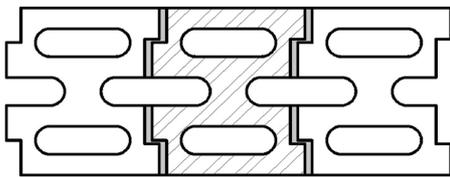


图 5 试件加载俯视图

Fig.5 Top view of specimen loading

若砌块是对称的, 加载也没有偏心, 则砌体的承载力会有少量的提高。

3.2 混凝土砌块砌体抗剪强度的计算

《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)^[23] 采用砌体横截面面积, 即毛面积计算抗剪强度。沿通缝的抗剪强度的计算公式见式(2)。

$$f_{vm} = k_5 \sqrt{f_2} \quad (2)$$

式中: f_{vm} 为砌体抗剪强度平均值; f_2 为砂浆抗压强度平均值; k_5 为与块材及砌体类别有关的参数, 混凝土砌块砌体为 0.069。

根据式(2)所计算的砌体抗剪强度 f_{vm} 和试验值 \bar{f}_{vn} 、 \bar{f}_{va} 等见表 3。

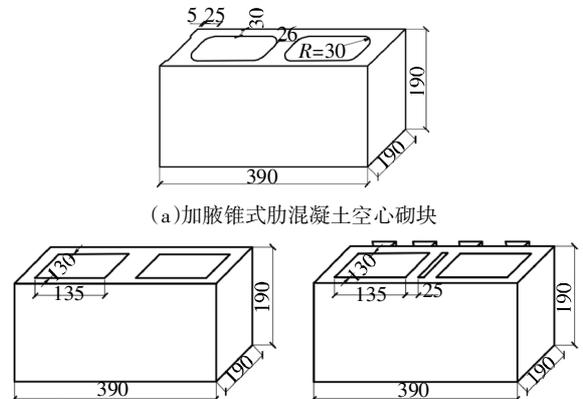
表 3 抗剪强度试验值及规范值

砂浆抗压 强度 f_2 / MPa	抗剪强度/MPa			$\bar{f}_{vn} / \bar{f}_{vm}$	$\bar{f}_{va} / \bar{f}_{vm}$
	\bar{f}_{vn}	\bar{f}_{va}	\bar{f}_{vm}		
6.21	0.525	0.452	0.172	3.05	2.63
9.92	0.599	0.525	0.217	2.76	2.42
13.49	0.645	0.567	0.253	2.55	2.24

从表 3 可看出, 试验值是规范^[23] 计算值的 2~3 倍。从式(2)可看出, 该式所计算的砌体抗剪强度仅与砂浆抗压强度有关, 而与有效面积无关。而横孔连锁混凝土砌块砌体砌筑面的有效面积远大于竖孔混凝土砌块砌体, 因此, 该式仅适用于砌筑面的有效面积变化不大的传统竖孔混凝土砌块砌体, 不适用于计算承重型横孔连锁混凝土砌块砌体抗剪强度。

由于混凝土砌块砌体的剪切破坏形式一般为砂浆层与砌块之间的黏结剪切破坏, 空心部分不承担剪力, 因此砌体所承担的剪力取决于砂浆与砌块之间的黏结抗剪强度和有效黏结面积。抗剪强度的计算应采用有效黏结面积而非毛面积。

有鉴于此, 本文采用砂浆与砌块有效面积计算图 6 所示的加腋锥式肋混凝土空心砌块^[24]、混凝土小型空心砌块^[15]、承重节能复合混凝土空心砌块^[16]及本文试验的抗剪强度。计算结果见表 4。



(a) 加腋锥式肋混凝土空心砌块

(b) 混凝土小型空心砌块

(c) 承重节能复合混凝土空心砌块

图 6 混凝土空心砌块

Fig.6 Hollow concrete block

表4 各砌块砌体抗剪强度值

Tab.4 Shear strength values of each block masonry

数据来源或 试件编号	$A_n /$ mm ³	$A_n /$ mm ³	$f_2 /$ MPa	$f_{va} /$ MPa	$f_{vn} /$ MPa	f_{vn} / f_{va}
中国建筑标准 设计研究院 ^[24]	73 465	35 998	—	—	—	—
			8.56	0.287	0.531	
施楚贤等 ^[15]	74 100	40 014	14.88	0.300	0.556	1.85
			18.55	0.387	0.717	
			5.83	0.202	0.381	
叶燕华等 ^[16]	74 100	39 273	7.61	0.198	0.375	1.89
			9.24	0.237	0.447	
BH-240-Mb5			6.21	0.460	0.552	
BH-240-Mb10	57 600	47 808	9.92	0.500	0.600	1.20
BH-240-Mb15			13.49	0.508	0.610	
BH-290-Mb5			6.21	0.465	0.586	
BH-290-Mb10	69 600	54 984	9.92	0.470	0.592	1.26
BH-290-Mb15			13.49	0.513	0.646	
BT-240-Mb5			6.21	0.435	0.435	
BT-240-Mb10	57 600	57 600	9.92	0.606	0.606	1.00
BT-240-Mb15			13.49	0.678	0.678	

从表4可看出,由于承重型横孔连锁混凝土砌块砌体砌筑面的有效面积与毛面积接近,因此采用不同面积计算的差值较小,田字形砌块则完全一致。竖孔混凝土砌块砌体砌筑面的有效面积与毛面积相差较大,因此采用不同面积计算的差值较大。

混凝土小型空心砌块^[15]、承重节能复合混凝土空心砌块^[16]及本文采用有效黏结面积计算的抗剪强度 f_{vn} 与砂浆抗压强度 f_2 关系如图7所示。

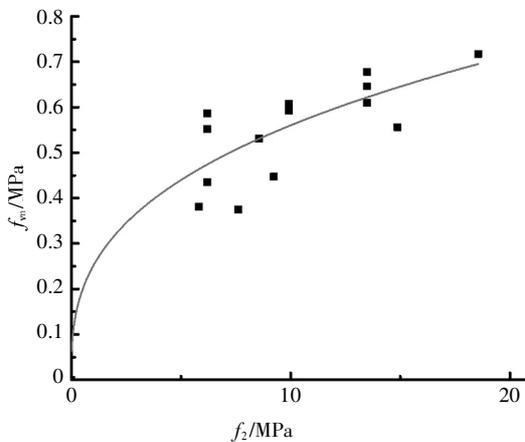


图7 抗剪强度与砂浆抗压强度关系

Fig.7 Relationship between shear strength and compressive strength of mortar

对表4、图7所示的采用有效面积计算的抗剪强度 f_{vn} 和砂浆抗压强度 f_2 进行回归分析,得出只考虑砂浆与砌块接触面黏结的抗剪强度公式见式(3)。

$$f_{vn} = 0.17\sqrt{f_2} \quad (3)$$

则砌体的剪切破坏荷载 N_V 可由公式(4)确定。

$$N_V = 2A_n \times f_{vn} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)得:

$$N_V = 0.34A_n \sqrt{f_2} \quad (5)$$

为验证上述采用有效面积计算抗剪强度的方法,对混凝土砖砌体^[25-27]、新型混凝土横孔空心砌块砌体^[28]、加长型混凝土砌块砌体^[29]、混凝土空心砖砌体^[30]和连锁式混凝土小型空心砌块砌体^[31]等各种类型砌块砌体的抗剪强度的试验结果 f_v 进行了统计,并与采用本文公式(3)计算的抗剪强度 f_{vn} 进行了对比,结果见表5。

表5 砂浆和混凝土抗剪强度试验值与计算值

Tab.5 Experimental and calculated values of shear strength between mortar and concrete

研究者	$f_2 /$ MPa	$f_v /$ MPa	$f_{vn} /$ MPa	f_{vn} / f_v
Hamid ^[25]	5.66	0.366	0.404	1.10
	14.69	0.483	0.652	1.35
Beal ^[26]	5.90	0.500	0.413	0.83
	7.10	0.500	0.453	0.91
	8.50	0.550	0.496	0.85
赵文兰等 ^[27]	4.79	0.421	0.379	0.90
	7.42	0.434	0.463	1.07
	9.64	0.759	0.528	0.70
吴方伯等 ^[28]	5.20	0.290	0.388	1.34
	6.50	0.370	0.433	1.17
	8.70	0.401	0.501	1.25
朱婉婕等 ^[29]	14.20	0.420	0.641	1.53
	5.24	0.396	0.389	0.98
	5.50	0.457	0.400	0.88
杨伟军等 ^[30]	8.20	0.565	0.487	0.86
	12.40	0.628	0.599	0.95
	20.50	0.965	0.770	0.80
童兴 ^[31]	41.80	1.243	1.100	0.88
	5.27	0.339	0.407	1.20
	7.06	0.432	0.452	1.05
	9.44	0.476	0.522	1.10

从表5可看出,除新型混凝土横孔空心砌块^[28]外,其他类型砌块计算值与试验值的比值在0.70~1.35之间,说明式(3)采用有效面积计算砌块砌体抗剪强度是可行的。

本文研究的承重型横孔连锁混凝土砌块与新型混凝土横孔空心砌块^[28]相似,但由于试验条件和砌块的块型限制,新型混凝土横孔空心砌块^[28]难以保证砌块凹槽中砂浆饱满,故该组计算值与试验值有一定差异,其比值在1.17~1.53之间。

对表5所列21组抗剪强度试验值与计算值数据进行统计,并进行 t 检验。

$$t = \frac{|\bar{f}_v - \bar{f}_m|}{\sqrt{\frac{n}{S_1^2 + S_2^2}}} \quad (6)$$

式中: \bar{f}_v 、 \bar{f}_m 分别为黏结抗剪强度试验值、计算值的平均值; n 为样本组数; S_1 、 S_2 分别为试验值、计算值的标准方差。

试验值与计算值统计结果见表6。

表6 试验值与计算值统计结果

Tab.6 Processing results of test and calculated values

抗剪强度	平均值/MPa	标准方差	t	(\bar{f}_m/\bar{f}_v)	$C.V.(f_m/f_v)$
f_v	0.524	0.223	0.10	1.03	0.20
f_m	0.518	0.168			

注: (\bar{f}_m/\bar{f}_v) 为计算值与试验值比值的平均值; $C.V.(f_m/f_v)$ 为计算值与试验值比值的变异系数。

由表6可知,采用本文提出方法所得黏结抗剪强度计算值与试验值的比值的平均值为1.03,变异系数为0.20。取显著性水平 $\alpha = 0.05$, $n_1 = n_2 = 21$,查 t 分布表可知 $T_{\alpha(n_1+n_2-2)} = 1.68$, $t = 0.10 < T_{\alpha(n_1+n_2-2)}$,说明试验值和计算值之间无显著性差异。

规范^[23]采用毛截面面积计算抗剪强度,这对于孔洞率变化不大的竖孔混凝土砌块^[15-16,24]来说,虽然偏于保守,但用于设计是可以的。而承重型横孔连锁混凝土砌块的孔洞率远小于竖孔混凝土砌块,采用规范方法计算承重型横孔连锁混凝土砌块的抗剪强度,就过于保守了。因此,本文采用砂浆和砌块扣除孔洞后的有效黏结面积计算砌体抗剪强度,不但符合混凝土砌块黏结剪切破坏的实际情况,在理论上更加严密,而且该方法适用面广,可用于所有混凝土砌块抗剪强度的计算。

4 结 论

根据以上分析,可得到以下结论:

1)由于横孔连锁混凝土砌块砌体砌筑面的有效面积远大于竖孔混凝土砌块砌体,因此现行规范的公式不能直接用于计算承重型横孔连锁混凝土砌块砌体的抗剪强度。

2)本文提出的采用砂浆和砌块扣除孔洞后的有效黏结面积计算砌体抗剪强度,符合混凝土砌块砌体黏结剪切破坏的实际情况,可用于所有类型混凝土砌块砌体抗剪强度的计算。

3)承重型横孔连锁混凝土砌块砌体的剪切破坏均为砂浆与混凝土砌块接触面的黏结剪切破坏。砂浆强度越高,砌体抗剪强度越高。

参考文献

- [1] MAHERI M R, SHERAFATI M A. The effects of humidity and other environmental parameters on the shear strength of brick walls: evaluation of field test data [J]. *Materials and Structures*, 2012, 45(6): 941—956.
- [2] TOMAŽEVIČ M. Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6: shear versus tensile strength of masonry [J]. *Materials and Structures*, 2009, 42(7): 889—907.
- [3] PENAVAL D, RADIĆ I, GAZIĆ G, *et al.* Mechanical properties of masonry as required for the seismic resistance verification [J]. *Technical Gazette*, 2011, 18(2): 273—280.
- [4] DEGHAN S M, NAJAFGHOLIPOUR M A, BANESHI V, *et al.* Mechanical and bond properties of solid clay brick masonry with different sand grading [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 174: 1—10.
- [5] MOSALAM K, GLASCOE L. Mechanical properties of unreinforced masonry [R]. San Francisco: Lawrence Livermore National Laboratory, 2009: 1—26.
- [6] SARANGAPANI G, REDDY V B V, JAGADISH K. Brick-mortar bond and masonry compressive strength [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2005, 17(2): 229—237.
- [7] LAWRENCE S J, CAO H T. Microstructure of the interface between brick and mortar [C]// Dublin: Proceedings of the 8th International Brick and Block Masonry Conference. 1988: 194—204.
- [8] WALKER P. Bond characteristics of earth block masonry [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1999, 11(3): 249—256.
- [9] JONAITIS B, MARČIUKAITIS G, VALIVONIS J. Analysis of the shear and flexural behavior of masonry with hollow calcium silicate blocks [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(4): 827—833.
- [10] THAMBOO J A, DHANASEKAR M, YAN C. Flexural and shear bond characteristics of thin layer polymer cement mortared concrete

- masonry [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 46: 104—113.
- [11] 方萍, 黄政宇, 尚守平, 等. 水泥基砂浆加固混凝土构件界面粘结强度的研究[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(3): 45—50.
FANG P, HUANG Z Y, SHANG S P, *et al.* Study on interfacial adhesive strength between cement-based mortar and concrete substrate [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(3): 45—50. (In Chinese)
- [12] SATHIPARAN N, ANUSARI M K N, SAMINDIKA N N. Effect of void area on hollow cement masonry mechanical performance [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2014, 39(11): 7569—7576.
- [13] ALECCI V, FAGONE M, ROTUNNO T, *et al.* Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 40: 1038—1045.
- [14] 梅迎军. 纤维聚合物水泥砂浆与基体界面粘结性能研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(4): 125—129.
MEI Y J. Performance of the bonding between fiber reinforced polymer mortar and substrate [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(4): 125—129. (In Chinese)
- [15] 旋楚贤, 谢小军. 混凝土小型空心砌块砌体受力性能[J]. *建筑结构*, 1999, 29(3): 10—12.
SHI C X, XIE X J. Mechanical behavior of small concrete hollow block masonry [J]. *Building Structure*, 1999, 29(3): 10—12. (In Chinese)
- [16] 叶燕华, 孙伟民, 张怀金, 等. 承重节能复合混凝土空心砌块砌体抗剪强度试验研究[J]. *建筑结构*, 2006, 36(11): 68—70.
YE Y H, SUN W M, ZHANG H J, *et al.* Experimental study on shear strength of composite hollow concrete block masonry for load-bearing and energy conservation [J]. *Building Structure*, 2006, 36(11): 68—70. (In Chinese)
- [17] 黄靛, 高翔, 陈良, 等. N式砌块砌体受剪性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(2): 14—17.
HUANG L, GAO X, CHEN L, *et al.* Research on the shear-resistance behaviors of N-type block masonry [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2010, 37(2): 14—17. (In Chinese)
- [18] 吴方伯, 陈伟, 黄海林, 等. 新型混凝土横孔空心砌块砌体受压性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(11): 1—5.
WU F B, CHEN W, HUANG H L, *et al.* Research on the compression behavior of a new type of concrete horizontal-hole hollow block masonry [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2010, 37(11): 1—5. (In Chinese)
- [19] 王政, 张敬书, 赵俊, 等. 承重型横孔连锁混凝土砌块的物理力学性能[J]. *混凝土与水泥制品*, 2016(6): 73—77.
WANG Z, ZHANG J S, ZHAO J, *et al.* Physical property of load-bearing horizontal-hole interlock concrete small hollow block [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2016(6): 73—77. (In Chinese)
- [20] 张敬书, 张伟鹏, 赵俊, 等. 承重型横孔连锁混凝土砌块的技术特点及应用前景[J]. *混凝土与水泥制品*, 2015(12): 71—74.
ZHANG J S, ZHANG W P, ZHAO J, *et al.* The technical characteristics and application prospect of load-bearing horizontal-hole interlock concrete small hollow block [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2015(12): 71—74. (In Chinese)
- [21] LIU S, ZHANG J S, LIU L, *et al.* Compressive performance of new types of load-bearing horizontal-hole interlocking concrete hollow blocks [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 22(6): 1368—1383.
- [22] GB/T 50129—2011 砌体基本力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 15.
GB/T 50129—2011 Standard test method for basic mechanical properties of masonry [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 15. (In Chinese)
- [23] GB 50003—2011 砌体结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 112—113.
GB 50003—2011 Code for masonry structure design [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 112—113. (In Chinese)
- [24] 05SG616 混凝土砌块系列块型[S]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005: 9—10.
05SG616 Series of concrete block type [S]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2005: 9—10. (In Chinese)
- [25] HAMID A A. Behavior characteristics of concrete masonry [D]. Hamilton: McMaster University, 1978: 279—316.
- [26] BEAL D L. Concrete block masonry bond strength [D]. Queensland: Queensland Institute of Technology, 1985: 901—914.
- [27] 赵文兰, 刘立新, 陈少伟, 等. 混凝土普通砖砌体受剪性能试验研究[J]. *兰州理工大学学报*, 2008, 34(1): 112—115.
ZHAO W L, LIU L X, CHEN S W, *et al.* Experimental investigation of shearing performance of concrete common brick masonry [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2008, 34(1): 112—115. (In Chinese)
- [28] 吴方伯, 陈伟, 周绪红, 等. 新型混凝土横孔空心砌块砌体受剪性能研究[J]. *建筑结构*, 2011, 41(10): 126—129.
WU F B, CHEN W, ZHOU X H, *et al.* Research on shear behavior of a new type of concrete horizontal-hole hollow block masonry [J]. *Building Structure*, 2011, 41(10): 126—129. (In Chinese)
- [29] 朱婉婕, 黄靛, 滕翰思, 等. 用于装配式墙体的加长型混凝土砌块砌体的受力性能试验研究 [J]. *结构工程师*, 2019, 35(3): 187—191.
ZHU W J, HUANG L, TENG H S, *et al.* Research on mechanical properties of prefabricated lengthened concrete block masonry [J]. *Structural Engineers*, 2019, 35(3): 187—191. (In Chinese)
- [30] 杨伟军, 禹慧, 田俊杰, 等. 混凝土空心砖砌体抗剪强度试验研究[J]. *长沙交通学院学报*, 2004, 20(3): 43—47.
YANG W J, YU H, TIAN J J, *et al.* Experimental study of the shear strength of concrete hollow brick masonry [J]. *Journal of Changsha Communications University*, 2004, 20(3): 43—47. (In Chinese)
- [31] 童兴. 连锁式混凝土小型空心砌块砌体抗剪性能研究[J]. *建筑结构*, 2009, 39(S2): 460—464.
TONG X. Experiment research on shear capability of chained small-sized hollow concrete block masonry [J]. *Building Structure*, 2009, 39(S2): 460—464. (In Chinese)