

文章编号:1673-2049(2015)03-0013-08

烧结清水装饰砖夹心复合节能墙体力学性能

李书进, 郭 开, 孔 凡, 吴建锋

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:介绍和分析了烧结清水装饰砖夹心复合节能墙体的构造和特点,通过试验研究了其力学性能;进行了夹心复合墙体的抗压强度试验、低周往复水平荷载试验、数值模拟和理论分析,研究了该种墙体的破坏形态、抗震性能及变形能力。结果表明:烧结清水装饰砖夹心复合节能墙体的理论分析结果与墙体试验结果吻合较好;该类夹心墙体具有良好的耗能能力及变形能力;烧结清水装饰砖夹心复合节能墙体有广阔的应用前景,值得推广使用。

关键词:复合墙体;烧结清水装饰砖;拟静力试验;节能;力学性能

中图分类号:TU362

文献标志码:A

Mechanical Behavior of Energy-saving Fired Facing Brick Composite Wall

LI Shu-jin, GUO Kai, KONG Fan, WU Jian-feng

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: The construction and characteristics of energy-saving fired facing brick composite wall were introduced and analyzed, and the mechanical behavior of this wall was studied by experiment. The compressive strength test, low cyclic loading test, numerical simulation and theoretical analysis of sandwich composite wall were conducted to investigate its failure form, seismic performance and deformation capacity. The results show that the theoretical analysis results of energy-saving fired facing brick composite wall agree well with the test results, and the composite wall has good energy dissipation capacity and deformation capacity. The energy-saving fired facing brick composite wall has broad application prospect and is worth using widely.

Key words: composite wall; fired facing brick; quasi-static test; energy-saving; mechanical behavior

0 引言

在建筑的能耗中,外墙作为建筑围护结构的主体,其能耗约占总能耗的 50%^[1],可见外墙所用材料的保温性能将直接影响建筑的耗能量,加强墙体的保温隔热性能是建筑节能的必经之路。多年以来,中国建筑墙体一般采用单一材料,如早期的实心粘土砖,目前的空心砖、空心砌块、加气混凝土砌块等。单一材料导热系数大,一般为高效保温材料的

20 倍以上,即使采用有效保温措施也难以达到节能 65% 的设计标准,因此需要走复合墙体的道路^[2]。

随着建筑市场优质工程需求的加大,高档装饰砖在建筑施工与应用方面的优势已逐渐被市场认识和接受,市场空间也不断加大。承重多孔砖已经朝着高利废、高强度、同时具有清水砖装饰效果的多功能方向发展。中国有些地区已经开始利用当地资源(主要是页岩、淤泥等)生产高档清水砖,部分有远见的建筑企业也开始使用清水砖或其过渡产品——清

收稿日期:2015-01-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51408451)

作者简介:李书进(1967-),男,湖北仙桃人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:sjli@whut.edu.cn。

水贴片建设高档楼盘,取得了较好的经济效益^[3]。将烧结清水装饰砖与普通多孔砖相结合组成的夹心复合节能墙体由于具有强度高、装饰效果好、耐候性强、节能环保等优点,将具有广阔的应用前景。本文将对这一体系进行介绍,并对其力学性能进行试验研究。

1 烧结清水装饰砖夹心复合节能墙体

所谓烧结清水装饰砖夹心复合节能墙体是指将传统砖墙沿墙厚方向一分为二,采用烧结清水装饰砖作为墙体的外叶,普通烧结多孔砖作为墙体内叶,两叶之间夹以保温材料,并用钢筋加以拉结的夹心复合墙体,具体构造如图 1 所示。

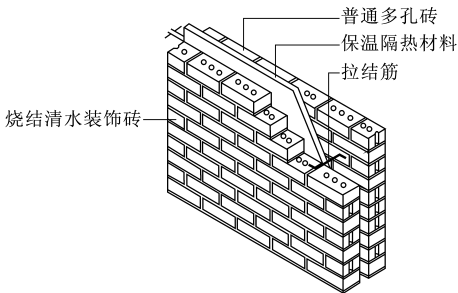


图 1 烧结清水装饰砖夹心复合节能墙体构造
Fig. 1 Construction of Energy-saving Fired Facing Brick Composite Wall

烧结清水装饰砖夹心复合节能墙体采用清水装饰砖作为墙体的外叶,且直接作为外墙装饰,与传统的单一材料墙体或夹心墙体相比,除有保温、隔热、节能等性能外,还具有其他墙体无法比拟的优势。

首先,该体系暴露在外与外界恶劣气候相接触的是耐候性极强的高档烧结砖,耐候性不强的材料则被保护在内部,避免了普通外墙饰面过于脆弱、易开裂、脱落、使用寿命短等缺点,提高了建筑物的耐久性,延长了建筑寿命。

其次,采用清水装饰砖直接作为外墙装饰节省了做外墙保温层、粘贴外墙砖或刷涂料的时间以及相应的人工费和材料费,提高了砌筑效率,降低了建筑成本。

此外,清水装饰砖作外墙装饰,典雅、自然、庄重、美观,适用于建设文化艺术氛围浓厚的精品建筑、田园式建筑、仿欧美建筑和相应的城市景观等,用途十分广泛。

近年来,笔者以武汉湖泊淤泥为主要原料,研制出了一种高强、耐久、具有古朴典雅装饰风格的环保陶瓷清水砖。湖泊淤泥在该清水砖配方的添加量超

过 80%,产品规格一般为 240 mm×115 mm×90 mm 或 240 mm×115 mm×53 mm,孔洞率 25% 以上,也可以做成各种异型产品。目前该产品的实验室样品已试制成功(图 2),拟准备进行批量生产。将这种新材料应用到夹心复合墙体不仅能变废为宝,而且可以引领建筑向艺术化、个性化、返璞归真和自然天成的方向发展,进一步提升建筑品位,具有巨大的社会效益和现实意义。



图 2 用污泥制作的陶瓷清水砖
Fig. 2 Ceramic Bricks Produced by Sludge

2 力学性能试验

2.1 抗压试验

2.1.1 试件设计

抗压试验的试件尺寸为 240 mm×250 mm×690 mm(图 3),按照夹心复合墙体系的施工方法与工艺流程进行砌筑,试件实际尺寸平均值为 235 mm×247 mm×700 mm。烧结清水装饰砖和普通烧结多孔砖的强度等级为 MU20,砂浆强度等级分 M7.5 和 M10 两种,每种各 3 个试件,将这些构件依次编号为 SJ-1 至 SJ-6。

试件砌筑完成后,在室内自然条件下养护,达到

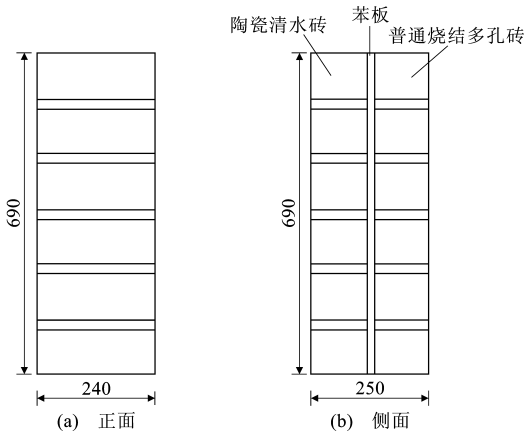


图 3 抗压试件(单位:mm)
Fig. 3 Compressive Specimen (Unit:mm)

强度后按砌体基本力学性能试验方法在压力机上进行轴心抗压试验。砌筑完成后的试件抗压试验情况如图 4 所示。

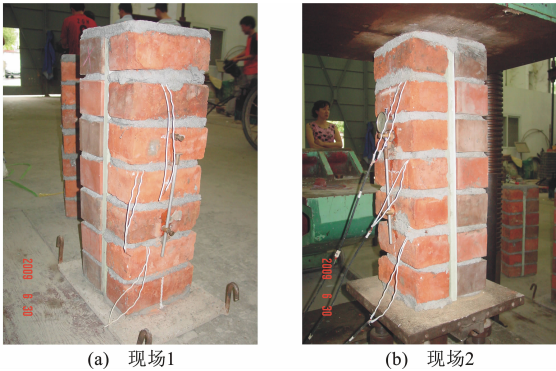


图 4 抗压试验现场
Fig. 4 Compressive Test Site

2.1.2 试验结果分析

开裂荷载与极限荷载在砌体结构设计中具有十分重要的意义,它们是反映结构受力性能的关键指标。试件开裂荷载的取值是通过试验过程肉眼观察而来的,具有随机性和离散性,极限荷载是试件发生极限破坏时的荷载,取压力试验机的测力计指针明显回退时的读数,该读数为试验过程中最大的荷载读数。表 1 为墙体试件的开裂荷载和极限荷载。

表 1 试件的开裂荷载和极限荷载

Tab. 1 Cracking Loads and Ultimate Loads of Specimens			
试件编号	开裂荷载 P/kN	极限荷载 N/kN	PN^{-1}
SJ-1	272	350	0.78
SJ-2	268	340	0.79
SJ-3	313	412	0.76
SJ-4	301	372	0.81
SJ-5	351	430	0.82
SJ-6	375	456	0.82

试验表明,节能夹心复合砌体的开裂荷载与极限荷载比值在 0.76~0.83 之间,较普通实心砖砌体(比值为 0.30~0.46)和多孔砖砌体(比值为 0.37~0.66)^[4-5]开裂晚。与普通多孔砖砌体一样,节能夹心复合砌体也是在墙身首先出现裂缝,并逐渐扩展形成多条纵向裂缝,最后墙体出现剥落而破坏。

对试件的抗压强度进行计算,其公式为 $\sigma = N/A$,其中 σ 为试件的抗压强度, A 为试件受压面积, $A=0.058\text{ m}^2$ 。取试件抗压强度 f_1, f_2, f_3 的平均值 f_m ,试件抗压强度设计值 $f=0.45f_m$,按《砌体结构设计规范》对配筋砌体的规定,试件抗压强度设计修正值按 $f_M=\gamma_a f$ 进行修正,其中 γ_a 为修正系数,当其中砌体截面面积小于 0.2 m^2 时, γ_a 为其截

面面积加 0.8,得 $\gamma_a=0.858$ 。试件抗压强度计算结果见表 2。

表 2 试件的抗压强度

Tab. 2 Compressive Strength of Specimens						
砂浆等级	f_1/MPa	f_2/MPa	f_3/MPa	f_m/MPa	f/MPa	f_M/MPa
M7.5	6.03	5.86	7.10	6.33	2.85	2.44
M10	6.41	7.41	7.86	7.22	3.25	2.79

将表 2 中得到的夹心复合墙体的抗压强度设计值与烧结普通砖和烧结多孔砖砌体的抗压强度设计值进行比较,发现其强度略高于 MU20 砖,说明夹心复合墙体体系的抗压性能良好,安全可靠。

2.1.3 墙体拉结筋的作用

节能夹心复合墙中 Z 形拉结筋的作用主要是保证内、外 2 片墙体的协同工作、协调变形,同时提高夹心墙体的整体稳定性,使之成为一个有机整体。试验中通过粘贴在拉结筋表面的应变片可以观测到,当竖向荷载较小时,拉结筋应变较小,基本上不起作用,墙体平面外变形小。随着荷载的增大,拉结筋应变开始增大,拉结筋开始发挥作用,试件有发生平面外变形的倾向。在加载至开裂荷载之前,钢筋受力基本上随荷载增加而有规律地变化。至接近极限荷载到试件完全丧失承载力阶段,拉结筋应变陡然增加到最大值,墙体进入塑性发展阶段,两叶墙平面外变形增大。

2.2 低周往复水平荷载试验

2.2.1 试件设计

本次试验共设计 2 片墙体,分别为墙 1 和墙 2,试件尺寸如图 5 所示。

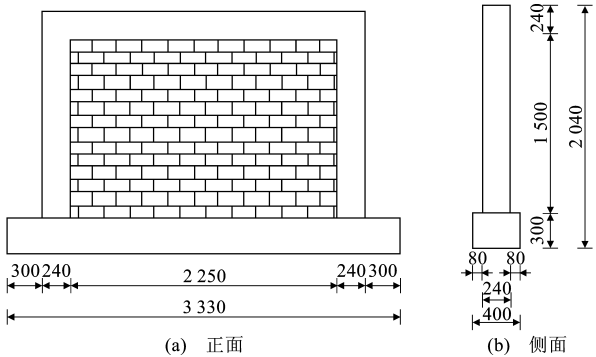


图 5 试件尺寸(单位:mm)
Fig. 5 Sizes of Specimen (Unit:mm)

试件按照夹心复合墙体体系的施工方法与工艺流程进行制作。夹心墙体试件墙 1 和墙 2 均采用烧结清水装饰砖和普通烧结多孔砖,其强度等级为 MU20,砂浆强度等级分为 M7.5 和 M10 两种。构造柱混凝土强度等级为 C20,顶梁及底梁混凝土强

度等级为 C30。构造柱截面尺寸为 240 mm×240 mm,纵向钢筋为 4 Φ 12,箍筋为 Φ 6@200。

2.2.2 加载方案和加载程序

该试验加载装置如图 6 所示,水平荷载采用顶点加载。竖向加载采用 2 个液压千斤顶通过分配梁将竖向荷载传至墙顶。构造柱内上下端钢筋及墙体均布置了若干电阻应变片。

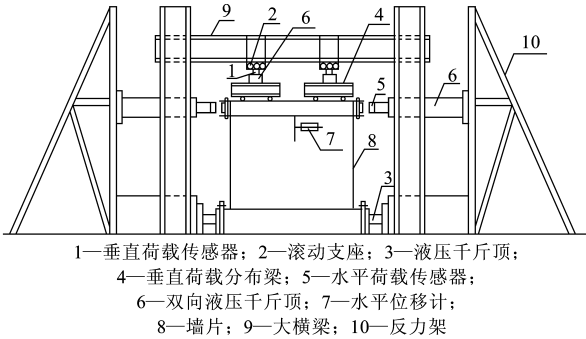


图 6 试验加载装置
Fig. 6 Loading Setup of Test

试验采用荷载与位移混合控制的加载方案。墙片开裂前按荷载控制,每级荷载增量为 50 kN,循环 2 次,直至开裂。墙片开裂后按位移控制,每级增量为 0.5 Δ_c (Δ_c 为位移增量),直至墙体退出工作。试验现场如图 7 所示。



图 7 低周往复水平荷载试验现场
Fig. 7 Low Cyclic Loading Test Site

2.2.3 试件破坏形态

试件在整个变形过程中的荷载-位移曲线经历了 3 个阶段。

(1)弹性阶段

当荷载较小时,墙体荷载-位移曲线近似为直线,此阶段夹心墙体能协同工作,变形协调,内、外叶相对变形较小。

(2)弹塑性阶段

当荷载增大,内、外叶墙体开裂并发展,墙面交叉裂缝形成,其荷载-位移曲线呈曲线上升,形成滞回环。

(3)下降段

当达到极限荷载后,墙体抗侧能力将随着位移增大而减小,其荷载-位移曲线呈曲线下降。

随着荷载继续增大,墙体逐渐形成对角交叉裂缝,甚至有墙片剥落现象,直至试件破坏。试件典型破坏形态如图 8 所示。



图 8 试件破坏形态
Fig. 8 Failure Form of Specimen

2.2.4 滞回特性

试件滞回曲线可以全面描述墙体的恢复力特性。本文试验 2 个墙体的滞回曲线如图 9 所示。

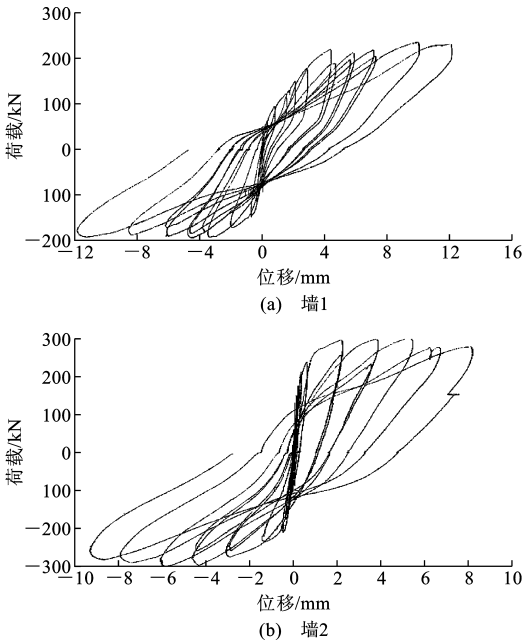


图 9 墙体滞回曲线
Fig. 9 Hysteretic Curves of Walls

由图 9 可以看出,试件开裂前,2 个试件的滞回环面积极小,加载与卸载基本上重合,近似呈一条斜直线,此时墙体位移也小,对应前面提到的弹性阶段。试件开裂后,滞回环面积显著增大,滞回环呈梭形,位移亦增大,表明此类墙体具有较好的耗能能力与变形能力^[6-7]。

2.2.5 试验结果

从试验过程及数据分析可知,在砂浆强度范围内,夹心墙体的抗剪承载力随砂浆强度的提高而增大。这主要是因为本文试验的破坏形式为沿砌体灰缝截面的剪摩破坏,砌体的抗剪破坏主要取决于水平灰缝中砂浆与砌块的粘结强度。随着砂浆强度的提高,砌体的抗剪强度也随之增大,从而夹心墙体的抗剪承载力也随之增大。

3 数值模拟

为进一步了解夹心复合墙体的力学性能,采用有限元方法对夹心复合墙体进行了数值模拟和计算,并与试验结果进行了对比。

有限元分析采用大型软件 ABAQUS 进行。夹心复合墙体的有限元模型主要包括砌块、砂浆、底梁、顶梁、构造柱和拉接件。为了简化计算,将砌块和砂浆构成的砌体视为均质材料^[8-9]。

3.1 基本假定

- (1)墙体底梁在试验模拟过程中无任何转角及位移。
- (2)钢筋混凝土材料及砌体砖块均为均质材料,且各向同性。
- (3)拉接件同砌体之间连接紧密,且破坏前不产生滑移^[10]。
- (4)构造柱、顶梁、底梁同夹心复合墙体之间紧密连接。
- (5)底梁和顶梁始终处于弹性状态,即不产生破坏。
- (6)不考虑夹心复合墙体内部保温材料的受力。

3.2 模型参数选择

夹心复合墙体中各构件材料参数按照现场试验情况确定,实测参数见表 3。构造柱混凝土强度等级为 C20,顶梁及底梁混凝土强度等级为 C30。构造柱截面尺寸为 240 mm×240 mm,纵向钢筋为 4φ12,箍筋为 φ6@200。混凝土、砌块、砂浆、钢筋等均根据基本力学性能试验来确定其材料参数,如实测强度、弹性模量等。

3.3 模型的建立

砌体、构造柱、顶梁、底梁的模拟均按应用实体单元中的完全积分单元(C3D8),梁柱内部钢筋及拉接件的模拟均采用空间桁架单元(T3D2)。砌体及混凝土材料本构模型均采用 ABAQUS 中自带的混凝土损伤塑性模型^[11-12],模型参数依据试验测定结果取值。

表 3 夹心复合墙体材料实测参数
Tab.3 Measured Parameters of Materials for Sandwich Composite Wall

试件参数	墙 1 (砂浆 M7.5)	墙 2 (砂浆 M10)	构造柱	顶梁、底梁	钢筋
弹性模量/ MPa	5 000	5 500	10 000	25 500	210 000
泊松比	0.25	0.25	0.20	0.20	0.30
抗拉强度/ MPa	0.240	0.270	0.936	1.420	210.000
抗压强度/ MPa	6	7	12	16	

3.4 数值模拟云图分析

图 10 为内、外叶墙体应力云图,通过云图可以看出内、外叶墙在水平力的反复推拉作用下产生了斜向集中应力,这与试验现象中墙体发生 X 形交叉斜裂缝的破坏现象相一致。

图 11 为构造柱应力云图,云图显示构造柱底部受拉应力较大,这也与试验现象中构造柱底部裂纹较多相符。图 12 为拉接件应力云图,云图显示拉接件发生弯曲屈服的位置主要分布在墙体中间偏上部位,而其他部位的拉接件变形较小,这与试验中得到的结论较吻合。图 13 为试验夹心复合墙体滞回曲线,通过比较数值试验同夹心墙体试件试验的开裂荷载可知,两者数值很接近。通过对比可以看出复合夹心墙体数值试验中应力集中部位同试验中破坏较严重的部位较吻合,且数值试验所得的开裂荷载同夹心墙体试件试验的开裂荷载较接近,表明该数值计算可以比较精确地模拟夹心复合墙体的受力性能。

4 抗剪承载力计算

本文试验中夹心复合墙体处于低周反复水平荷载和竖向荷载作用下的复合受力状态,主拉应力破坏理论和库仑破坏理论这 2 种基本理论是复合受力状态下墙体破坏的主要理论。根据主拉应力破坏理论,即当作用于砌体上的主拉应力大于其抗主拉应力强度时,砌体就会发生剪切破坏,砌体抗剪强度的一般表达式为

$$f_v=f_{v0}\sqrt{1+\frac{\sigma_0}{f_{v0}}}$$

(1)

式中:σ₀ 为作用于砌体截面的平均压应力;f_v 为砌体抗剪强度;f_{v0} 为砌体水平灰缝抗剪强度。

库仑破坏理论(剪摩理论)认为,砌体水平灰缝的抗剪强度 f_{v0} 与作用于砌体截面的平均压应力 σ₀

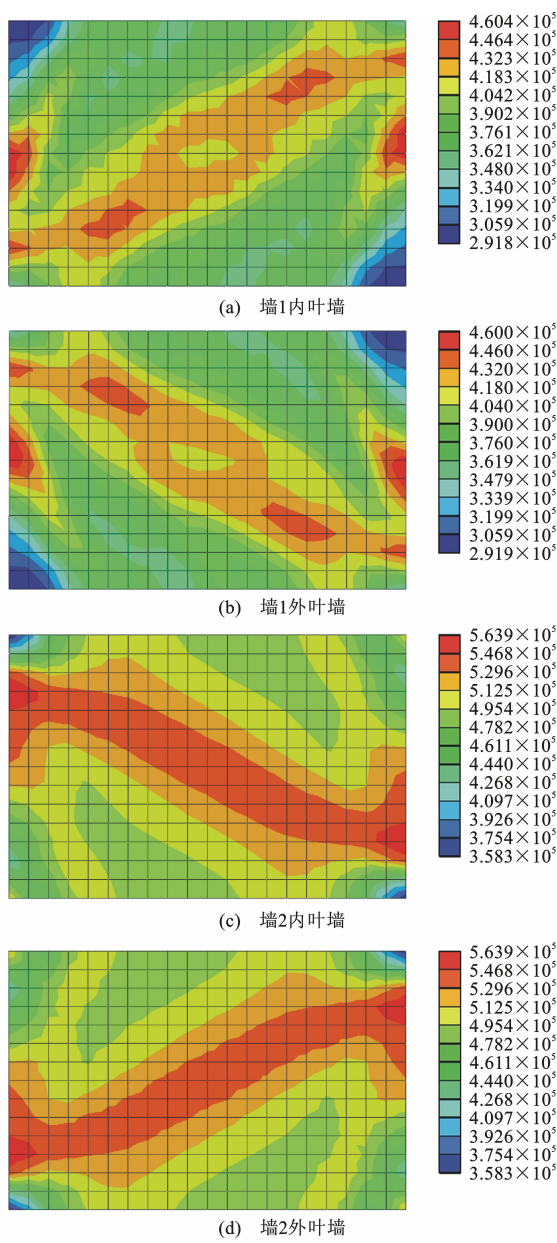


图 10 墙体应力云图 (单位:Pa)

Fig. 10 Stress Nephogram of Wall (Unit:Pa)

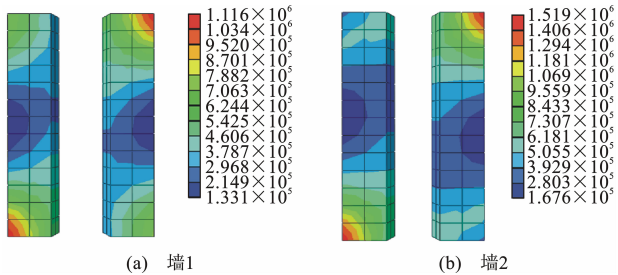


图 11 构造柱应力云图 (单位:Pa)

Fig. 11 Stress Nephogram of Constructional Column (Unit:Pa)

形成的摩阻力之和构成了砌体的剪摩强度即抗剪强度。当砌体所受的剪应力超过其抗剪强度时,砌体

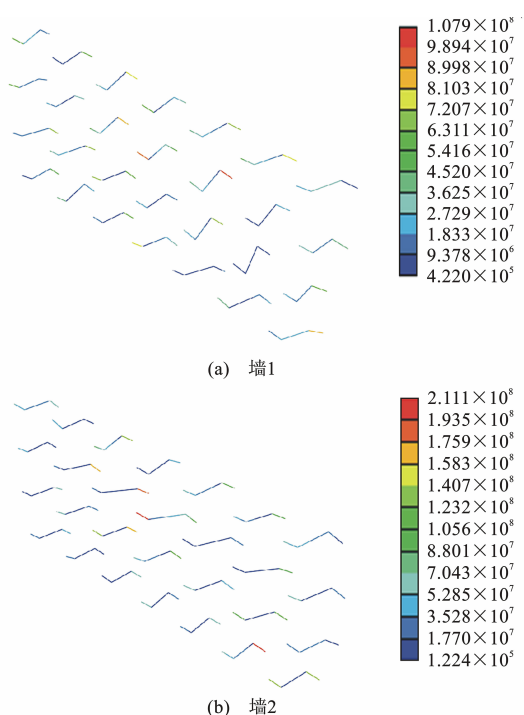


图 12 拉接件应力云图 (单位:Pa)

Fig. 12 Stress Nephogram of Connector (Unit:Pa)

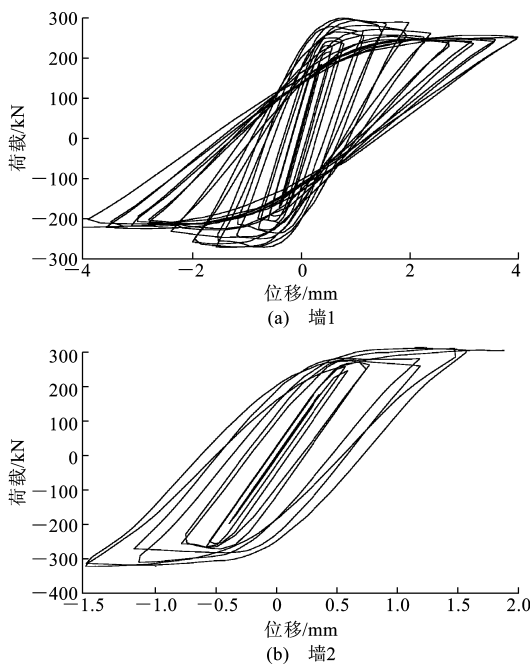


图 13 数值模拟墙体滞回曲线

Fig. 13 Hysteretic Curves of Walls by Numerical Simulation

将沿砂浆的剪切面发生剪切破坏,其强度表达式为

$$f_v = \alpha f_{v0} + \mu \sigma_0 \quad (2)$$

式中: α 为相关系数,变化范围为 0.5~1.0; μ 为摩擦因数。

试验显示,在竖向荷载与水平荷载的共同作用下,夹心复合墙体在初始时刻基本上维持弹性状态,

因此夹心复合墙体的荷载-位移曲线基本上是一条直线。由此可见,在竖向荷载和水平荷载初始加载时,夹心墙体的刚度基本不变。随着水平荷载的逐渐增加,在水平和竖向灰缝中同时出现裂缝,然后裂缝沿着夹心墙体灰缝向墙体两侧斜向发展,形成 X 形裂缝。因此,夹心墙体所受的主拉应力超过其抗主拉应力强度时会导致夹心墙体产生裂缝,表明可以采用主拉应力破坏理论来计算夹心复合墙体的开裂荷载^[13]。

在夹心复合墙体的 X 形主裂缝形成后,夹心墙体没有立刻进入承载力极限状态,其仍具有抵抗一定侧力的能力,显然这一现象无法用主拉应力破坏理论来解释。试验观察到在夹心墙体的灰缝开裂后,夹心墙体并没有在垂直于 X 形主裂缝的方向上被完全拉开,而是沿着水平灰缝相互错动,所以墙体能够继续承受水平反复荷载的作用,直至沿 X 形主裂缝的水平灰缝粘合强度完全丧失,随着摩擦因数不断变小,夹心墙体会产生较大的水平位移,墙体的剪切摩擦机制不断破坏,当夹心墙体两侧的构造柱剪断后,达到墙体的极限荷载^[13]。

试验分析得出,通过主拉应力破坏理论可以描述夹心复合墙体开裂前的状态,以及计算夹心复合墙体的开裂荷载;通过库仑破坏理论可以解释夹心复合墙体开裂后的承载力极限状态,以及计算夹心复合墙体的极限荷载,所以应根据夹心墙体的状态去选择对应的理论进行计算分析。

根据试验结果,参考以往研究^[13],本文通过采用组合截面抗剪计算模式进行夹心复合墙体的抗剪承载力计算,即将内、外叶墙的抗剪承载力 V_1 、 V_2 相加得到夹心复合墙体的抗剪承载力 V ,即

$$V=V_1+V_2$$

(3)

V_1 、 V_2 均采用《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中有构造柱参与的砖砌体抗剪承载力计算模型,即

$$V_1=\eta_c f_{v1}(A_1-A_c)+\xi f_t A_c+0.08 f_y A_s$$

(4)

$$V_2=\eta_c f_{v2}(A_2-A_c)+\xi f_t A_c+0.08 f_y A_s$$

(5)

式中: η_c 为内叶墙墙体约束修正系数,在一般情况下系数取值为 1.0,当存在构造柱且柱间距不大于 3.0 m 时系数取值为 1.1,本文试验中 η_c 取值为 1.1; f_{v1} 、 f_{v2} 分别为内、外叶墙抗剪强度; A_1 、 A_2 分别为内、外叶墙横截面面积(包括端部构造柱),本文试验中取值为 0.3 m²; ξ 为中部构造柱参与工作系数,居中设 1 根时取 0.5,多于 1 根时取 0.4; A_s 、 A_c 分别为钢筋和混凝土截面面积。

由于本文试验的 2 片夹心复合墙体的内、外叶墙两端均有构造柱约束,同时考虑到在墙体开裂时墙体两端构造柱基本处在弹性小变形阶段,该阶段构造柱的作用主要是加强对中间墙体的约束从而提高夹心墙体的抗剪承载力,所以根据规范公式简化得到本文所研究的夹心复合墙体的抗剪承载力计算公式为

$$V=\eta_c(f_{v1}A_1+f_{v2}A_2)$$

(6)

采用弹性方法计算时,复合受力状态下计算夹心复合墙体的开裂荷载采用的是主拉应力理论。根据中国试验与研究,取剪力不均匀系数为 1.2,采用主拉应力理论,则内、外叶墙的抗剪强度分别按下式进行计算

$$f_{v1}=\frac{1}{1.2}f_{v0}\sqrt{1+\frac{\sigma_{01}}{f_{v0}}}$$

(7)

$$f_{v2}=\frac{1}{1.2}f_{v0}\sqrt{1+\frac{\sigma_{02}}{f_{v0}}}$$

(8)

式中: σ_{01} 、 σ_{02} 分别为作用于内、外叶墙墙体截面的平均压应力,取值为 0.5 MPa。

通过上述公式得到的夹心复合墙体抗剪承载力计算结果见表 4。

表 4 夹心复合墙体抗剪承载力计算结果

Tab. 4 Calculation Results of Shear Bearing Capacity for Sandwich Composite Wall

试件	f_{v0} /MPa	σ_{01} /MPa	f_{v1} /MPa	σ_{02} /MPa	f_{v2} /MPa	V/kN
墙 1	0.12	0.5	0.227	0.5	0.227	150
墙 2	0.18	0.5	0.292	0.5	0.292	192

夹心复合墙体试件实测开裂荷载和夹心墙体抗剪承载力理论计算值对比见表 5。

表 5 夹心复合墙体的强度试验值与计算值对比

Tab. 5 Comparison of Test Values and Calculated Values of Strength for Sandwich Composite Wall

试件	开裂荷载 P /kN	公式计算值 P_1 /kN	PP_1^{-1}
墙 1	120	150	0.80
墙 2	177	192	0.92

夹心复合墙体的抗剪承载力公式计算值和夹心墙体试件开裂荷载的试验值很接近,其开裂荷载试验值与计算值比值的平均值为 0.86。由此可见,夹心复合墙体抗剪承载力公式计算值与夹心墙体试件试验值比较吻合。

5 结 语

夹心复合墙由于其具有良好的保温、隔热、节能等优点,必将能得到更广泛的应用,对其加以研究和

推广亦具有重要的经济和社会意义。将烧结清水装饰砖应用到夹心复合墙体更能体现该体系的优势,可以使建筑更加耐久和美观,更体现出自然魅力。本文通过对该墙体的试验和理论研究表明,理论分析同墙体试验情况吻合较好,该类夹心墙体具有较好的耗能能力及变形能力,因此,中国应尽快出台相关标准和法规,促进这类墙体的应用和发展,建立起科学、可持续发展的建筑体系。

参考文献:

References:

- [1] 李彩云. 浅谈建筑节能开发应用[J]. 科学之友, 2010(3):13-14.
LI Cai-yun. Application of Construction Energy Conservation Development[J]. Friend of Science Amateurs, 2010(3):13-14.
- [2] 汪福生. 我国应大力推广夹心复合墙体体系[J]. 砖瓦世界, 2008(9):6-9.
WANG Fu-sheng. Our Country Should Vigorously Promote Sandwich Composite Wall System[J]. Brick & Tile World, 2008(9):6-9.
- [3] 李国忠. 浅议烧结清水墙装饰砖[J]. 砖瓦世界, 2007(3):10-12.
LI Guo-zhong. Brief Discussion on Sintering Drywall Decorative Bricks[J]. Brick & Tile World, 2007(3):10-12.
- [4] 易文宗, 史庆轩. 多孔砖砌体的力学性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 1998, 30(3):221-223.
YI Wen-zong, SHI Qing-xuan. Experimental Study on Mechanical Behaviour of Porous Masonry[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 1998, 30(3):221-223.
- [5] 张景玮, 李宏男, 张曰果. 低周反复荷载作用下空心砖夹心墙体试验[J]. 沈阳建筑工程学院学报: 自然科学版, 2002, 18(1):5-8.
ZHANG Jing-wei, LI Hong-nan, ZHANG Yue-guo. Experimental Studies on Hollow Brick Cavity Walls Under Low Cyclic Load[J]. Journal of Shenyang University of Architecture and Civil Engineering: Natural Science, 2002, 18(1):5-8.
- [6] 李宏男, 张景玮, 刘 莉. 多孔砖保温夹心墙体抗震性能试验与分析[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(6):73-80.
LI Hong-nan, ZHANG Jing-wei, LIU Li. Experiment and Analysis of Seismic Behavior of Hollow Brick Insulating Cavity Walls[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(6):73-80.
- [7] 史庆轩, 易文宗. 多孔砖砌体墙片的抗震性能试验研究及抗倒塌能力分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2000, 32(3):271-275.
SHI Qing-xuan, YI Wen-zong. Tentative Studies on the Aseismic Behavior and Investigation of Collapse Resistant Capacity of Porous Masonry Walls[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2000, 32(3):271-275.
- [8] MORBIDUCCI R. Nonlinear Parameter Identification of Models for Masonry[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(15):4071-4090.
- [9] SAMARASINGHE W, PAGE A W, HENDRY A W. Behaviour of Brick Masonry Shear Walls[J]. The Structural Engineer, 1981, 59(15):42-48.
- [10] HAMID A A, CHUKWUNENYE A O. Compression Behavior of Concrete Masonry Prisms[J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112(3):605-613.
- [11] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8):892-900.
- [12] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A Plastic-damage Model for Concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3):299-326.
- [13] 张延年, 李 恒, 刘 明, 等. 现场发泡夹心墙抗震抗剪承载力性能研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(6):18-25.
ZHANG Yan-nian, LI Heng, LIU Ming, et al. Study of Anti-seismic Shear Resistance Capacity of Foam-in-place Cavity Walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(6):18-25.