

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.004

带洞口加强肋复合墙体抗剪承载力研究*

陈叶顺, 陈国新

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:对2樘1/2比例带洞口(开门洞、开窗洞)加强肋复合墙体进行低周反复荷载作用下的伪静力试验,分析带洞口墙体的受力性能;在试验研究的基础上,针对洞口大小等影响加强肋复合墙体抗剪承载力的主要因素,建立墙体的非线性有限元模型进行分析;结合配筋砌体结构、框架结构、密肋复合墙体结构等相关试验资料,分析带洞口加强肋复合墙体的抗剪机理,提出带洞口加强肋复合墙体抗剪承载力计算公式,并给出公式的适用条件。试验结果表明带门洞墙体和带窗洞墙体均有着良好的抗倒塌能力和变形能力;数值模拟结果表明带门洞墙体的抗剪承载力随门洞的增大呈线性递减关系,带窗洞墙体的抗剪承载力随窗洞的增大呈二次函数递减关系;当带窗洞墙体洞口率高于17.1%时,应在窗洞两侧设置加强肋柱,以弥补洞口引起的抗剪承载力削弱;计算结果与试验结果对比表明,公式有较好的计算精度,满足工程设计需要。

关键词:加强肋复合墙体;洞口;低周反复荷载;有限元分析;抗剪承载力

中图分类号: TU398.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)03-0343-10

Study on Shear Capacity of Reinforced Rib Composite Wall with the Hole

CHEN Yeshun, CHEN Guoxin

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In this study, the pseudo static test is conducted on two reinforced rib composite walls with hole (opening door hole and opening window hole) under low cycle repeated load, whose scales are 1:2 entirely. The mechanical properties of the walls with the hole are analyzed. On the basis of the test research, in view of the main factors affecting the shear capacity of reinforced rib composite walls such as the size of the portal, the nonlinear finite element model of the wall is established for analysis. Combined with the reinforced masonry structure, the frame structure, the multi ribbed composite wall structure and other related experimental data, the shear mechanism of the reinforced rib composite wall with the hole is analyzed. Meanwhile, the calculation formula of the shear bearing capacity of the reinforced rib composite wall with the hole is proposed, and the applicable conditions of the formula are given. The test results show that the walls with the door hole and the window hole have good anti-collapse ability and deformation capacity. The numerical simulation results show that the shear capacity of the wall with a door hole decreases linearly with the increase of the door opening, while the relationship between shear capacity of the wall with a window hole and the increase of the window hole

* 收稿日期:2018-06-16;修回日期:2018-08-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51668063)资助

作者简介:陈叶顺(1992-),男,硕士研究生。主要从事新型建筑结构体系方面的研究。Email: 1192156691@qq.com

通讯作者:陈国新(1978-),男,教授,博士。主要从事新型建筑结构体系方面的研究。Email: xjbncgqx@163.com

follows a quadratic decreasing function. When the opening rate of the wall with a window is higher than 17.1%, reinforcement rib columns should be installed on both sides of the window to compensate for the weakening effect of the shear capacity caused by the hole. The comparison between the calculated and experimental results shows that the calculation precision of the proposed formula is high and the formula can meet the needs of engineering design.

Keywords: reinforced rib composite wall; hole; low reversed cyclic lateral loading; finite element analysis; shear bearing capacity

引言

带纵向加强肋复合墙结构是一种在密肋复合墙结构(图1)基础上延伸而来的新型结构体系^[1-3],具有节能、抗震、环保、施工方便等显著优点。密肋复合墙结构体系采用装配整体式的施工工艺,其对大型施工设备依赖性高,大大限制了该结构体系在相对落后偏远村镇地区的推广应用。基于上述问题,提出一种现砌式带纵向加强肋复合墙体结构体系(图2),该结构体系由保温性能良好的轻质砌块和隐型框架组成,轻质砌块可作为墙体承重材料,在砌体内沿墙体高度方向每隔一定间距砌入一道与墙体等厚度但高度较小且配筋率较小的钢筋混凝土肋梁作为纵向加强肋,二者协同工作、共同受力,并与边框柱、暗梁整浇在一起,约束着内部保温性能良好的砌块,形成共同工作的复合砌体剪力墙结构。

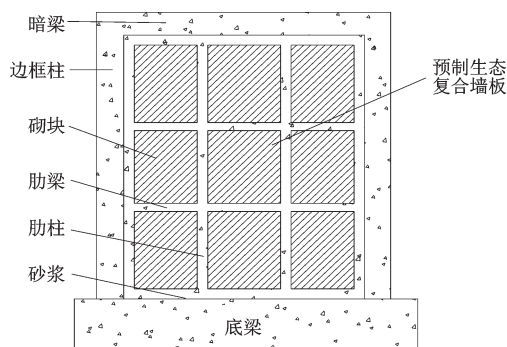


图1 装配式密肋复合墙结构

Fig.1 Prefabricated multi-ribbed wall structure

由于建筑使用功能和设备安装的需要,墙体本身不可避免地需要开设门窗洞口,历次震害表明洞口处是整个墙体的薄弱部分,开洞破坏了墙体的整体性,且会削弱墙体的抗剪承载力等抗震性能^[4],而在地震荷载作用下,结构的抗剪承载力是起到决定性控制因素的。目前无洞口加强肋复合墙体的抗

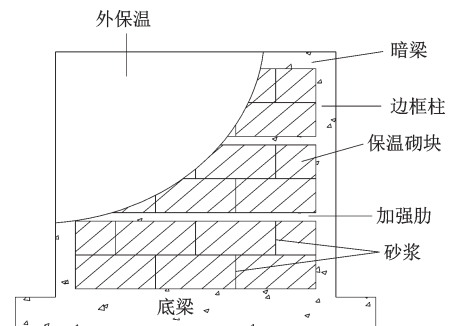


图2 现砌式加强肋复合墙结构

Fig.2 Cast-in-place reinforced rib composite wall structure

剪承载力已经取得了一定的研究成果,文献[5]提出了无洞口加强肋复合墙体的抗剪承载力公式,但带洞口加强肋复合墙体抗剪承载力的研究仍然较少,因此为探究洞口对加强肋墙体抗剪承载力影响,在试验研究的基础上,针对洞口大小等影响加强肋复合墙体抗剪承载力的主要因素,建立墙体的非线性有限元模型进行分析;结合配筋砌体结构^[6]、框架结构^[7]、框架-密肋复合墙体结构^[8]等相关试验资料,分析带洞口加强肋复合墙体的抗剪机理,提出带洞口加强肋复合墙体抗剪承载力计算公式,并给出公式的适用条件。

1 试验概况

1.1 墙体设计

本次试验设计了2榀带洞口加强肋复合墙体,其中试件1为带窗洞墙体,试件2为带门洞墙体。带窗洞墙体窗洞边未设肋柱,而开门洞墙体门洞边设有肋柱。各试件厚度均为100mm,模型比例为1:2,高宽比为1:1,外框梁和外框柱纵筋采用HPB300钢筋,表示为 $4\phi 6$,箍筋采用冷拔丝,表示为 $\phi^b 4@100$;肋梁和肋柱配纵筋 $4\phi^b 4$,箍筋采用14号铁丝,表示为 $14\# @100$,各试件的尺寸如图3所示。

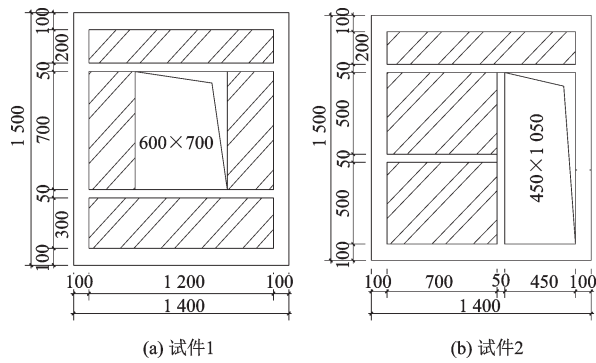


图3 墙体尺寸详图

Fig.3 Detailed map of the wall size

1.2 材料力学性能

2 槓带洞口加强肋复合墙体各材料力学性能见表1和表2。

表1 混凝土与砌块基本物理、力学性能

Table 1 Fundamental properties of concrete and block

材料类型	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压强度/MPa
C30混凝土	25	40.8
加气混凝土砌块	5.6	3.2

表2 钢筋材性

Table 2 Properties of steel bar

直径/mm	屈服强度/ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	极限强度/ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	弹性模量/ GPa
2	374.7	407.0	198
4	451.2	499.1	205
6	403.5	536.7	208

1.3 加载方案

本试验采用水平低周反复加载^[9],试验装置如图4所示。

(1)对2槓带洞口墙体先施加竖向荷载,竖向荷载稳压后施加水平荷载。竖向荷载按相似比例关系换算到3层楼墙体所受的竖向荷载计算,均为

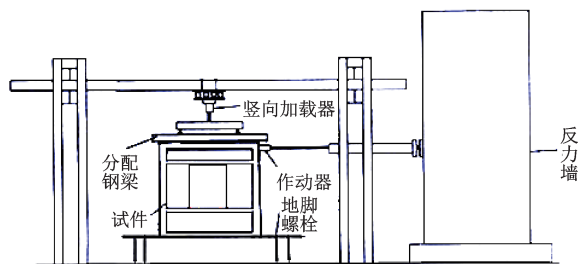


图4 试验装置

Fig.4 Diagram of the test device

60 kN,为保持墙体竖向加载稳定,竖向荷载按两级施加,第一级施加30 kN,持续两分钟后待墙体稳定后进行下一级荷载的施加。

(2)水平荷载:竖向荷载加载完毕后,持续两分钟待墙体反应稳定后,此时水平荷载由液压作动器通过反力墙施加到试验墙体的顶部,加载全过程都采用位移控制。水平加载时,墙体屈服前加载速率保持在0.2 mm/s,墙体屈服后加载速率为0.4 mm/s,墙体屈服后开始循环加载,每级位移下循环3次,加载循环直至墙体破坏。

2 试验结果分析

2.1 破坏过程分析

两槓带洞口墙体最终破坏如图5所示。竖向荷载加载过程中,试件1和试件2均无明显现象。水平荷载加载至开裂荷载时,两槓带洞口墙体砌块首先出现微裂缝;随着荷载的增大,微裂缝数量增多,裂缝变宽,且裂缝延伸至肋梁和外框柱;当水平荷载增大到极限荷载时,试件1窗洞左侧砌块裂缝突然增大,与肋梁脱开,而试件2沿墙体高度方向第一道肋梁出现多道竖向通缝,第二道肋梁破坏相对较轻。墙体达到破坏阶段时,试件1窗洞两侧砌块均与墙体完全脱开,肋梁与外框柱相交处混凝土出现多道贯通斜裂缝,局部裂缝宽达5 mm,而外框柱底部混凝土破坏程度相对较轻;试件2达到破坏阶段时门洞边砌体裂缝宽度较小,裂缝分布较均匀,砌块耗能作用发挥较充分,且墙体外框柱底部出现贯通斜裂缝。



(a) 试件1

(b) 试件2

图5 墙体最终破坏

Fig.5 Photograph of final failure of the walls

2.2 骨架曲线

骨架曲线^[10]是滞回曲线各加载等级第一循环峰值点所连成的包络线,带门洞和带窗洞墙体的骨架曲线对比如图6所示。

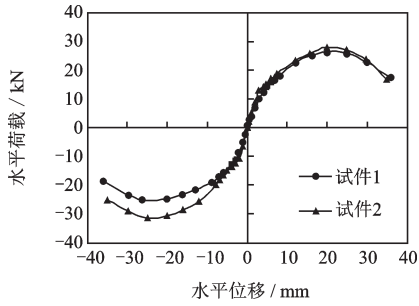


图6 2榀带洞口墙体骨架曲线
Fig.6 Wall skeleton curve

由图6可知,在水平和竖向荷载共同作用下,墙体骨架曲线均有着较明显的开裂点、屈服点、最大荷载点和极限位移点,即均经历了弹性、弹塑性和破坏三个阶段。试件1和试件2骨架曲线变化趋势相似,且在曲线下降段都较为平缓,说明两榀带洞口墙体有着持续的承载力能力,墙体加载过程中砌

块、肋梁和外框能依次发挥作用。

试件2反向受拉的水平极限承载力明显大于正向受推的水平极限承载力。原因是试件2开有门洞,墙体左右刚度和承载力不对称,左侧刚度大而右侧刚度小,加载水平力后墙体受力不均衡,因此导致墙体正向和反向的水平极限承载力有明显差异。

2.3 特征荷载和特征位移

为对比带门洞和带窗洞加强肋复合墙体的受力性能,将2榀带洞口加强肋复合墙体的开裂点、屈服点、极限荷载点、极限位移点的荷载和位移进行对比,见表3。墙体水平极限承载力以实测值为准,正反两个加载方向不一致的取水平极限承载力绝对值的平均值;延性按照水平承载力降至 $0.85F_{max}$ 时对应的位移 Δ_u 除以屈服位移 Δ_y 所得出的具体数值计算,结构位移延性系数表达式为 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ 。

表3 墙体特征荷载及特征位移

Table 3 Characteristic loading and characteristic displacement of the walls

试件 编号	开裂点		屈服点		最大荷载点		极限位移点			极限屈服位移角 $\theta = \Delta_u / h$
	P_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	P_y/kN	Δ_y/mm	P_{max}/kN	Δ_{max}/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	延性	
试件1	7.7	2.3	22.2	9.8	26.1	23.5	22.2	34.4	3.49	1/41
试件2	8.3	2.2	23.3	10.1	29.5	24.0	25.1	36.7	3.63	1/44

由表3可知,试件1和试件2的延性系数分别为3.49和3.63,均满足钢筋混凝土结构关于位移延性系数为3~4的要求^[11],说明两榀带洞口墙体都有着良好的延性。

两榀带洞口墙体加载的全过程中,未发现倒塌现象。试件达到破坏阶段时,砌体已基本退出工作,由肋梁、肋柱及外框组成的框架能仍能承担全部的竖向荷载,表明两榀带洞口墙体有着良好的抗倒塌能力;此时试件1和试件2的极限屈服位移角分别为1/41和1/44,满足规范要求的弹塑性层间位移角1/50^[12]的要求,说明两榀带洞口墙体有着良好的变形能力。

3 墙体非线性有限元分析

3.1 建立墙体模型

采用ABAQUS有限元程序建立带洞口加强肋

复合墙体数值模型。复合墙体内混凝土和蒸压加气混凝土砌块均采用软件中的塑性损伤本构模型,并参考《混凝土结构设计规范》^[12]在软件中对混凝土和砌体参数进行设定,钢筋采用其理想本构模型,各材料具体的应力—应变本构关系参考文献^[13]确定;混凝土与蒸压加气混凝土砌块单元均选用八节点六面体实体单元C3D8R模拟,钢筋选用二节点三维杆单元T3D2模拟,即桁架单元模型。

模拟试验采用整体式模型的建模方法,认为砂浆和砌块协同变形,不存在相对滑移,因此复合墙体内接触属性只存在于砌块和混凝土之间。砌块和混凝土接触属性采用Tie连接,认为砌块和混凝土能协同受力,不存在相对滑移;钢筋和混凝土之间选用Embedded Region命令将钢筋完全植入混凝土中。在墙体上表面的中心位置建立参考点,并用Constraint命令使参考点与墙体上表面完全耦合,以便通过RP参考点施加水平荷载。混凝土和蒸压加气混凝土砌块网格划分时,网格种子的近似全局尺

寸为0.05,即墙体网格单元的尺寸50 mm×50 mm。钢筋网格划分时,钢筋单元的种子近似全局尺寸为0.03,钢筋是线单元,即钢筋单元尺寸为30 mm。本文复合墙体内各材料的破坏判定包含在ABAQUS软件的各项材料的弹塑性参数设置中,认为材料达到其屈服强度即认为材料破坏,因此并未给出破坏准则。

3.2 模型验证

将试件1和试件2试验原型与数值模型的骨架曲线进行对比,如图7所示。

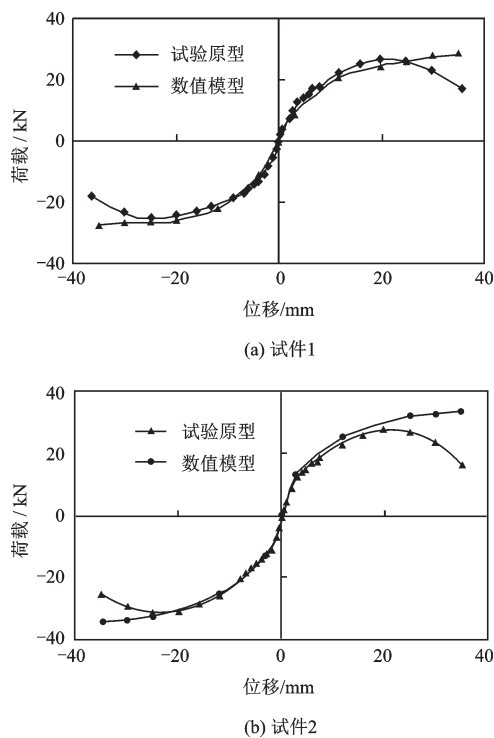


图7 墙体试验与模型骨架曲线对比

Fig. 7 Comparison of wall test result and model skeleton curve

由图7可见,试件1和试件2墙体数值模型模拟的骨架曲线和试验原型的骨架曲线在达到极限荷载点之前吻合度较好,超过极限荷载点之后吻合度较差。由于数值模型并未考虑试件在实现制作中的施工质量,且在建立模型时没有考虑混凝土和钢筋、混凝土和砌体之间的相对滑移,因此有限元模型与试验原型必然会产生一定的差异,而本次2榀带洞口墙体数值模型与试验的相对误差总体较小,可作为带洞口加强肋复合墙体抗剪承载力公式的理论分析模型。

4 墙体抗剪承载力分析

4.1 抗剪机理分析

依据带洞口加强肋复合墙体试验现象及试验数据,得到其抗剪机理如下:

(1) 水平荷载作用下,带洞口加强肋复合墙体经历了弹性、弹塑性和破坏三个阶段^[14],墙体内砌块首先开裂,随着荷载的不断增大,砌块裂缝伸展、延伸至肋梁,肋梁端部形成塑性铰,最后裂缝延伸至外框柱,外框柱发生弯剪破坏^[15],墙体按照砌块-肋梁-外框的顺序依次破坏,

(2) 混凝土肋梁与外框组成的框格与砌体相互支撑、相互约束、共同受力,在墙体三阶段过程中按照各自刚度承担相应荷载,并不断进行内力重分配,墙体各部件间具有良好的协同工作性能。

(3) 带洞口加强肋复合墙体具有多道抗震防线,具体表现为:当墙体内砌块出现少量裂缝时,墙体处于弹性阶段,水平荷载主要由砌体和外框柱混凝土提供;当裂缝延伸至肋梁和外框柱时,肋梁受拉屈服,外框柱弯剪屈服,此时墙体达到极限阶段,水平荷载主要由肋梁和砌块承担,砌块被框格约束,其抗剪承载力维持在最大抗剪承载力附近;破坏阶段砌块逐渐退出工作,此时加强肋复合墙体退化为由外框和肋梁组成的框架结构体系,此时水平荷载主要由外框柱和肋梁承担。

(4) 带洞口加强肋复合墙体肋梁作用与配筋砌体中水平钢筋作用相同,其不仅承担了水平剪力,同时还改变了墙体内砌块的受力性能。一方面,肋梁、肋柱与外框组成的框格对砌块的约束延长了砌块的开裂时间;另一方面,开裂后的砌块在约束状态下同时受到水平荷载和竖向荷载的共同作用,使框格内砌体的剪摩作用更加显著。

4.2 抗剪承载力计算公式

带洞口加强肋复合墙体抗剪承载力是由外框柱、肋梁与砌体三部分叠加得到,主要影响因素是洞口率、高宽比和竖向荷载大小,其抗剪承载力的统一表达式为:

$$V_u = \eta [V_c + \alpha_1 \alpha_2 V_m + \alpha_3 V_l] \quad (1)$$

式中, η 为洞口折减系数; V_c 为外框柱抗剪承载力; V_m 为复合墙体中砌体的抗剪承载力; V_l 为复合墙体中钢筋混凝土肋梁的抗剪承载力; α_1 为墙体高宽比

影响系数; α_2 为砌体承载力放大系数; α_3 为肋梁承载力发挥系数。

4.2.1 外框柱抗剪承载力

带洞口加强肋复合墙体外框部分与框架结构相似,且试验结果表明,外框柱在墙体破坏时,发生的是弯剪破坏,柱顶、柱底均形成塑性铰,因此复合墙体中外框柱的抗剪承载力为:

$$V_c = 4M_{f,y}/H \quad (2)$$

式中, $M_{f,y}$ 为外框柱受拉侧钢筋屈服时的弯矩,外框柱一般采用对称配筋,正截面受弯承载力为 $M_{f,y} = f_{t,y}A_{f,s}(h_{f,0} - a_s)$, $h_{f,0}$ 为外框柱截面有效高度, a_s 为外框柱受压区纵筋的保护层厚度; H 为外框柱高度。

4.2.2 砌体抗剪承载力

当加强肋复合墙体受水平和竖向荷载共同作用时,复合墙体砌体随竖向正应力与剪应力的比值大小而产生不同的破坏形态,当发生剪摩破坏时应采用剪摩公式^[16],当发生剪压破坏时应采用主拉应力公式^[17]。工程墙体轴压比通常小于0.25,且加强肋复合墙体中外框柱还承担了较大部分竖向荷载,因此复合墙体中砌体竖向正应力与剪应力的比值都在剪摩范围以内,采用剪摩公式比较符合实际情况,因此加强肋复合墙体中砌体的抗剪强度用剪摩强度公式表示:

$$f_v = f_{v,m} + 0.4\sigma_0 \quad (3)$$

式中, $f_{v,m}$ 为砌体沿通缝抗剪强度平均值; σ_0 为复合墙体砌体所受的竖向压应力,加强肋复合墙体中外框柱与砌体共同承担竖向荷载,研究表明砌体承担复合墙体竖向荷载的34%~41%^[18],建议取 $\sigma_0 = 0.4F/A_m$, F 为复合墙体所受的竖向荷载, A_m 为加强肋复合墙体砌体水平截面面积。因此加强肋复合墙体中砌体部分的抗剪承载力为:

$$V_m = (f_{v,m} + 0.4\sigma_0)A_m \quad (4)$$

4.2.3 墙体高宽比影响系数

复合墙体高宽比变化对墙体砌体部分的抗剪承载力影响较大,而对其它部件的抗剪承载力影响很小^[17],因此只考虑高宽比对复合墙体砌体部分抗剪承载力的影响。为探究加强肋复合墙体高宽比对砌体部分抗剪承载力的影响,在不开洞墙体试验资料及不开洞墙体有限元模型的基础上^[13],本文有针对性地设计了7组不同高宽比有限元模型,各不同高宽比墙体抗剪承载力见表4。

由模拟结果可知,当墙体高宽比小于1时,墙体抗剪承载力不再增加,因此对于高宽比小于1的复

表4 高宽比影响系数

Table 4 Influence coefficient of height to width ratio

试件编号	高宽比	宽×高×厚/mm ³	抗剪承载力/kN	高宽比影响系数
A1	0.9:1	1 400×1 300×100	36.5	1
A2	1:1	1 400×1 400×100	36.5	1
A3	1.1:1	1 400×1 500×100	36.2	0.99
A4	1.3:1	1 200×1 500×100	33.3	0.92
A5	1.5:1	1 000×1 500×100	30.1	0.83
A6	1.9:1	800×1 500×100	27.2	0.75
A7	2.1:1	700×1 500×100	25.1	0.7

合墙体,应取墙体高宽比影响系数 $\alpha_1=1$ 。随着高宽比的增大,墙体抗剪承载力逐渐降低。运用excel软件对高宽比影响系数和高宽比的定量关系进行回归分析,结果如图8所示。

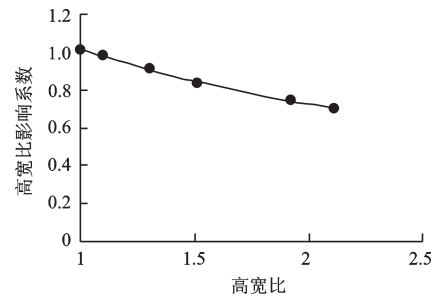


图8 高宽比影响系数拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of height width ratio influence coefficient

由图8的拟合结果可得高宽比影响系数和高宽比的定量关系的回归模型表达式为:

$$\alpha_1 = 0.406 + 0.638/\lambda \quad (5)$$

式中, α_1 为高宽比影响系数; λ 为墙体高宽比。

高宽比影响系数与高宽比的定量关系回归模型的 R^2 为0.99,说明回归模型的拟合程度很高。

4.2.4 砌体承载力放大系数

相比砌体结构,加强肋复合墙体外框柱、外框梁、肋梁组合成框格,框格对砌体的约束提高了砌体的抗剪承载力。为探究框格对砌体承载力的提高作用,在高宽比对墙体抗剪承载力影响模拟试验的基础上,添加5组不同高宽比墙体的空框格模型,计算可得砌体承载力放大系数见表5。

由模拟试验结果可知,加强肋复合墙体中砌体承载力放大系数都在1.3~1.45,对于带洞口加强肋复合墙体而言,墙体不同部位砌体承载力发挥程度并不相同;此外,洞边是否设置肋柱对砌体承载力的发挥程度影响很大。因此,偏于安全考虑,本文

表5 砌体承载力放大系数

Table 5 Magnifying coefficient of bearing capacity of the masonry structures

试件编号	宽×高×厚/mm ³	空框格承载力/kN	砌体填充后的承载力/kN	砌体承载力放大系数
B1	1 400×1 500×100	7.5	36.2	1.3
B2	1 200×1 500×100	7	33.3	1.35
B3	1 000×1 500×100	6.7	30.1	1.38
B4	800×1 500×100	5.9	27.2	1.46
B5	700×1 500×100	5.5	25.1	1.45

砌体承载力放大系数 α_2 取下限值1.3。

4.2.5 肋梁承载力

文献[13]表明:在极限荷载阶段,各不同开洞工况加强肋复合墙体肋梁纵筋的平均应力为屈服应力的30%~68%。其中沿墙体高度方向第一道肋梁纵筋的平均应力达到屈服应力的40%~55%,沿墙体高度方向第二道肋梁纵筋的平均应力达到屈服应力的30%~68%。不同开洞工况下,肋梁纵筋强度的发挥情况波动较大,偏于安全考虑,本文取肋梁纵筋平均屈服应力下限值作为其对抗剪承载力的贡献:

$$V_1 = 0.3f_{1,y}A_{1,s} \quad (6)$$

式中, $f_{1,y}$ 为肋梁纵筋抗拉强度设计值; $A_{1,s}$ 为肋梁纵筋截面面积总和。

肋梁钢筋能否充分发挥作用与砌块强度有关,当砌块强度较大时,砌块和肋梁协同受力性能较好,肋梁主要受拉力,当砌块强度减小时,砌块和肋梁协同受力性能变差,肋梁由受拉为主的受力状态过渡到弯曲为主的受力状态。肋梁受拉的抗剪能力远大于受弯时的抗剪能力。加强肋复合墙体是在密肋复合墙体基础上延伸而来的,参考密肋肋复合墙体中砌体强度对肋梁钢筋发挥系数的影响^[19],

本试验砌体材料为蒸压加气混凝土砌块,强度大于2.5 MPa肋梁、肋柱的抗剪性能能充分发挥,因此本文肋梁承载力发挥系数 α_3 取1。

4.2.6 洞口折减系数

窗洞洞口跨度较大,对复合墙体的受力性能削弱较明显;而门洞洞口跨度较小高度较大,门洞边通常设置加强肋柱,且肋柱还与底梁相连,相比带窗洞墙体,相同洞口率情况下带门洞墙体中门洞对复合墙体受力性的削弱程度相对较弱,因此窗洞和门洞对加强肋复合墙体抗剪承载力的削弱作用要分别考虑。

(1) 窗洞洞口折减系数

对加强肋复合墙体而言,窗洞不仅直接削弱砌体的抗剪承载力,还削弱加强肋复合墙体内各不同部件间的协同工作性能,从而削弱复合墙体的整体抗剪承载力。因此,通常在窗洞两侧设置加强肋柱,肋柱通过增强对砌体的约束从而提高复合墙体的抗剪承载力。为探究窗洞大小变化及窗洞边设置肋柱对墙体抗剪承载力的影响,对尺寸为1 400 mm×1 500 mm×100 mm的带窗洞墙体进行模拟试验,本文只研究常用的窗洞口高度大于等于跨度且洞口形状为方形的带窗洞墙体,不考虑高度小而跨度大等特殊构造的带窗洞墙体。改变窗洞尺寸大小,此外对比窗洞边无肋柱墙体和窗洞边带肋柱墙体的抗剪承载力。用洞边无肋柱和洞边带肋柱的带窗洞墙体抗剪承载力比不开洞墙体的抗剪承载力,可得带窗洞墙体窗洞洞口折减系数见表6。

由数据分析结果可知,当带窗洞墙体洞口率高于17.1%时,窗洞引起的抗剪承载力削弱已经较为明显,因此对于洞口率高于17.1%的带窗洞墙体应在窗洞两侧设置加强肋柱,以弥补窗洞引起的承载力削弱。窗洞边带肋柱墙体的抗剪承载力明显高于窗洞边无肋柱墙体的抗剪承载力,且随着洞口的增大,洞边肋柱对带窗洞墙体抗剪承载力的提高幅度

表6 窗洞洞口折减系数

Table 6 Reduction coefficients of the window holes

试件编号	洞口率/%	洞口尺寸/mm ²	带窗洞(无肋柱)墙体的极限承载力/kN	带窗洞(带肋柱)墙体的极限承载力/kN	窗洞(无肋柱)洞口折减系数	窗洞(带肋柱)洞口折减系数
C1	9.6	450×450	32.1	—	0.89	—
C2	12.9	600×450	31.2	33.1	0.86	0.91
C3	17.1	600×600	28.4	30.6	0.78	0.85
C4	21.4	750×600	23.9	27.5	0.66	0.76
C5	26.8	750×750	15.9	19.1	0.44	0.53

越来越大。带窗洞墙体窗洞洞口折减系数随窗洞洞口率的增大呈二次函数递减关系。运用 excel 软件对带窗洞墙体洞口折减系数与洞口率的定量关系进行回归分析,回归模型的拟合曲线如图 9 所示。

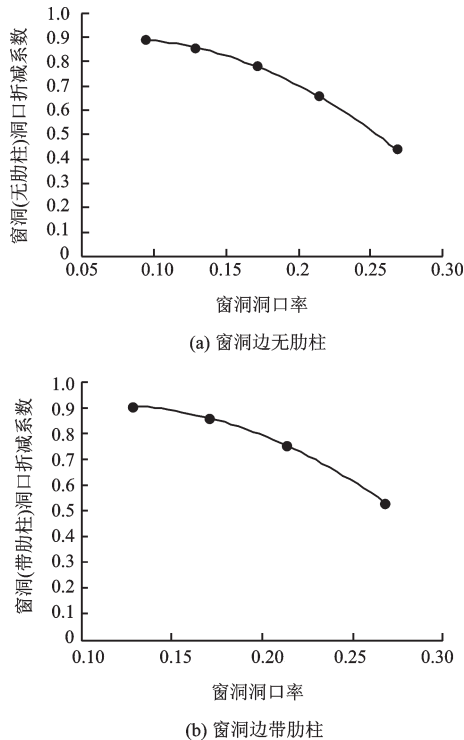


图 9 窗洞洞口折减系数拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of reduction coefficient of the window hole

由图 9 的拟合结果可得窗洞(无肋柱)洞口折减系数与洞口率定量关系的回归模型表达式为:

$$\eta_c = -12.07\beta^2 + 1.78\beta + 0.83 \quad (7)$$

式中, η_c 为窗洞(无肋柱)洞口折减系数; β 为墙体洞口率。

窗洞(无肋柱)洞口折减系数与洞口率的定量关系回归模型的 R^2 为 1, 回归模型完全拟合。

窗洞(带肋柱)洞口折减系数与洞口率的定量关系的回归模型表达式为:

$$\eta_c^1 = -16.13\beta^2 + 3.7\beta + 0.69 \quad (8)$$

式中, η_c^1 为窗洞(带肋柱)洞口折减系数; β 为墙体洞口率。

窗洞(带肋柱)洞口折减系数与洞口率的定量关系回归模型的 R^2 为 0.99, 说明回归模型拟合程度很高。

(2) 门洞洞口折减系数 η_m

门洞口通常较大, 因此常需在门洞边设置加强肋柱以弥补门洞引起的强度削弱, 为探究门洞大小

变化对复合墙体抗剪承载力的影响, 对尺寸为 1 400 mm × 1 500 mm × 100 mm 的带门洞墙体进行模拟试验, 改变门洞尺寸大小, 可得门洞洞口折减系数见表 7。

表 7 门洞洞口折减系数

Table 7 Reduction coefficient of the door hole

试件编号	洞口率/%	洞口尺寸/mm ²	抗剪承载力/kN	门洞洞口折减系数
D1	22.5	450 × 1 050	29.5	0.81
D2	25.0	500 × 1 050	27.1	0.75
D3	27.5	550 × 1 050	24.2	0.67
D4	30.0	600 × 1 050	22.1	0.61

由表 7 可知, 随着门洞尺寸的增大, 带门洞墙体的抗剪承载力逐渐降低, 但其降低幅度基本不变, 门洞洞口折减系数随门洞洞口率的增大呈线性递减关系。门洞洞口折减系数与洞口率的定量关系曲线拟合结果如图 10 所示。

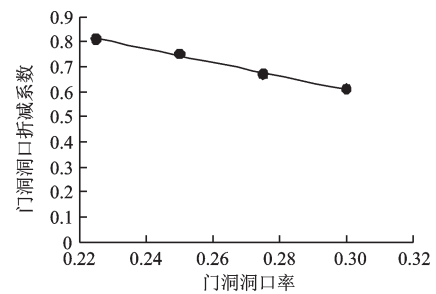


图 10 门洞洞口折减系数拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of reduction coefficient of the door hole

由图 10 的拟合结果可得门洞洞口折减系数与洞口率的定量关系的回归模型表达式为:

$$\eta_m = -2.72\beta + 1.42 \quad (9)$$

式中, η_m 为门洞洞口折减系数; β 为墙体洞口率。

门洞洞口折减系数与洞口率的定量关系回归模型的 R^2 为 0.99, 说明回归模型拟合程度很高。

4.3 带洞口加强肋复合墙体抗剪承载力 V_u

将各组成部分计算公式代入式(1), 可得带洞口加强肋复合墙体抗剪承载力表达式为:

$$V_u = \eta [4M_{i,y}/H + \alpha_1 \alpha_2 (f_{v,m} + 0.4\sigma_0) A_w + \alpha_3 0.3f_{i,y} A_{i,s}] \quad (10)$$

当复合墙体不开洞时, 公式(10)不考虑洞口对墙体抗剪承载力的削弱作用 η 的影响, 即可得无洞

口墙体的抗剪承载力;当墙体开窗洞且窗洞边不设肋柱时,公式(10)中的 η 为 η_c ;当墙体开窗洞且窗洞边设置加强肋柱时,公式(10)中的 η 为 η_c^1 ;当墙体开门洞时,公式(10)中的 η 为 η_m 。

4.4 公式适用条件

4.4.1 轴向正压力的限值

轴向正压力作用下,加强肋复合墙体中混凝土和砌体的受压区面积会增大,一定程度上竖向正压力会提高复合墙体的抗剪承载力;但当正压力过大时,可能使复合墙体两端外框柱混凝土被压碎而发生剪-压破坏,属于不利的破坏模式,墙体的抗剪承载力反而会降低,因此应当控制墙体抗剪承载力公式中轴向正压力的大小。本文参考《混凝土结构设计规范》^[12]及密肋复合墙体的研究结果^[19],当 $N \geq 0.2f_c(A_c + A_m)$ 时,取 $N = 0.2f_c(A_c + A_m)$, f_c 为加强肋复合墙体混凝土强度; A_c 和 A_m 分别为外框柱截面面积总和和复合墙体内砌体墙的水平截面面积。

4.4.2 墙体截面控制条件

加强肋复合墙体是在密肋复合墙体基础上延伸而来的,密肋复合墙体在低周往复荷载作用下的伪静力试验^[19]表明当复合墙体平均剪应力低于 $0.15f_c$ 时,墙体变形能力较好,其极限位移角可达 $1/100$ 以上,相当于设计时的剪压比为 0.2 。因此带洞口加强肋复合墙体受剪截面参照此研究结果,同

时为避免墙体过早产生斜裂缝,对受剪截面做出以下规定:

$$V \leq 0.2f_c A_c + 0.2f_m A_m \quad (11)$$

式中, f_c 、 A_c 分别为外框柱混凝土抗压强度和外框柱水平截面面积总和; f_m 、 A_m 分别为砌体的抗压强度和水平截面面积。

4.4.3 高宽比限制

随着高宽比的减小,加强肋复合墙体的抗剪承载力逐渐增大,加强肋复合墙体模拟试验表明当高宽比 $\lambda = H/B < 1.0$ 时,墙体承载力不再增大,从实际工程应用和安全角度考虑,参考密肋复合墙体^[19]及《混凝土结构设计规范》^[12]对高宽比的规定,当 $\lambda < 1.0$ 时,取 $\lambda = 1.0$;当 $\lambda > 2.2$ 时,取 $\lambda = 2.2$ 。

4.4.4 砌体强度的限制

加强肋复合墙体肋梁发挥的承载力与砌体强度有关,参考密肋复合墙体砌体对肋梁承载力发挥系数的规定^[19],当砌体强度 ≥ 2.5 MPa时,肋梁纵筋的抗剪作用能充分发挥,取肋梁承载力发挥系数 $\alpha_3 = 1$;当砌体强度 ≤ 1.5 MPa时, $\alpha_3 = 0.3$;中间范围按线性插值计算。

4.5 公式验证

利用本文公式计算试件1、试件2及文献[13]不同开洞工况墙体试件3(不开洞)、试件4(不开洞且肋梁纵筋直径为6 mm)、试件5(墙体宽700 mm,高宽比为2.1:1),计算结果见表8。

表8 试验值与计算值比较

Table 8 Comparison between test and calculated results

试件编号	宽×高×厚/mm ³	开洞工况	肋梁纵筋	试验值/kN	计算值/kN	误差/%
试件1	1 400×1 500×100	开窗洞(无肋柱),洞口尺寸600 mm×700 mm	4 ϕ^b 4	26.1	24.0	-7.7
试件2	1 400×1 500×100	开门洞,洞口尺寸450 mm×1 050 mm	4 ϕ^b 4	29.5	27.7	-6.1
试件3	1 400×1 500×100	不开洞	4 ϕ^b 6	42.7	41.1	-3.7
试件4	1 400×1 500×100	不开洞	4 ϕ^b 4	36.2	34.2	-5.5
试件5	700×1 500×100	不开洞	4 ϕ^b 4	25.1	23.9	-4.9

由表8可知,计算值与试验值吻合度较高,最大误差不超过7.7%,满足工程设计需要,且计算值均低于试验值,具有一定的安全储备。

5 结 论

对两榀1/2比例带洞口(开门洞、开窗洞)加强

肋复合墙体进行低周反复荷载作用下的伪静力试验,在试验研究的基础上,针对洞口大小等影响加强肋复合墙体抗剪承载力的主要因素,建立墙体的非线性有限元模型进行分析,可得以下结论:

(1)带门洞墙体和带窗洞墙体均有着良好的抗倒塌能力和变形能力。

(2)模拟试验表明,带门洞墙体抗剪承载力随

门洞的增大呈线性递减关系,带窗洞墙体抗剪承载力随窗洞的增大呈二次函数递减关系;当带窗洞墙体洞口率高于17.1%时,应在窗洞两侧设置加强肋柱,以弥补洞口引起的抗剪承载力削弱,窗洞边肋柱对墙体抗剪承载力的贡献随洞口的增大而增大。

(3)在试验研究及有限元模拟的基础上,建立了带洞口加强肋复合墙体斜截面极限承载力计算公式,并给出了公式的使用条件。计算结果表明,本文提出的带洞口加强肋复合墙体水平极限抗剪承载力计算公式具有较好的精度,满足工程设计需要。

参考文献:

[1] 张孝荣,赵媛媛,王少钦. 拓展型复合墙体抗震性能试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(1): 55-61.
Zhang X R, Zhao Y Y, Wang Sh Q. Experimental study on seismic performances of expanding composite walls [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42 (1): 55-61.(in Chinese)

[2] 钱坤,袁泉,张杰,等. 密肋复合墙结构体系抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(3): 119-123.
Qian K, Yuan Q, Zhang J, et al. Test for a seismic performance of a multi-riid composite wall structure system [J]. Vibration and Impact, 2013, 32 (3): 119-123. (in Chinese)

[3] 马荣全,范新海,黄宙. 装配式密肋复合墙板抗震性能试验研究[J]. 施工技术, 2016(4): 5-9.
Ma R Q, Fan X H, Huang Zh. Research and comparative analysis on the seismic performance of fabricated multi-ribbed composite walls under different axial compression ratio [J]. Construction Technology, 2016(4): 5-9.(in Chinese)

[4] 田英侠,姚谦峰. 带洞口框支密肋复合墙梁抗震性能试验研究[J]. 西安工业大学学报, 2009, 29(3): 294-298.
Tian Y X, Yao Q F. Experimental study on seismic behavior of frame-supported multi-ribbed composite wall beam with opening [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2009, 29 (3): 294-298.(in Chinese)

[5] 苗欣蔚. 新型现砌加强肋生态复合墙体抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
Miao X W. Study on the seismic performance of new now building stiffening rib ecological composite wall [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.(in Chinese)

[6] 田瑞华,颜桂云. 配筋混凝土小砌块抗震墙受剪承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2003, 33(4): 12-13.

Tian R H, Yan G Y. Experimental study on shear capacity of reinforced concrete small block aseismic wall [J]. Building Structure, 2003, 33(4): 12-13. (in Chinese)

[7] 吴函恒,周天华,陈军武,等. 装配式钢框架-预制混凝土抗侧力墙结构受剪承载力分析[J]. 工程力学, 2016, 33(6): 107-113.
Wu H H, Zhou T H, Chen J W, et al. The shear bearing capacity of steel frame-concrete lateral-resistance-wall fabricated structures [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33 (6): 107-113.(in Chinese)

[8] 郭猛,姚谦峰. 框架-稀疏框格复合墙抗剪承载力计算方法研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 237-242, 249.
Guo M, Yao Q F. The calculation method of shear bearing capacity for frame-sparse gridiron composite wall [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42 (5): 237-242, 249. (in Chinese)

[9] 建筑抗震试验方法规程: GJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Specification for seismic test methods of buildings: GJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015.(in Chinese)

[10] 何玉阳,袁泉. 框支密肋复合墙结构振动台试验与数值模拟分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(13): 205-210.
He Y Y, Yuan Q. Frame-supported multi-ribbed composite wall shaking tables test and numerical simulation analysis [J]. Vibration and Impact, 2015, 34 (13): 205-210.(in Chinese)

[11] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
Guo Zh H, Shi X D. Reinforced concrete theory and analyze [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)

[12] 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Specification for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011.(in Chinese)

[13] 吕信敏. 开洞加强肋复合墙体抗震性能及抗侧刚度研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015.
Lyu X M. Study on seismic performance and lateral stiffness of the stiffening rib composite wall with opening holes [D]. Urumchi: Xinjiang Agricultural University, 2015.(in Chinese)

(本文责编: 赵霞)
(下转第 371 页)