

文章编号: 1673-9469 (2019) 04-0001-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.04.001

低层装配式墙体水平缝坐浆连接抗剪性能试验研究

王二成^{1,2}, 王向阳¹, 杨宝坤¹, 郑贤贤¹, 张京军¹

(1.河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2.河北工程大学 河北省装配式结构技术创新中心,
河北 邯郸 056038)

摘要: 为编制低层装配式墙体在一种新型水平连接形式下抗剪承载力计算规范, 对51个预制墙体进行了不同条件的试验研究, 对其中的15个纯砂浆连接墙体抗剪承载力及破坏形态进行了分析。研究表明, 纯坐浆连接墙体受剪破坏具有明显的脆性破坏特征; 轴压比的增加, 引起砂浆层上下界面摩擦力的增大, 导致抗剪承载力的提高; 接地梁上表面与墙板下表面粗糙度对试件抗剪承载力有重要影响。最后, 通过试验结果推导出了现有文献中承载力计算的相关参数, 该计算式将为设有边缘构件的墙体承载力计算提供相关理论依据。

关键词: 装配式; 坐浆连接; 轴压比; 抗剪性能; 承载力计算

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Experimental Study on the Shear Performance of the Horizontal Joints of the Assembled Wall with Mortar

WANG Ercheng^{1,2}, WANG Xiangyang¹, YANG Baokun¹, ZHENG Xianxian¹,
ZHANG Jingjun¹

(1.School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2.Technology Innovation Center for Prefabricated Construction of Hebei, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: In order to compile a calculation standard for the horizontal shear capacity of the low-rise assembled wall under a new horizontal connection form, the research team carried out different conditions on 51 walls, and the paper sheared 15 of them. The results show that the shear failure of grouted wall has brittle failure characteristics; the shear bearing capacity increases with the increase of axial compression ratio; the roughness of the upper surface of grounded beam and the lower surface of wall plate have an important influence on the shear bearing capacity of specimens. Finally, based on the test results, the relevant parameters of bearing capacity calculation in the existing literature are deduced. The formula will provide a theoretical basis for the calculation of the bearing capacity of walls with edge members.

Key words: prefabricated; connecting with mortar; shear behavior; axial compression ratio; bearing capacity calculation

装配式建筑结构中, 上下层墙板或墙板与梁之间通过水平缝连接为一个整体。目前, 国内外对装配式墙体水平缝连接方式、构造形式及承载力计算已有相关研究, 王伟等^[1]认为对于钢筋混凝土水平缝抗剪, 前期抗剪作用主要由混凝土提供, 极限荷载主要由接触面摩擦力和钢筋提供。Rizkalla等^[2]

研究发现, 无筋贯穿水平缝时受剪承载力主要由竖向压力导致的摩擦力提供。Soudki等^[3-4]对预制混凝土剪力墙不同水平连接形式进行了研究。陈鹏等^[5-6]对现有多种装配式混凝土剪力墙结构节点形式及其研究成果进行归纳对比。赵作周等^[7-8]归纳分析了现有装配式剪力墙水平缝受力性能, 文中收集的

收稿日期: 2019-08-14

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(F2017402182)

作者简介: 王二成(1981-), 男, 河北邯郸人, 博士, 副教授, 从事装配式结构抗震方面的研究。

相关文献抗剪试验墙体总量可观,但考虑轴压作用的试验相对较少。曹万林等^[9-14]研究了多种水平连接形式及设计结构的剪力墙抗震抗剪性能,对有筋穿过拼缝墙体承载力提供了理论依据。

本文对一种预制墙板与基础之间采用无筋贯穿的砂浆连接水平缝抗剪承载力进行了研究,此种水平缝连接形式达到了施工方便、省时、经济的目的。本试验作为整个课题的一部分,将为在此基础上加设边缘构件的墙体承载力的研究做铺垫。

1 试验背景分析

装配式墙体有筋贯穿水平拼缝时,主要承力因素为界面摩擦作用及穿过水平拼缝的竖向钢筋抗剪作用。课题组对一种预制墙板与基础之间采用无筋贯穿的砂浆连接、墙板两端加设边缘构件的墙体水平抗剪承载力进行了研究(图1),试件中边缘构件水平缝有钢筋贯穿、中部预制墙板水平缝无钢筋贯穿。由于中部预制墙板缺少水平抗剪钢筋,所以试件破坏时很可能会发生沿水平缝的剪切破坏,此时水平抗剪承载力主要由砂浆层界面摩擦力、初始粘接力及边缘构件竖向钢筋抗剪力三部分承担(示意图1受力分析仅适用于小剪跨比墙体受剪发生剪切滑移破坏的情况)。而本文研究中部预制墙板与基础横梁之间通过纯砂浆连接在一起时,试件的抗剪性能及抗剪承载力的计算并推导了承载力计算式,该计算式将为在此基础上添加边缘构件的墙体发生剪切滑移破坏时的承载力计算提供相关理论依据。

2 试验概况

2.1 试件制作

装配式墙体砂浆连接水平缝抗剪试验试件由上部含筋墙板、基础含筋地梁及无筋砂浆水平拼缝组成。试验15个试件几何尺寸相同,按轴压比分为5组,3个试件为一组,其中上部墙板尺寸为1000 mm×120 mm×500 mm,基础梁尺寸1600 mm×300 mm×200 mm,砂浆层厚度为20 mm。第一组3个试件设计轴压比均为0,分别编号为WS-1、WS-2、WS-3;第二组至第五组墙体设计轴压比依次为0.05、0.1、0.2、0.3,编号以此类推至WS-15。

所有试件上部预制墙板均为双层双向配筋,钢

筋直径为 $\Phi 6$,基础梁横向钢筋及箍筋直径分别为 $\Phi 12$ 、 $\Phi 10$,钢筋布置见图2。根据相关文献^[15],坐浆之前对墙板下表面和地梁上表面进行凿毛处理,并对各试件毛面粗糙度进行了测量,其中墙板下表面以编号依次测量轮廓的最大高度值 R_z 在5.11~7.03 mm范围之内,地梁上表面以编号依次测量 R_z 值在6.34~7.89 mm范围之内。

2.2 材料力学性能

根据有关规范^[16]计算砂浆强度值如表1所示。试验当天测得混凝土立方体抗压强度为33.8 MPa。钢筋实测力学性能见表2。

表 1 砂浆强度统计			
Tab.1 Statistics of mortar strength			
养护时间 /d	7	14	28
砂浆立方体抗压强度 /MPa	5.2	7.7	9.5

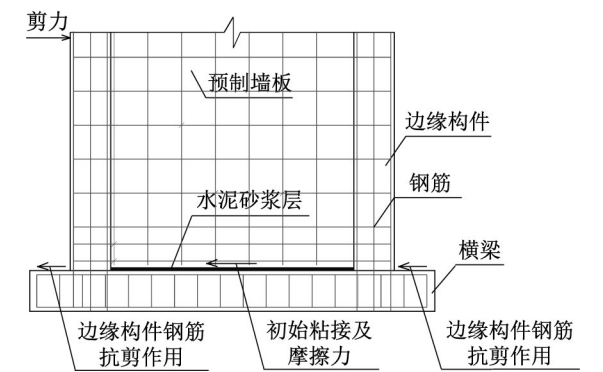


图 1 设有边缘构件墙体受力分析
Fig.1 Force analysis of walls with edge members

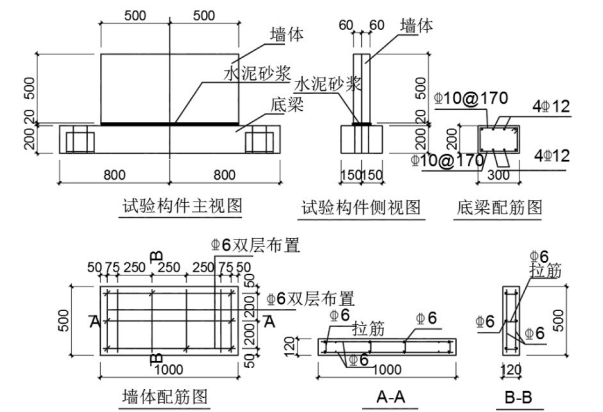


图 2 尺寸及配筋图 (单位: mm)
Fig.2 Dimensions and reinforcement drawing

表2 钢筋力学性能

Tab.2 Mechanical properties of reinforcement

钢筋直径 /mm	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	伸长率 /%
Φ6	400.9	554.3	2.08×10^5	19.95
Φ10	405.0	575.8	2.10×10^5	20.57
Φ12	408.6	577.1	2.13×10^5	23.16

2.3 加载装置与制度

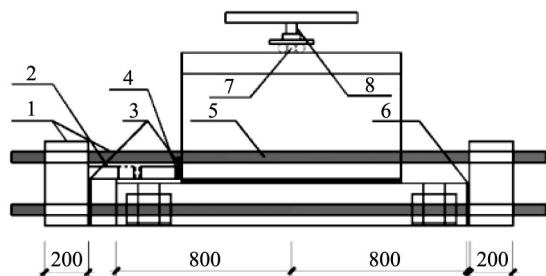
考虑到墙体上下楼板平面内刚度无限大,当墙体水平方向受力时,坐浆层上下界面受到水平剪力作用,发生水平滑移破坏。因此对于纯坐浆墙板抗剪试验,其目的在于测得砂浆层上下界面粘接作用与抗剪摩擦作用对试件抗剪承载力的影响。加载装置由反力架、5 000 kN 轴向液压式压力试验机、500 kN 水平作动器组成。还有 200 kN 轴向压力传感器、500 kN 水平方向压力传感器。装置见图 3。

2.4 测点布置与量测内容

墙体位移计布置见图 4, wy-1、wy-2、wy-3、wy-4 分别为 4 个位移计编号,距离地梁垂直距离均



(a) 加载装置实物图



(b) 加载装置示意图

注:图(b)中1—水平方向反力架;2—水平作动器;3—避免应力集中设置的分布砂浆垫层;4—水平力传感器;5—Φ50 mm 高强丝杠;6—避免应力集中的分布砂浆垫层;7—可减少顶部摩擦力的滚轴;8—轴向力传感器。

图3 试验加载装置(单位:mm)

Fig.3 Experimental loading device

为 60 mm,其中 wy-1 距离墙体端部 50 mm;wy-3 距离墙体水平受力面 50 mm;wy-4、wy-2 分别位于墙体两侧中点,wy-2 为参照。通过 wy-1、wy-3、wy-4 这 3 个位移计读数比较,可以测得水平缝开裂过程中墙体的塑性变形。L-1 为水平力传感器。

3 试验结果及分析

3.1 破坏过程及形态

通过试验得知,对于无轴压的 3 个试件,破坏之前,随着水平荷载的不断增大,4 个位移计的读数基本为零;当水平荷载达到破坏荷载时,砂浆层上表面或下表面接触面开裂,水平缝错动,4 个位移计读数基本相等;砂浆与墙板结合面破坏后,上部预制墙板基本完好,现象见图 5。对于有轴压试件,当水平荷载达到破坏荷载时,墙板受推区域发生小程度破坏,接触面具有不明显的开裂及裂缝延伸过程,开裂从受推区一端开始,随着荷载的增加接触面裂缝不断延伸,最终贯穿水平结合面,试件破坏,如图 6 所示。

3.2 抗剪承载力分析

15 个试件荷载-位移($F-d$)曲线见图 7。由图分析可知,对于无轴压试件,在达到破坏荷载之前位移基本为零;对于有轴压试件,在开裂荷载和极限

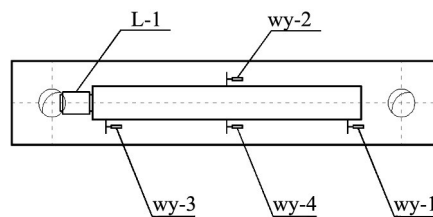
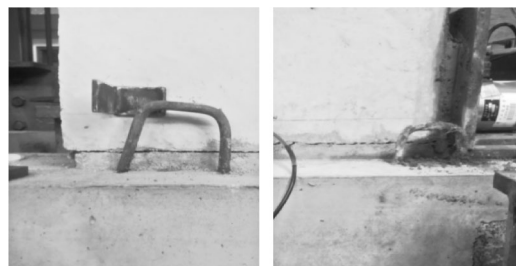


图4 测点布置示意图

Fig.4 Schematic diagram of measuring point arrangement



WS-1、WS-2、WS-3 开裂缝局部放大

图5 破坏现象

Fig.5 Damage phenomenon

荷载之间出现微小的滑动位移,数据统计及计算结果如表3所示。

根据图7及表3可知,同等条件下WS-2试件破坏荷载小于试件WS-1、WS-3,分析其原因在于试件WS-2试件墙板底面及基础梁上表面轮廓的最大高度值 Rz 小于试件WS-1、WS-3,试件WS-9极限承载力小于试件WS-7、WS-8原因也在于此。可见接触面轮廓的最大高度值 Rz 对试件纯剪切破坏情况下抗剪承载力有重要影响。

3.3 轴压比影响分析

根据表3,通过对不同轴压比下接缝抗剪承载力平均值分析得出:荷载-轴压比($F-u$)曲线不断上升,说明随着轴压比的增加,接缝抗剪承载力逐渐

增加,趋势见图8。

4 受剪承载力计算

4.1 基本假定

由于试件设计的特殊性和试件个数的有限性导致计算公式具有一定的局限性。因此根据试验破坏现象及试件极限承载力,参考相关研究^[17],针对装配式墙体纯坐浆连接水平缝抗剪承载力计算且具有如下假定:(1)试件破坏为水平缝方向纯剪切破坏;(2)试件水平缝剪切破坏发生在试件整体破坏之前;(3)试件最终破坏时内部钢筋不屈服;(4)试件设定轴压比较小,本文最大设计轴压比为0.3。



图6 试件WS-4至WS-15破坏现象典型实例
Fig.6 Failure phenomena of the specimens ws-4 to ws-15

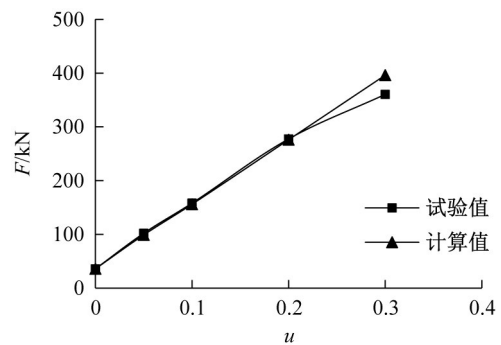


图8 承载力-轴压比($F-u$)关系曲线
Fig.8 Bearing capacity - axial compression ratio curve ($F-u$)

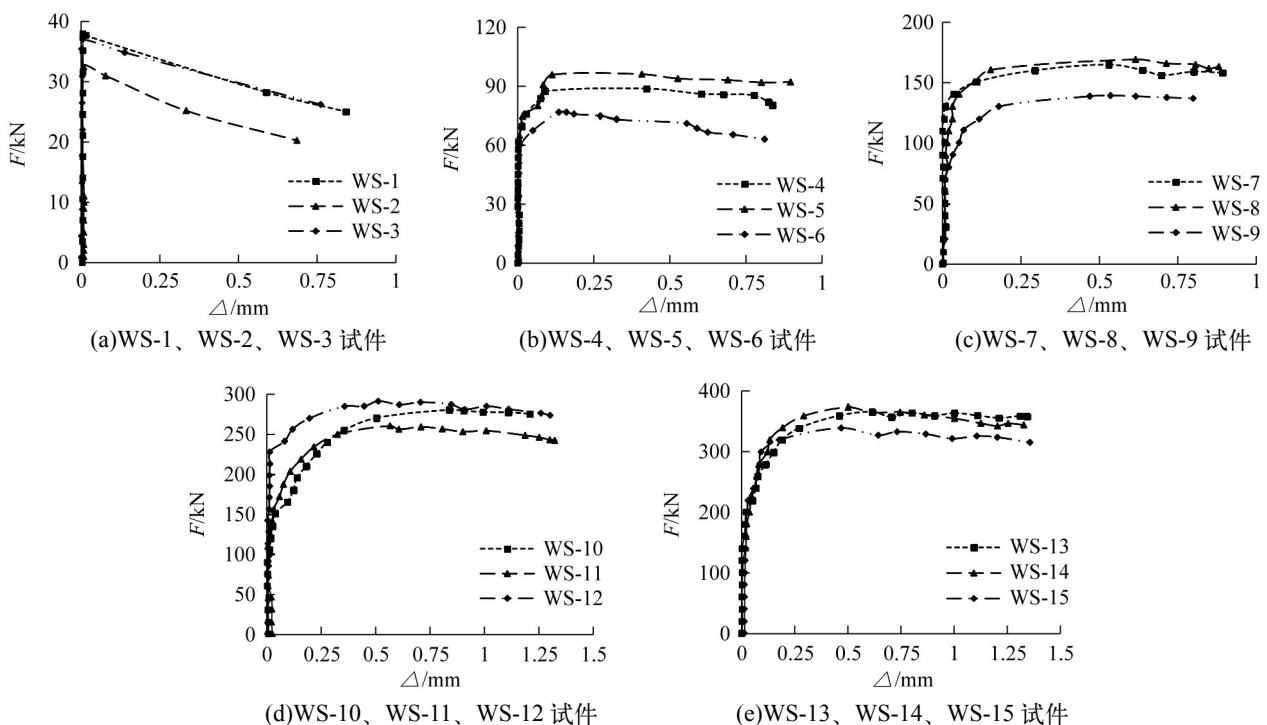


图7 荷载-位移($F-\Delta$)曲线
Fig.7 Load - displacement curve ($F-\Delta$)

4.2 计算依据

结合本文试验及实际工程中低层装配式房屋竖向荷载不大的情况,根据相关文献^[18],当轴压比较小即垂直于水平缝方向的正应力 $\sigma_0(\text{MPa})$ 与沿水平缝方向的剪应力 $\tau(\text{MPa})$ 比值较小时,库伦理论计算所得剪-压复合受力状态下承载力计算值较为合理^[19]。该理论认为:当微元体上剪应力 τ 达到某一限值时,材料沿该平面发生滑移破坏,其中的粘聚力 $c(\text{MPa})$ 和摩擦系数 μ 都与材料有关,而粘聚力 c 大

小为无轴压时砌体沿通缝抗剪强度平均值 $f_{v,m}, \mu$ 根据相关规范^[20]取值,如图9所示。

由于上下楼板平面内刚度无限大,墙板变形情况近似等效成水平滑动,宏观示意图见图10。结合前述分析,参考文献[21]中墙体无筋贯穿水平缝时承载力计算公式见式(1):

$$V=(f_{v,m}+\mu\sigma_0)A \tag{1}$$

式中: $f_{v,m}$ —无轴压时砌体沿通缝抗剪强度平均值;
 A —水平缝水平截面面积。

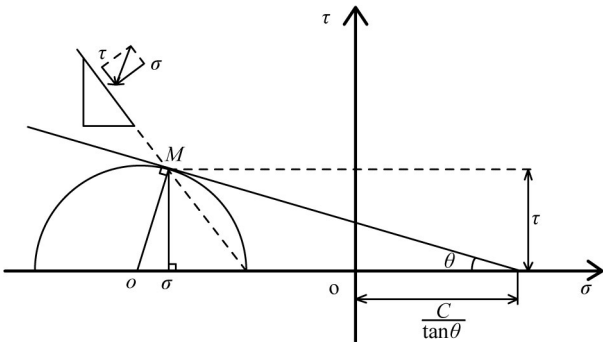


图9 库伦理论示意图

Fig.9 Coulomb theory schematic diagram

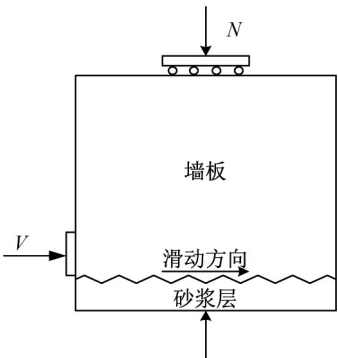


图10 模型宏观示意图

Fig.10 Macroscopic schematic diagram of model

表3 主要试验阶段试件承载力
Tab.3 The specimen's bearing capacity of the main test phase

试件编号	u	开裂点		极限点		试验平均值 $\bar{V}/\text{kN}$	理论值 V/kN	$\frac{\bar{V}}{V}$
		F_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	F_p/kN	Δ_p/mm			
WS-1	0	37.67	0.00	37.67	0.00	35.82	35.82	1.000
WS-2	0	32.51	0.00	32.51	0.00			
WS-3	0	37.00	0.00	37.00	0.00			
WS-4	0.05	75.59	0.00	88.84	0.70	87.27	98.88	0.88
WS-5	0.05	70.11	0.00	96.16	0.20			
WS-6	0.05	60.22	0.00	76.80	0.60			
WS-7	0.1	126.93	0.00	165.22	0.51	158.05	155.94	1.014
WS-8	0.1	108.81	0.00	169.41	0.62			
WS-9	0.1	90.51	0.00	139.51	0.54			
WS-10	0.2	195.70	0.00	280.60	0.84	277.48	276.06	1.005
WS-11	0.2	203.59	0.00	260.51	0.57			
WS-12	0.2	247.73	0.00	291.34	0.37			
WS-13	0.3	199.48	0.00	366.83	0.60	360.39	396.18	0.910
WS-14	0.3	190.79	0.00	374.18	0.50			
WS-15	0.3	185.72	0.00	340.16	0.47			
平均值	-	-	-	-	-	-	-	0.962
变异系数	-	-	-	-	-	-	-	0.058

注: $F_{cr}、\Delta_{cr}$ 分别为试件开裂荷载和开裂位移; $F_p、\Delta_p$ 分别为试件极限荷载和极限位移; $\bar{V}、V$ 分别为每组3个试件极限荷载平均值和极限荷载理论计算值; u 为轴压比。

通过试验结果计算所得 μ 值在0.63~0.77之间,基本符合规范^[20]所规定的干燥情况下摩擦面 μ 的取值。

4.3 抗剪承载力计算值与实际值对比

由图8及表3中抗剪承载力试验值与计算值对比,可以看出试验值与计算值大小及趋势基本相同,且计算得出 V/V 平均值为0.962,变异系数为0.058,表明试验值与计算值吻合良好。

5 结论

1) 对于无竖向压力的墙体,在剪力作用下水平缝具有明显的脆性破坏特征,破坏时墙板无损坏;而对于有竖向压力墙体,在剪力作用下水平缝出现不明显的开裂、延伸、贯通的破坏过程,在达到破坏荷载时墙板发生小程度破坏,说明轴压力对试件破坏过程及最终破坏现象有一定影响。

2) 墙板下表面和地梁上表面轮廓的最大高度值 R_z 对试件纯剪切破坏情况下抗剪承载力具有重要影响。

3) 轴压比的增加,引起砂浆层界面摩擦力的增大,导致试件抗剪承载力的提高。通过试验结果反推了现有公式中的相关参数,其计算结果与试验结果吻合良好,进一步证明了本次试验的可靠性及该理论计算的可行性。该计算式将为设有缘构件的墙体发生沿水平缝的剪切滑移破坏时的承载力计算提供相关理论依据。

参考文献:

- [1] 王伟,苏小卒,赵勇.钢筋混凝土界面抗剪承载力计算方法比较研究[J].结构工程师,2010,26(4):130-136.
- [2] RIZKALLA S H, SERRETTE R T, HEUVEL J S, et al. Multiple Shear Key Connections for Precast Shear Wall Panels[J]. PCI Journal, 1989, 34(2): 104-120.
- [3] SOUDKI K A, RINZALLA S H, LEBLANC B, et al. Horizontal Connections for Precast Shear Walls Subjected to Cyclic Deformations Part 1: Mild Steel Connections[J]. PCI Journal, 1995, 40(4): 78-96.
- [4] SOUDKI K A, RINZALLA S H, DAIKI W R W, et al. Horizontal Connections for Precast Concrete Shear Walls Subjected to Cyclic Deformations Part 2: Prestressed Connections[J]. PCI Journal, 1995, 40(5): 82-96.
- [5] 陈鹏,张兆强,周琼瑶.装配式混凝土剪力墙结构连接方式研究及应用综述[J].混凝土与水泥制品,2018(3):58-63.
- [6] 臧旭磊,朱张峰.装配式混凝土剪力墙结构节点连接形式发展现状[J].混凝土与水泥制品,2017(9):51-55.
- [7] 黄榜彪,卢强,朱基珍,等.矩形孔烧结页岩砖砌体抗剪试验研究[J].广西科技大学学报,2016,27(2):27-31.
- [8] 赵作周,周剑,侯建群,等.装配式混凝土剪力墙结构水平缝抗剪机理及承载力计算方法综述[J].建筑结构,2015,45(12):40-47.
- [9] 薛伟辰,古徐莉,胡翔,等.螺栓连接装配整体式混凝土剪力墙低周反复试验研究[J].土木工程学报,2014,47(S2):221-226.
- [10] 钱稼茹,彭媛媛,张景明,等.竖向钢筋套筒浆锚连接的预制剪力墙抗震性能试验[J].建筑结构,2011,41(2):1-6.
- [11] 种迅,万金亮,蒋庆,等.水平拼缝部位增强叠合板式剪力墙抗震性能试验研究[J].工程力学,2018,35(4):107-114.
- [12] 杨万斌,刘玉平,刘丽娟.剪力墙平面布置对框剪结构抗震性能影响[J].河北工程大学学报:自然科学版,2013,30(4):17-20.
- [13] 申彦利,彭倩倩.剪力墙对框架抗震性能的影响研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2013,30(4):21-24.
- [14] 曹万林,秦成杰,董宏英,等.装配式单排配筋再生混凝土中高剪力墙抗震性能研究[J].地震工程与工程振动,2018,38(1):108-116.
- [15] GB/T3505-2009,产品几何技术规范(GPS)表面结构轮廓法术语、定义及表面结构参数[S].
- [16] JGJ/T70-2009,建筑砂浆基本性能试验方法标准[S].
- [17] 张锡治,马健,韩鹏,等.装配式剪力墙齿槽式连接受剪性能研究[J].建筑结构学报,2017,38(11):93-100.
- [18] ANDREAU S U. Failure Criteria for Masonry Panels under In-plane Loading[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(1): 37-46.
- [19] 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.
- [20] GB50003-2011,砌体结构设计规范[S].
- [21] 施楚贤,周海兵.配筋砌体剪力墙的抗震性能[J].建筑结构学报,1997(6):32-40.

(责任编辑 王利君)