

# GFRP 杆连接预制夹心保温墙板受弯性能试验

张健新<sup>1,2</sup>, 张鑫<sup>1</sup>, 陈庞<sup>1,2</sup>, 张婷玮<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

**摘要** 为提高预制夹心保温墙板的受弯性能和保温性能, 增强内外层混凝土墙板的复合作用, 提出一种采用 GFRP 螺杆连接内外层混凝土的预制夹心保温墙板。**方法** 设置 GFRP 板替代部分纵向或横向钢筋以便于 GFRP 螺杆在内外层混凝土中的锚固, 对 4 个试件进行单调加载试验, 分析墙板的破坏模式、荷载-位移曲线、保温材料与混凝土之间的滑移、裂缝宽度和复合作用等。**结果** 采用 GFRP 板或钢板局部替代纵向钢筋的试件具有较好的承载能力、变形能力、延性性能和复合作用; 所有预制夹心保温墙板均发生弯曲破坏, GFRP 螺杆或普通钢螺杆均可以有效在内外层混凝土之间传力, 限制混凝土与保温材料之间的滑移; 采用 GFRP 螺杆连接的预制夹心保温墙板 QB1 的复合程度系数比普通钢螺杆连接墙板 QB3 的复合程度系数提高了 25%。**结论** 笔者提出的新型 GFRP 螺杆连接内外层混凝土的预制夹心保温墙板具有良好的承载能力和变形能力, 且整体性优异, 螺杆能够有效在上下层混凝土墙板间传力, 复合程度系数高于 50%。

**关键词** 预制夹心保温墙板; GFRP 螺杆; 受弯性能; 复合作用

中图分类号 TU375.4

文献标志码 A

**引用格式:** 张健新, 张鑫, 陈庞, 等. GFRP 杆连接预制夹心保温墙板受弯性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(2): 203-211. (ZHANG Jianxin, ZHANG Xin, CHEN Pang, et al. Experimental investigation on flexural performance of precast sandwich insulation panels with GFRP screw connectors[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(2): 203-211.)

## Experimental Investigation on Flexural Performance of Precast Sandwich Insulation Panels with GFRP Screw Connectors

ZHANG Jianxin<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, CHEN Pang<sup>1,2</sup>, ZHANG Tingwei<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300401; 2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin, China, 300401)

**Abstract:** In order to improve the flexural and thermal insulation performance of the precast sandwich insulation panel and strengthen the composite action of the inner and outer panels, this

收稿日期: 2023-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208160); 河北省高等学校科学技术研究项目(CXY2023016)

作者简介: 张健新(1986—), 女, 副教授, 博士, 主要从事结构抗震等方面研究。

paper proposes a type of precast sandwich insulation panels using GFRP screw connectors to connect the inner and outer layer panels. Meanwhile, GFRP plate was set to replace part of longitudinal or transverse reinforcements, which facilitates the anchorage of GFRP screw connectors in the inner and outer layer concrete panels. The monotone loading tests of four specimens were carried out to analyze the failure mode, load-displacement curve, slip between thermal insulation material and concrete, crack width and composite action of the panels. The results show that the specimens that the partially longitudinal reinforcements were replaced by the GFRP plates or steel plates had good load bearing capacity, deformation capacity, ductility and composite action. All precast sandwich insulation panels occurred bending failure. GFRP screw connectors or ordinary steel connectors can effectively transfer force between the inner and outer concrete panels, limiting the slip between the concrete and thermal insulation material. The composite degree coefficient of precast sandwich insulation panel QB1 with GFRP screw connectors was 25% higher than that of QB3 with ordinary steel screw connectors. The new type of precast sandwich insulation panels using GFRP screw connectors to connect the inner and outer layer panels has good bearing capacity and deformation capacity, and its integrity is excellent, and the screw can effectively transfer force between the inner and outer concrete panels, the composite degree coefficient is higher than 50%.

**Key words:** precast sandwich insulation panels; GFRP screw connector; flexural behavior; composite action

中国建筑节能协会相关统计指出,我国建筑能耗在总能耗中占据很大比例,建筑领域节能减排是实现“碳达峰、碳中和”目标的关键举措。外墙保温在建筑节能系统中占很大比例。由于传统的外墙保温存在安装复杂、保温效果差和安全性低等缺点,因此学者们提出了预制夹心保温墙板。该墙板由内外层钢筋混凝土外壳、保温材料和连接内外层外壳的连接件组成。根据内外层混凝土与保温材料之间的相互作用,夹心保温墙板可分为三种类型:完全复合板、非复合板和部分复合板<sup>[1-2]</sup>。由于部分复合板优越的热性能、结构性能和良好的经济性,部分复合板得到了广泛应用。

复合作用的程度取决于连接内外侧混凝土的连接件。在传统的预制夹心保温墙板中,钢连接件使用较为广泛。然而,钢连接件具有很高的导热性,容易在夹心保温墙板中产生热桥效应<sup>[3]</sup>,导致其保温性能较差。纤维增强聚合物(FRP)具有较低的导热性和较好的力学性能,是夹心保温墙板连接件的理想材料<sup>[4-5]</sup>。玻璃纤维增强聚合物

(GFRP)、碳纤维增强聚合物(CFRP)和玄武岩纤维增强聚合物(BFRP)具有相近的导热性能与力学性能,但由于GFRP的制作成本更低,因此,GFRP作为钢制连接件的替代品被广泛应用于夹心保温墙体<sup>[6-8]</sup>。

国内外学者对各种类型的FRP连接件,如斜插片、网格和板等进行了受力性能和热工性能试验。杨佳林等<sup>[9]</sup>对采用FRP连接件的夹心保温墙板进行了拔出、抗剪和保温性能等多项试验,分析其受力性能以及导热性能。J. H. Xie等<sup>[10]</sup>对采用BFRP连接件的夹心保温墙板进行了抗剪和抗弯试验,研究了连接件的插入角度和混凝土中废骨料替代率对其承载能力、延性和复合程度等性能的影响。I. Choi等<sup>[11-12]</sup>对采用网格式GFRP连接件的夹心保温墙体进行受力性能试验,分析了连接件布置形式和加载类型对其破坏形式、承载能力和延性等性能的影响。潘鹏等<sup>[13]</sup>对采用GFRP连接件的夹心保温墙体进行了拉拔试验,分析了不同形式的GFRP连接件对其破坏模式和承载能力等性能的影响,并进行了有限元模拟和相关理论推导。

上述研究表明,GFRP 连接件在夹心保温墙板中发挥了很好的作用,是一种理想的保温连接材料。目前已有连接内外墙板的形式主要为利用连接件锚固于内外层墙板中,连接件两端需要设置锚固装置,连接件与内外层墙板的钢筋网不进行连接,连接件需要锚固在混凝土中,并满足一定的锚固长度。为提高夹心保温墙体的复合作用和保温性能,有必要提出更有效的内外墙板间的连接形式。基于此,笔者提出采用 GFRP 螺杆连接件的预制夹心保温墙板,局部采用 GFRP 板代替钢筋以实现 GFRP 螺杆连接内外层墙板,从而增加内外层墙板的复合作用和施工便捷性。

1 试 验

1.1 试件设计

对于中高层住宅楼,其墙体可以用夹心保温墙板填充,单个开间高×宽约为 2 700 mm×4 200 mm。若单个开间的外墙采用整块墙板,很大程度能够降低墙板之间拼接接缝的热量损伤,同时也能够减少现场拼装工作量,加快施工效率。为了推广夹心板保温墙板的工程应用,减轻建筑领域可能造成的热量损失,基于与此结构原型相同的宽高比,同时考虑实验室加载空间的限制,笔者设计 1/3 缩尺夹心保温墙板,设计的墙板试件高×宽为900 mm×1 400 mm。

采用 GFRP 板替代螺杆连接内外层墙板位置的纵向钢筋(或者横向钢筋);采用 GFRP 螺杆连接内外层墙板中的 GFRP 板,用螺母进行固定;通过 GFRP 螺杆实现内外层墙板钢筋网的连接,整体受力性能好。该锚固方式在螺杆两端采用螺母固定,施工操作方便,混凝土浇筑时连接件锚固处混凝土易密实。

试验设计了 4 片预制夹心保温墙板。考虑到螺杆的材质(GFRP 螺杆或普通钢螺杆)对保温隔热性能的影响较大,而 GFRP 板替

代纵向或横向钢筋对保温隔热性能的影响较小,但两者对墙板的受弯性能影响需要进一步研究,因此试验的设计变量为螺杆的材质、钢筋替代材质和钢筋替代形式。墙体总厚度为 150 mm,其中内外层混凝土和保温材料的厚度均为 50 mm。采用直径 6 mm 的 GFRP 螺杆或普通钢螺杆作为连接内外层墙板的连接件,墙体的部分钢筋被厚×宽为 3 mm×30 mm的 GFRP 板或钢板替代。预制夹心保温墙板设计参数见表 1,墙板尺寸及配筋如图 1、图 2 所示。

表 1 试件设计参数

Table 1 Parameters of specime			
编号	钢筋替代形式	钢筋替代材质	连接件材质
QB1	横向	GFRP	GFRP
QB2	纵向	GFRP	GFRP
QB3	横向	普通钢	普通钢
QB4	纵向	普通钢	普通钢

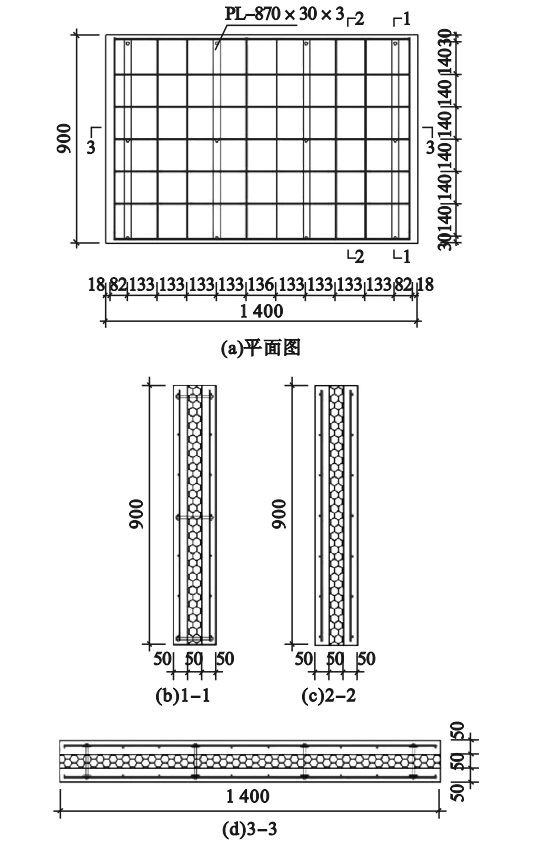


图 1 QB1 和 QB3 的几何尺寸及构造  
Fig. 1 Dimensions and constructions of QB1 和 QB3

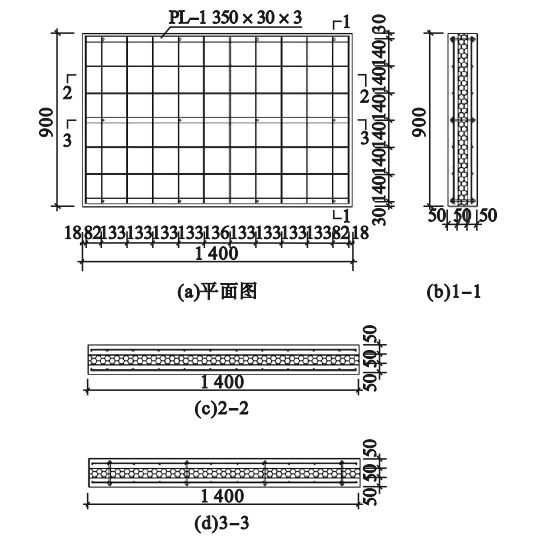


图2 QB2 和 QB4 的几何尺寸及构造

Fig. 2 Dimensions and constructions of QB2 和 QB4

1.2 材料性能

4 片预制夹心保温墙板均采用 C30 混凝土,同一批次浇筑混凝土,且浇筑试件的同时浇筑 3 个长×宽×高为 150 mm×150 mm×150 mm 的混凝土试块,与预制夹心保温墙板在相同条件下养护。养护 28 d 后测得混凝土立方体抗压强度为 31.5 MPa。钢筋采用热处理带肋高强钢筋<sup>[14]</sup>,屈服强度为 630 MPa。钢筋替代材质为 Q235 钢板和 GFRP 板,连接件为普通钢螺杆和 GFRP 螺杆,根据材料性能试验,测得相关强度指标见表 2。试件采用挤塑聚苯板(XPS)作为保温材料,其抗压强度、弹性模量、密度和导热率分别为 122 kPa、9.2 MPa、30 kg/m<sup>3</sup> 和 0.03 W/(m·K)。试件浇筑流程如图 3 所示。

表2 材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of materials						
类别	直径/mm	厚度/mm	弹性模量/ 10 <sup>5</sup> MPa	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	伸长率/%
钢筋	6	—	2	780.5	950.0	17.2
Q235 板	—	3	2	308.5	425.1	26.5
GFRP 板	—	3	0.2	295.8	398.9	4.5
GFRP 螺杆	6	—	0.2	405.2	496.4	4.8
普通钢螺杆	6	—	2	326.5	432.8	40.3

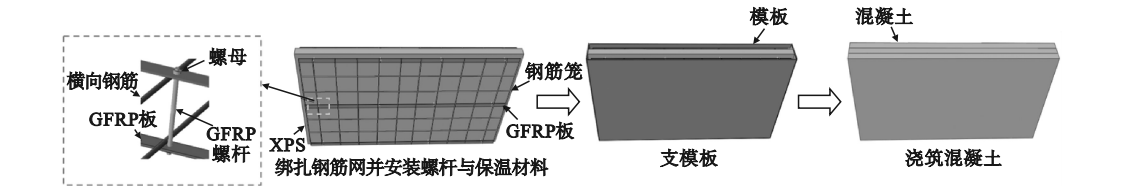


图3 工艺流程图

Fig. 3 Process flow diagram

1.3 加载及测量方案

跨中竖向集中加载能够让墙板的破坏位置更可预测,同时可以增加相同长度墙板的最大弯矩<sup>[15-16]</sup>。因此,预制夹心保温墙板水平放置在两端的铰支座上,利用 50 t 电液伺服压力试验机和加载梁在其跨中进行竖向集中加载,加载装置如图 4 所示。试验开始前,进行预加载以检查试验设备是否正常。加载

方案采用荷载控制的分级加载:①预测试件的开裂荷载和峰值荷载,以 0.18 倍的开裂荷载为幅值加载直至达到 90% 的开裂荷载;②以 0.05 倍的开裂荷载为幅值加载直至试件开裂;③以 0.1 倍的峰值荷载为幅值加载至峰值荷载的 90%;④以 0.05 倍的峰值荷载为幅值加载至峰值荷载的 80%,停止试验。



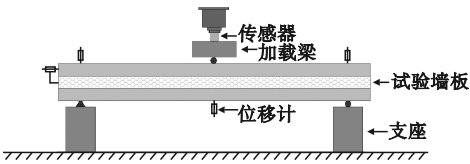


图 4 加载装置  
Fig. 4 Loading device

试件制作时,在纵向钢筋和纵向 Q235 钢板或 GFRP 板跨中位置均布置应变片,测量其在试验过程中的应变;在试件底部、支座处和侧面分别布置位移计,测量试件的跨中挠度和混凝土与保温材料之间的滑移(见图 4)。另外,采用裂缝观测仪对加载过程中混凝土的裂缝进行测量。

2 受力性能分析

2.1 试验现象和破坏特征

试件破坏形态如图5 ~ 图8所示。结合

试验过程可知,所有的预制夹心保温墙板均发生弯曲破坏,且各预制夹心保温墙板有相似的破坏过程。首先,下层混凝土底部跨中位置出现横向细微裂缝,随后,混凝土与保温材料之间开始出现滑移;随着荷载的进一步增加,下层混凝土底部跨中位置不断出现新裂缝,裂缝宽度随之加大,且上层混凝土跨中加载位置处出现裂缝和混凝土起皮,混凝土与保温材料之间发现明显滑移;最后,上层混凝土跨中加载位置混凝土被压碎,下层混凝土底部跨中位置处的裂缝宽度增大,跨中挠度急剧增大,承载力降至峰值荷载的 80%,试件宣告破坏,试验结束。试件破坏后,各试件的螺杆均较好地锚固在内外墙板中,没有发生螺杆的锚固失效。各预制夹心保温墙板在破坏时均出现了较大的变形,破坏过程缓慢,均属于延性破坏。

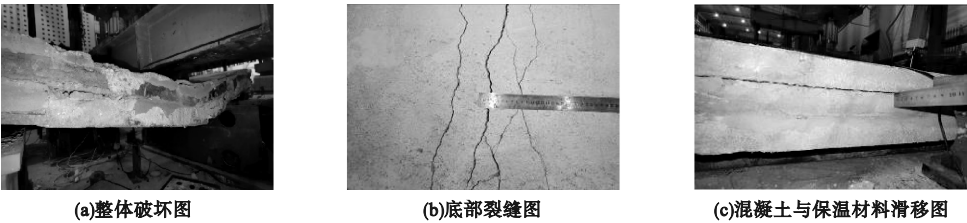


图 5 QB1 破坏形态  
Fig. 5 Failure modes of QB1

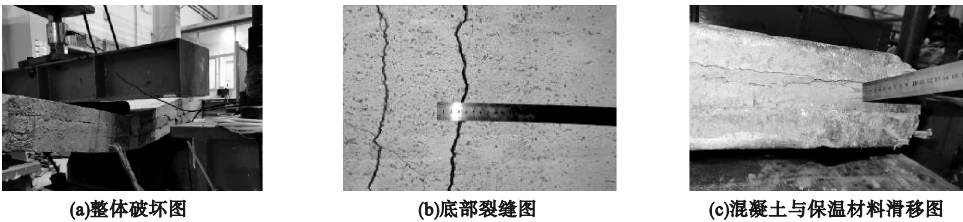


图 6 QB2 破坏形态  
Fig. 6 Failure modes of QB2

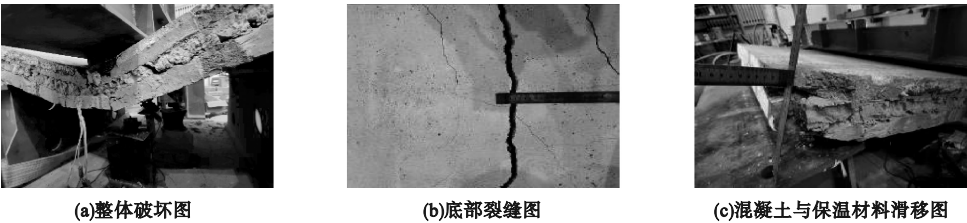


图 7 QB3 破坏形态  
Fig. 7 Failure modes of QB3

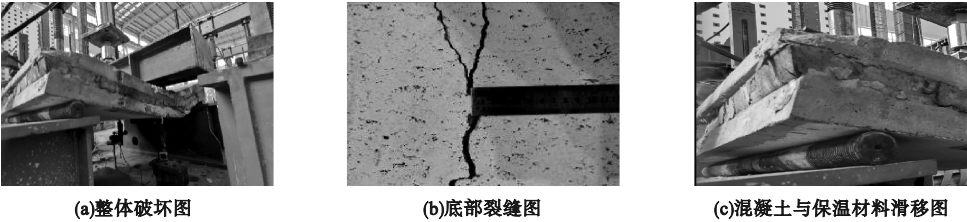


图8 QB4破坏形态

Fig. 8 Failure modes of QB4

与代替部分横向钢筋的预制夹心保温墙板 QB1 和 QB3 相比,预制夹心保温墙板 QB2 和 QB4 下层混凝土底部的裂缝更多,且裂缝宽度更小,混凝土与保温材料之间的最终滑移更小,且具有更高的峰值荷载和变形能力。分析原因是因为预制夹心保温墙板 QB2 和 QB4 采用 GFRP 板和钢板代替了部分纵向钢筋,增大了螺杆的锚固性能,提升了预制夹心保温墙板的复合作用;而且 GFRP 板和钢板具有较好的变形能力和较大的横截面积,为纵向钢筋分担了更大的荷载。与采用普通钢螺杆的预制夹心保温墙板 QB3 相比,预制夹心保温墙板 QB1 的开裂荷载更大,混凝土与保温材料之间的滑移出现的更晚,最终两者间的滑移更小,峰值荷载和跨中挠度更大。分析原因是因为预制夹心保温墙板 QB1 采用 GFRP 螺杆连接内外墙板, GFRP 螺杆具有更高的抗拉、抗剪强度,能更有效地在上下层混凝土之间传力,从而提高

了上下层混凝土之间的复合作用。

**2.2 承载能力与延性**

各预制夹心保温墙板屈服位移和屈服荷载根据通用弯矩法确定<sup>[10]</sup>,极限荷载和极限位移分别取 0.8 倍峰值荷载和与其对应的位移,延性系数为极限位移与屈服位移之比<sup>[17-18]</sup>。荷载-跨中挠度曲线如图 9 所示。各试件的特征位移、特征荷载和延性系数见表 3。

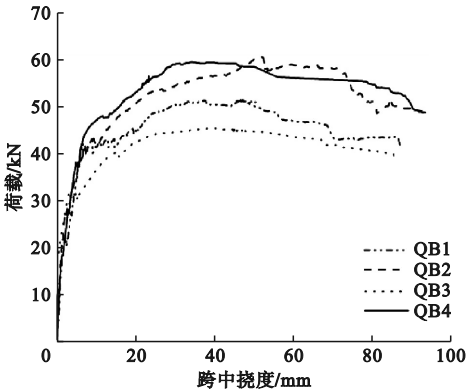


图9 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 9 Load-midspan deflection curves

表3 试验结果

Table 3 Test results

试件编号	$F_c$ /kN	$\Delta_c$ /mm	$F_y$ /kN	$\Delta_y$ /mm	$F_m$ /kN	$\Delta_m$ /mm	$F_u$ /kN	$\Delta_u$ /mm	$u$
QB1	10.76	1.16	41.64	6.46	51.60	46.71	41.28	88.11	13.64
QB2	13.18	1.07	39.24	5.76	61.05	51.36	48.84	94.06	16.33
QB3	9.62	0.87	31.89	5.05	45.29	45.50	36.23	87.80	17.39
QB4	12.83	0.98	37.49	4.71	60.33	46.46	48.26	93.51	19.85

注: $F_c$  为开裂荷载; $\Delta_c$  为开裂位移; $F_y$  为屈服荷载; $\Delta_y$  为屈服位移; $F_m$  为峰值荷载; $\Delta_m$  为峰值位移; $F_u$  为极限荷载; $\Delta_u$  为极限位移; $u$  为延性系数。

从图 9 可以看出,加载初期,各预制夹心保温墙板处于弹性阶段,荷载-跨中挠度曲线近似为一条斜率很大的直线;随着试验的

进行,试件的塑性变形不断加大,随后试件进入屈服阶段,跨中位移不断增大,荷载几乎不变;进一步加载后,荷载-跨中挠度曲线开始

平滑上升,当达到荷载峰值后,荷载-跨中挠度曲线开始缓慢下滑。

与预制夹心保温墙板 QB3 相比,预制夹心保温墙板 QB1 各个特征荷载和特征位移均较高,说明与普通钢螺杆相比,GFRP 螺杆具有更高的抗拉、抗剪性能,能够更有效地传递上、下层混凝土之间的力,有效延缓裂缝的开展。但由于 GFRP 板比普通钢板的刚度较低,导致 GFRP 板替代部分横向钢筋的预制各夹心保温墙板 QB1 具有较低的刚度,从而具有较大的屈服位移;虽然两者的极限位移相差很小,但是由于屈服位移的提升致使其延性性能有所降低。

与替代部分横向钢筋的预制夹心保温墙板 QB1 和 QB3 相比,采用替代部分纵向钢筋形式的预制夹心保温墙板 QB2 和 QB4 的开裂荷载、开裂位移、峰值荷载、峰值位移和延性均有较大提升,这表明代替部分纵向钢筋的 GFRP 板或普通钢板均能很好地与混凝土协同作用,能有效分担纵向钢筋的应力。

与预制夹心保温墙板 QB4 相比,预制夹心保温墙板 QB2 各个阶段的特征荷载和特征位移略高,可能是因为 GFRP 螺杆对其强度的提高起到了作用,而 GFRP 板的强度低于钢板,致使预制夹心保温墙板整体强度没有较大提升。各个预制夹心保温墙板的延性均大于 13,表明采用螺杆连接上、下层混凝土,利用 GFRP 板或普通钢板替代部分钢筋的形式实现螺杆锚固的方法可以很好地保证其结构延性性能。

2.3 侧向滑移与开裂性能

各预制夹心保温墙板混凝土与保温材料之间的最大滑移如图 10 所示,下层混凝土最大裂缝宽度如图 11 所示。

由图 10 可知,与 QB3 和 QB4 相比,QB1 和 QB2 保温材料与混凝土之间的最大滑移较小,这主要是因为 GFRP 螺杆具有更高的强度,提高了内外墙板的复合作用,有效限制了保温材料与混凝土之间的滑移。与替代部

分横向钢筋的预制夹心保温墙板 QB1 和 QB3 相比,采用 GFRP 板或普通钢板替代部分纵向钢筋的 QB2 和 QB4 保温材料与混凝土之间的滑移更小,这主要是因为螺杆被锚固在纵向的 GFRP 板和普通钢板上,锚固性能更好,使上、下层混凝土的连接性能更好,有效减轻了保温材料与混凝土之间的滑移。

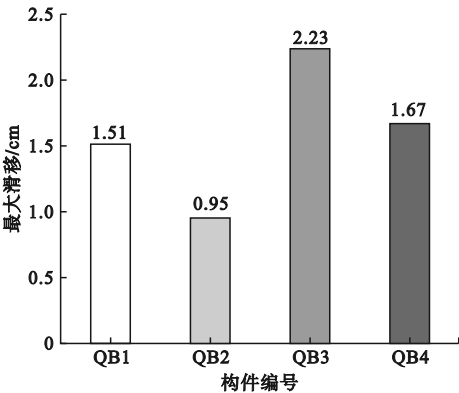


图 10 混凝土与保温材料之间的最大滑移

Fig. 10 Slip between concrete and thermal insulation material

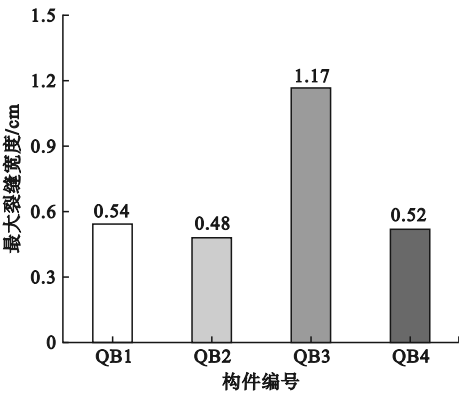


图 11 下层墙板最大裂缝宽度

Fig. 11 Maximum crack width of lower panel

由图 11 可以看出,与预制夹心保温墙板 QB3 相比,QB1、QB2 和 QB4 的下层混凝土最大裂缝宽度均大幅度降低,这表明采用 GFRP 螺杆代替普通钢螺杆和采用普通钢板或 GFRP 板代替部分纵向钢筋实现螺杆连接内外层墙板的方法均能有效提升预制夹心保温墙板的复合作用,有效限制下层混凝土裂缝的发展。

2.4 纵向钢筋和 GFRP 板/普通钢板应变

各预制保温墙板的纵向钢筋、GFRP 板

和普通钢板的荷载-应变曲线如图12所示,其中编号QBS1~QBS4分别指试件QB1~QB4跨中纵向钢筋应变,QBP2和QBP4分别指试件QB2跨中GFRP板应变和QB4跨中普通钢板应变。由图可知,预制墙板纵向钢筋的应变均超过了其极限应变 $4\,750\times 10^{-6}$ ,充分发了纵向受拉钢筋的强度;GFRP板和普通钢板也在极限荷载时超过了对应的极限应变(约 $2\,000\times 10^{-6}$ ),充分发挥了GFRP板和普通钢板的强度。

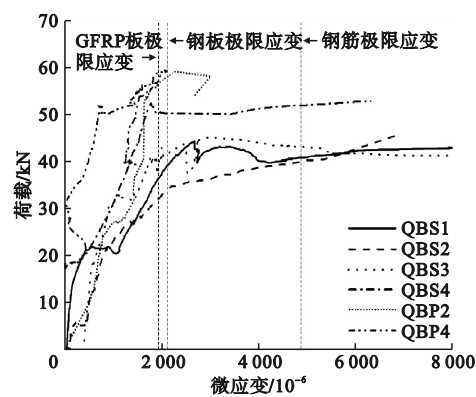


图12 荷载-应变曲线

Fig.12 Load-strain curves

2.5 复合作用

预制夹心保温墙板实测抗弯承载力 $M_p$ 可由其峰值承载力 $F_m$ 的一半与支座距跨中距离的乘积得到。基于强度理论<sup>[1]</sup>,预制夹

心保温墙板复合程度计算如下:

$$K=\frac{M_p-M_{NC}}{M_{FC}-M_{NC}}\times 100\%.$$

(1)

式中: $K$ 为复合程度系数; $M_p$ 为实测抗弯承载力; $M_{FC}$ 为完全复合理论承载力; $M_{NC}$ 为完全非复合理论承载力; $M_{FC}$ 和 $M_{NC}$ 的计算参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[19]</sup>。其中, $M_{FC}$ 的计算将中间层的保温板考虑为混凝土, $M_{NC}$ 为分开计算的内外层混凝土承载力之和。

各预制夹心保温墙板的复合作用程度结果见表4。由表4可以得出,与预制夹心保温墙板QB3和QB4相比,预制夹心保温墙板QB1和QB2的复合程度系数分别提高了25%和21%,说明GFRP螺杆能够提供较大的剪切刚度。因此,上层墙板混凝土与下层墙板混凝土之间的荷载可以更有效地传递,使预制夹心保温墙板具有更高的承载能力。与预制夹心保温墙板QB1和QB3相比,预制夹心保温墙板QB2和QB4的复合程度系数分别提高了5%和8%,这表明采用GFRP板或普通钢板替代部分纵向钢筋实现螺杆锚固的方法,可以更有效地提高连接件在内外墙板间的传力,进而提高预制夹心保温墙板的承载能力与延性性能。

表4 试件复合作用程度

Table 4 Composite action degree of specimens

试件	$F_m/\text{kN}$	$M_p/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{NC}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{FC}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$K/\%$
QB1	51.60	15.48	5.87	20.14	67.34
QB2	61.05	18.32	6.08	23.36	70.80
QB3	45.29	13.59	5.87	20.14	54.08
QB4	60.33	18.10	6.29	26.44	58.61

3 结 论

(1)所有预制夹心保温墙板试件均发生弯曲破坏,在破坏前具有较大变形,属于延性破坏,且延性系数均大于13;预制夹心保温墙板均具有良好的整体性,螺杆能够有效在上下层混凝土墙板间传力,复合程度系数均

高于50%。

(2)与普通钢螺杆连接预制夹心保温墙板相比,GFRP螺杆可以有效增强预制夹心保温墙板的承载能力,减轻混凝土的开裂,降低保温材料与混凝土之间的滑移,提升预制夹心保温墙板的复合程度系数达25%。

(3)与替代部分横向钢筋的方法相比,



GFRP 板或普通钢板替代部分纵向钢筋实现螺杆锚固的方法能够更有效提高预制夹心保温墙板的承载能力、变形能力和延性性能,同时提高了内外层混凝土之间的复合作用,有效限制了保温材料与混凝土之间的滑移。

## 参考文献

- [1] LOSCH E D, HYNES P W, JR R A, et al. State of the art of precast/prestressed concrete sandwich wall panels [J]. PCI journal, 2011, 56(2): 131–176.
- [2] TOMLINSON D, FAM A. Analytical approach to flexural response of partially composite insulated concrete sandwich walls used for cladding [J]. Engineering structures, 2016, 122: 251–266.
- [3] PAN P, HE Z Z, WANG H S, et al. Experimental investigation of C-shaped glass-fiber-reinforced polymer connectors for sandwich insulation wall panels [J]. Engineering structures, 2022, 250: 113462.
- [4] EGBON B, TOMLINSON D. Experimental investigation of longitudinal shear transfer in insulated concrete wall panels with notched insulation [J]. Journal of building engineering, 2021, 43: 103173.
- [5] SORENSEN T, TAWADROUS R, MAGUIRE M. Thermally efficient corbel connections for insulated sandwich wall panels [J]. Journal of building engineering, 2022, 45: 103424.
- [6] 王文豪. GFRP 抗剪连接件复合墙板的抗弯性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2020. (WANG Wenhao. Study on flexural behavior of sandwich panels with GFRP shear connectors [D]. Ji'nan: Shandong University, 2020.)
- [7] 郝锦涛. 适用于超低能耗建筑的夹芯保温墙体及其连接件力学性能试验研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2022. (HAO Jintao. Experimental research on mechanical performance of sandwich insulation wall and its connectors suitable for ultra-low energy consumption buildings [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022.)
- [8] SYLAJ V, FAM A. UHPC sandwich panels with GFRP shear connectors tested under combined bending and axial loads [J]. Engineering structures, 2021, 248: 113287.
- [9] 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.)
- [10] XIE J H, CHEN F M, ZHAO J B, et al. Flexural behaviour of full-scale precast recycled concrete sandwich panels with BFRP connectors [J]. Journal of building engineering, 2022, 56: 104816.
- [11] CHOI I, KIM J H, KIM D W, et al. Effects of grid-type shear connector arrangements used for insulated concrete sandwich wall panels with a low aspect ratio [J]. Journal of building engineering, 2022, 46: 103754.
- [12] CHOI I, KIM J H, YOU Y C, et al. Effect of cyclic loading on composite behavior of insulated concrete sandwich wall panels with GFRP shear connectors [J]. Composites part B: engineering, 2016, 96: 7–19.
- [13] HE Zhizhou, PAN Peng, XIAO Genqi, et al. Test and analysis on axial performances of GFRP restraint connectors for sandwich insulation wall panels [J]. Journal of building engineering, 2021, 45: 103457.
- [14] 河北省住房和城乡建设厅. 热处理带肋高强钢筋应用技术标准: DB13(J)/T8448—2021 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2021. (Department of Housing and Urban Rural Development of Hebei Province. Technical standard for application of heat-treatment high-strength ribbed bar: DB13(J)/T8448—2021 [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2021.)
- [15] CHEN A, NORRIS T, HOPKINS P, et al. Experimental investigation and finite element analysis of flexural behavior of insulated concrete sandwich panels with FRP plate shear connectors [J]. Engineering structures, 2015, 98: 95–108.
- [16] O'HEGARTY R, WEST R, REILLY A, et al. Composite behaviour of fiber-reinforced concrete sandwich panels with FRP shear connectors [J]. Engineering structures, 2019, 198: 109475.
- [17] ZHANG J X, LI C C, RONG X, et al. Experimental study on the seismic performance of steel-concrete beam-column connections for prefabricated concrete frames [J]. Journal of building engineering, 2021, 43: 103236.
- [18] ZHANG J X, ZHANG T W, YUAN W T. Development and experimental seismic study of bearing-two-level yielding energy dissipation beam-column-slab joints for precast concrete frames [J]. Journal of building engineering, 2024, 86: 108779.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)