

文章编号: 1000-4750(2017)Suppl-0111-05

BFRP 拉结件预制混凝土夹心保温外墙板 抗弯性能试验研究

刘才华¹, 蒋庆¹, 种迅¹, 完海鹰¹,
朱惠锋², 李浩然², 王礼平², 郝祝林²

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 长沙远大住宅工业安徽有限公司, 合肥 230000)

摘要: BFRP 拉结件预制混凝土夹心保温外墙板是一种新型的非承重保温外墙板, 其与主体结构之间采用上部线支撑、下部点支撑的连接方式, BFRP 拉结件按照斜向八字形设置。为了评估该类外墙板在风荷载、水平地震作用等平面外荷载作用下的受力和变形性能, 以合肥某工程项目为背景, 通过五片足尺外墙板拟静力试验, 以研究外墙板的平面外抗弯性能。试验研究表明: 外墙板底部点支撑的个数和间距对其平面外抗弯性能影响显著, 并提出了点支撑建议间距; 当点支撑设置合理时, 该外墙板具有较好的承载力、延性和抗裂性能; 当带有门窗洞口时, 其墙板洞口角部易出现斜向裂缝, 出现裂缝的荷载级别远小于不开洞外墙板。

关键词: BFRP; 拉结件; 预制夹心保温外墙板; 抗弯性能; 裂缝

中图分类号: TU377.9 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.S015

EXPERIMENTAL STUDY ON FLEXURAL BEHAVIOR OF PRECAST CONCRETE SANDWICH FACADE PANELS WITH BFRP CONNECTORS

LIU Cai-hua¹, JIANG Qing¹, CHONG Xun¹, WAN Hai-ying¹,
ZHU Hui-feng², LI Hao-ran², WANG Li-ping², HAO Zhu-lin²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Changsha Broad Co., Ltd in Anhui, Heifei 230000, China)

Abstract: Precast concrete sandwich facade panels with BFRP connectors are a kind of non-load bearing facade panels, which are attached to main structures with linear braces on top and point braces at the bottom. BFRP connectors are arranged obliquely. In order to assess the structural behavior of the facade panel subjected to wind and seismic loads, a pseudo-static test of five full-scale facade panels was carried out to investigate their out of plane flexural behavior. The test is based on an engineering project in Hefei. The test results show that the number of linear braces and their interval have a significant impact on the flexural behavior. A recommended interval is proposed. If the facade panel have a rational arrangement of point braces, it will have better load-bearing capacity, ductility and crack resistance. Facade panels with structural openings for doors and windows exhibits cracks in the corners of the structural openings. The cracking load of this kind of panels is much smaller than that of panels

收稿日期: 2016-03-30; 修改日期: 2017-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278519, 51408179)

通讯作者: 蒋庆(1984—), 男, 蚌埠人, 副教授, 博士, 硕导, 从事超高层抗震、装配式结构研究(E-mail: ahhfjq@163.com).

作者简介: 刘才华(1990—), 男, 湖北人, 硕士生, 从事结构工程研究(E-mail: mslch@126.com);

种迅(1978—), 女, 河北辛集人, 副教授, 工学博士, 从事结构工程研究(E-mail: chongxun@hfut.edu.cn);

完海鹰(1960—), 男, 安徽合肥人, 教授, 博士, 从事钢结构和大跨空间结构研究(E-mail: wanhy8858@163.com);

朱惠锋(1980—), 女, 安徽砀山人, 工程师, 主任工艺设计师, 从事装配式建筑设计(E-mail: 56467350@qq.com);

李浩然(1977—), 男, 合肥人, 工程师, 厂长, 从事装配式建筑的生产与管理(E-mail: 1316943835@qq.com);

王礼平(1985—), 男, 安徽舒城人, 助理工程师, 副总经理, 从事装配式建筑施工(E-mail: 412052505@qq.com);

郝祝林(1972—), 男, 安徽怀宁人, 工程师, 主任, 从事建筑产业化的预制构件生产(E-mail: haozhuli_72@sina.com).

without structural openings.

Key words: Basalt Fiber Reinforced Polymer; connector; precast concrete sandwich facade panel; flexural behavior; crack

建筑产业现代化是实现我国住宅体系趋于高效、节能、环保的必然选择,而装配式结构体系是实现住宅产业化的一种新型结构体系^[1-3]。其中作为装配式外围结构构件的预制混凝土夹心保温外墙板(以下简称“夹心板”)与传统的保温墙板相比,具有耐火性能好、制作工业化、施工装配化等优势^[4-5],因此夹心板的研究已成为目前建筑领域中热点问题。拉结件是夹心板中的关键构建,起到连接内、外叶混凝土墙板的作用,其在夹心板中除承受板自重外,还承受风荷载和水平地震作用等平面外荷载^[6]。纤维增强树脂(Fiber Reinforced Polymer,简称FRP)拉结件具有传热系数低、抗拉强度高、密度小等优点,因此被广泛应用于夹心板中^[7]。Einea等^[8-9]研究了三种夹心板的工作性能,试验研究表明,与桁架钢筋拉结件组合和非组合板相比,FRP拉结件非组合板不仅表现出较好的延性,同时还有有效的避免了热弯曲效应。薛伟辰等^[10-11]研究了板状玻璃纤维增强拉结件粘结性能、抗剪性能、耐久性能等工作性能,试验研究表明,板状拉结件抗剪性能以及其与混凝土的粘结性能均符合我国规范要求,其耐久性也较高。

玄武岩纤维增强复合(Basalt Fiber Reinforced Polymer,简称BFRP)拉结件是一种新型拉结件,除具有FRP拉结件所拥有的性能优势外,还具有经济环保的优点。在夹心板中,BFRP拉结件正逐渐的被应用和推广,但相关于BFRP拉结件夹心板的研究较少,其性能有待于进行更加深入的试验研究。本文以合肥某工程项目为背景,针对BFRP拉结件夹心板平面外抗弯性能开展试验研究。该夹心板与主体采用“上端线支撑,下端点支撑”连接形式。通过对上述夹心板的足尺拟静力试验研究,来评估夹心板在风荷载、水平地震作用等平面外荷载作用下的受力和变形性能。

1 试验概况

1.1 试件设计

试件采用高强钢滚轴来模拟夹心板上部与现浇钢筋混凝土梁、板间形成的线支撑,用高强钢滚珠来模拟夹心板下部限位角钢形成的点支撑。根据夹心板尺寸和点支撑个数设计了SWP1~SWP5五个试件,SWP3试件配筋详图如图1所示(其余试件配筋相似,板厚相同,均为0.16 m),试件参数见表1。

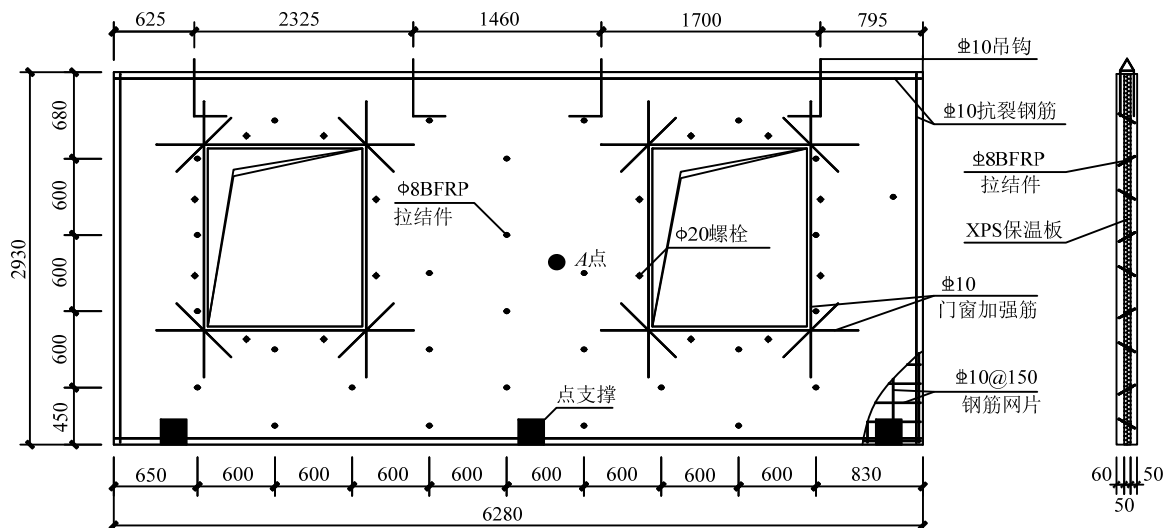


图1 SWP3 配筋图

Fig.1 Reinforcement of SWP3

1.2 材料力学性能

试件混凝土标准立方体抗压强度均值为 $f_{cu}=53.16$ MPa。直径为 6 mm 的钢筋屈服强度均值 $f_{y1}=$

452.50 MPa, 极限强度均值为 $f_{u1}=600.00$ MPa。直径为 10 mm 的加强筋屈服强度为 $f_{y2}=455.00$ MPa, 极限强度均值为 $f_{u2}=617.50$ MPa。BFRP 拉结件材料

力学性能见表 2。

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	SWP1	SWP2	SWP3	SWP4	SWP5
窗洞口个数	无	无	2	2	2
试件尺寸/(m×m)	4.98×2.93	4.98×2.93	6.28×2.93	8.02×2.88	8.02×2.88
点支撑间距/m	4.350	2.175	2.775	2.400, 2.550	3.675
点支撑个数	2	3	3	4	3

表 2 BFRP 拉结件材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of BFRP connectors

检测项目	拉伸强度/MPa	弯曲强度/MPa	层间剪切强度/MPa
试验标准	GB/T13096-2008	GB/T14028.2-2009	GB/T 14028.4-2009
试验值	1055	1172	46

1.3 试验方案与测量内容

试验采用砝码(10 kg/块)和沙袋(43.5 kg/袋)作为配重,通过静力加载模拟夹心板在风荷载、水平地震作用等平面外荷载作用下的受力情况。加载过程采用荷载控制加载,其中取夹心板自重 2.64 kN/m^2 作为第一级荷载(该荷载值与高度 100 m 处建筑外墙平面外荷载设计值相当),其后每级荷载增加 1 kN/m^2 ,每级荷载作用持续的时间为 30 min ^[12]。板底跨中和跨边设置五个位移计量测板底挠度;在钢筋网片和洞口加强筋上设置应变片,监测钢筋受力过程;利用裂缝宽度观测仪器量测裂缝宽度,并观测裂缝开展情况。

2 试验结果与分析

2.1 板底跨中荷载-挠度曲线

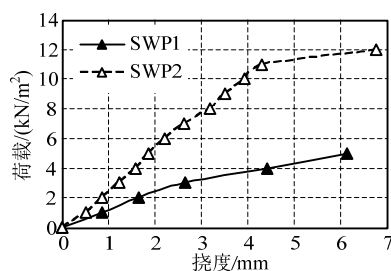
试验过程中,发现试件板底跨中 A 点处挠度最大(如图 1 所示),绘制此点荷载-挠度曲线,如图 2 所示。对比分析试验结果可知,夹心板在破坏之前的受力过程可分为 3 个阶段(如图 2(b)标记所示):

0-a 段:试验加载初期,试件荷载-挠度曲线呈线性增长,夹心板底未开裂,试件抗弯刚度不变,试件受力处于弹性阶段。对比 SWP1 和 SWP2 的荷载-挠度曲线可知,增加点支撑后的 SWP2 的曲线斜率是 SWP1 的两倍,即 SWP2 表现出更高的抗弯刚度和更好的延性;对比 SWP4 和 SWP5 的荷载-挠度曲线可知,增加点支撑后的 SWP4 的曲线斜率与 SWP5 相近,即点支撑的增加对此组对比试件的抗弯刚度无明显影响。

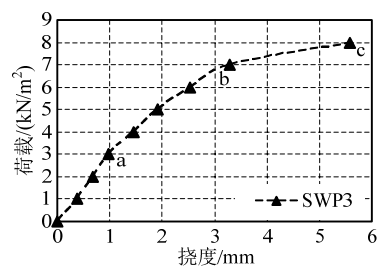
a-b 段:随着荷载的增加,试件板底受拉区混凝土开裂,受拉区混凝土退出工作,试件抗弯刚度降低,试件荷载-挠度曲线出现第一个拐点 a,曲线

斜率开始下降。SWP1 和 SWP2 荷载-挠度曲线分别在 3 kN/m^2 和 7 kN/m^2 出现拐点,可知增加点支撑后的 SWP2 表现出更好的抗裂性能;SWP4 和 SWP5 荷载-挠度曲线均在 3 kN/m^2 出现拐点,可知增加点支撑对此组对比试件抗裂性能无明显影响。

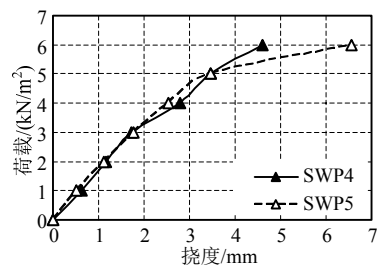
b-c 段:继续增加荷载,部分钢筋受力达到屈服,试件抗弯刚度下降显著,其荷载-挠度曲线出现第二个拐点 b,试件受力进入弹塑性阶段。本次试验试件尺寸较大,为了保证试验人员安全,当受拉钢筋网受拉应变达到 $2000 \mu\epsilon$ 、最大裂缝宽度达到 0.4 mm 、夹心板 A 点挠度达到 6 mm 时,试验结束。



(a)



(b)



(c)

图 2 试件荷载-挠度曲线

Fig.2 Load-deflection curves of specimens

2.2 裂缝开展

1) 试件厚度方向裂缝分布

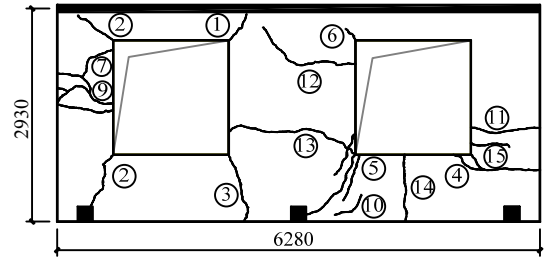
在试验过程中观测试件厚度方向裂缝的开展情况可以发现,初始裂缝均首先出现在下叶板板底跨中部位,并逐渐垂直向上开展延伸到上叶板,同时上叶板还存在一定高度的受压区,属于典型的正截面受弯裂缝。且整个试验过程中未观测到明显的沿上下叶板与保温板间叠合面的水平移动错动现

象, 这是因为 BFRP 拉结件、上下叶板与保温板间的摩擦力以及保温板缝隙间的混凝土对抵抗叠合面间的剪力起到了较大的有利作用, 因此可以推断试件存在较强的组合作用。

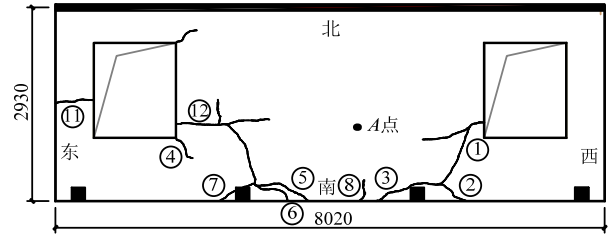
2) 试件板底裂缝分布

第一级荷载作用下即设计荷载作用下, 试件均未出现任何肉眼可见裂缝。

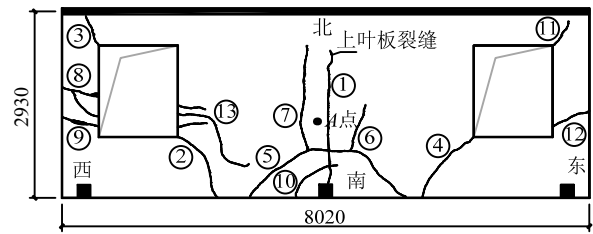
图 3 和表 3 分别为试件裂缝分布图和试件初始裂缝参数表, 其中 F_{cr} 为开裂荷载, ω_{cr} 初始裂缝宽度。对比 SWP1 和 SWP2 裂缝分布, 可以发现 SWP1 板底跨中出现了一条沿短跨方向的贯通裂缝, 这是因为 SWP1 点支撑间距较大, 板两个方向的计算跨度之比 1.70, 短跨方向出现较强的单向作用, 导致跨中短跨弯矩 M_x 大于短跨弯矩 M_y ; 而 SWP2 板底跨中出现了一条长短跨方向的贯通裂缝, 这是因为跨中增设的一个点支撑使得弯矩均匀分配, 减小了长跨弯矩 M_x 。对比 SWP4 和 SWP5 裂缝分布, SWP5 初始裂缝为负弯矩裂缝, 出现在上叶板外表面跨中部位, 且初始裂缝宽度较大; 而 SWP4 未出现负弯矩裂缝, 且初始裂缝宽度较小, 这是因为增加点支撑后, 点支撑跨度减小, 使得弯矩均匀分配, 点支撑处负弯矩减小。综述上所述增加点支撑后的 SWP2 和 SWP4 相对于 SWP1 和 SWP5 表现出更好的抗裂性能。



(c) SWP3



(d) SWP4



(e) SWP5

图 3 试件裂缝分布图

Fig.3 Crack patterns of specimens

表 3 初始裂缝参数

Table 3 Parameters of initial cracks

试件编号	SWP1	SWP2	SWP3	SWP4	SWP5
$F_{cr}/(\text{kN}/\text{m}^2)$	4	7	1	2	1
ω_{cr}/mm	0.11	0.08	0.36	0.03	0.12

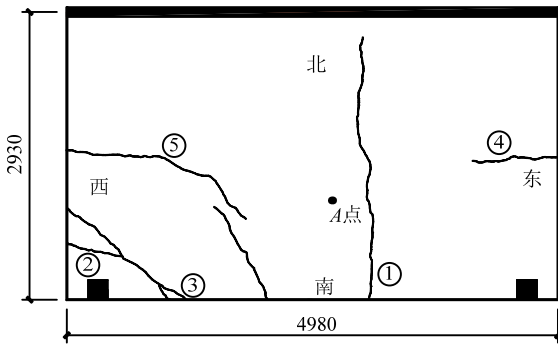
3 结论

(1) 本文研究的 BFRP 拉结件夹心板在设计荷载作用下均无肉眼可观裂缝出现, 符合我国设计规范要求。

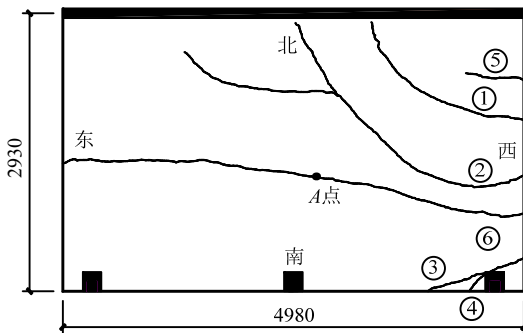
(2) 本次试验中的 6 个试件在试验过程中均未观测到明显的沿上下叶板与保温板间叠合面的水平移动现象, 且裂缝的开展情况也表明夹心板存在较强的组合作用。

(3) 带有门窗洞口的夹心板由于洞口角部应力集中, 易出现斜向裂缝。这种夹心板出现裂缝的荷载级别远小于不开洞的夹心板。

(4) 夹心板底部点支撑的个数和间距对夹心板的平面外受弯性能具有显著的影响。点支撑个数越多, 间距越小, 则夹心板开裂越晚, 且裂缝宽度和挠度均越小; 建议 BFRP 夹心板底部点支撑间距以



(a) SWP1



(b) SWP2

不超过 4 m 为宜。当夹心板无门窗洞口时, 点支承间距要求可适当放宽。

参考文献:

- [1] 张季超, 楚先锋, 邱剑辉, 等. 高效、节能、环保预制钢筋混凝土结构住宅体系及其产业化[J]. 工程力学, 2008, 25(增刊 II): 123—133, 138.
Zhang Jichao, Chu Xianfeng, Qiu Jianhui, et al. Efficient and energy-saving as well as environmental protection pre-cast reinforced concrete structure residential system and housing industrialization [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(Suppl II): 123—133, 138. (in Chinese)
- [2] 陈教宜, 张肇毅, 王卉, 等. 建筑工业化及绿色模块建筑[J]. 工业建筑, 2014, 44(6): 108—111.
Chen Aoyi, Zhang Zhaoyi, Wang Hui, et al. Construction industrialization and green module building [J]. Industrial Construction, 2014, 44(6): 108—111. (in Chinese)
- [3] 黄炜, 张敏, 江永涛, 等. 装配式混凝土墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 88—95.
Huang Wei, Zhang Min, Jiang Yongtao, et al. Experimental study on seismic behavior of precast concrete walls [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 88—95. (in Chinese)
- [4] 李志杰, 薛伟辰. 预制混凝土无机保温夹心外墙体抗火性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 59—67.
Li Zhijie, Xue Weichen. Experimental study on fire resistance of precast concrete inorganic insulation sandwich walls [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 59—67. (in Chinese)
- [5] 张泽平, 李珠, 董彦莉. 建筑保温节能墙体的发展现状与展望[J]. 工程力学, 2007, 24(增刊 II): 121—128.
Zhang Zeping, Li Zhu, Dong Yanli. Development and prospects of heat preserving and energy conservation wall system in buildings [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(Suppl II): 121—128. (in Chinese)
- [6] Seeber K, Andrews Jr R A Y, Jacques F J, et al. State-of-the-art of precast/prestressed sandwich wall panels [J]. PCI Journal, 1997, 42(2): 94—132.
- [7] 孟宪宏, 周阿龙, 刘海成, 等. 夹心保温外墙板连接件力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2014, 30(2): 227—234.
Meng Xianhong, Zhou Along, Liu Haicheng, et al. Experiments of mechanical properties on the connectors of sandwich insulation wallboard [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2014, 30(2): 227—234. (in Chinese)
- [8] Einea A, Salmon D C, Tadros M K, et al. A new structurally and thermally efficient precast sandwich panel system [J]. PCI Journal, 1994, 39(4): 90—101.
- [9] Einea A, Salmon D C, Tadros M K, et al. Partially composite sandwich panel deflection [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1995, 121(4): 778—783.
- [10] 薛伟辰, 付凯, 李向民. 预制夹芯保温墙体 FRP 连接件抗剪性能加速老化试验研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(7): 106—108.
Xue Weichen, Fu Kai, Li Xiangmin. Accelerated aging tests for evaluation of shear behavior of FRP connectors in precast sandwich insulation wall panels [J]. Building Structure, 2012, 42(7): 106—108. (in Chinese)
- [11] 杨佳林, 薛伟辰, 栗新. 预制夹芯保温墙体 FRP 连接件的力学性能试验[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2013, 34(6): 723—729.
Yang Jialin, Xue Weichen, Li Xin. Mechanical properties test of FRP connectors in precast sandwich insulation wall panels [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2013, 34(6): 723—729. (in Chinese)
- [12] GB/T 50152-2012, 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 14—20.
GB/T 50152-2012, Standard for test method of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012: 14—20. (in Chinese)