引用格式：尚仁杰，黄翩翩，薛伟辰，等．四点支承超高性能混凝土（UHPC）饰面钢龙骨夹心保温外墙板受弯性能研究[J]．工业建筑，2026，56（2）：29-37．SHANG Renjie，HUANG Pianpian，XUE Weichen，et al. Research on the Flexural Behavior of Four-Point Supported Steel-Framed Composite Panel with UHPC Cladding[J]. Industrial Construction，2026，56（2）：29-37（in Chinese）．DOI：10.3724/j.gyjzG25093004

四点支承超高性能混凝土（UHPC）饰面钢龙骨夹心保温外墙板受弯性能研究*

尚仁杰[1]　黄翩翩[1]　薛伟辰[2]　李　亚[2]

（1. 中冶建筑研究总院有限公司，北京　100088；2. 同济大学土木工程学院，上海　200092）

摘　要　提出了一种超高性能混凝土（UHPC）面板钢龙骨复合墙板，该复合墙板以钢龙骨为主受力构件，采用UHPC做室外面板提高抗渗性和耐久性，通过玻璃纤维增强塑料（GFRP）连接件降低热传导并提高UHPC板与钢龙骨结构的整体性，可满足超低能耗建筑的框架结构外挂墙板要求。设计制作了足尺复合墙板，进行了均布荷载下四点支承平面外受弯试验，并进行了有限元模拟。结果表明：GFRP连接件对复合墙板整体性具有显著影响，可提高抗弯刚度30%，跨中挠度和钢龙骨跨中弯矩均减小30%；当荷载达到14 kN/m^{2}时，试验墙板钢龙骨达到屈服应力，UHPC面板有少量裂缝，裂缝宽度不大于0.1 mm；当荷载为25 kN/m^{2}时支座破坏，荷载-挠度曲线斜率为初始斜率的29%，但尚未达到下降段，UHPC板在四个角部支座附近和复合墙板四周跨中出现少数贯通裂缝，除角部GFRP连接件有一定侧向不可恢复变形外，其余均保持完好；UHPC面板钢龙骨复合墙板可以满足框架结构装配式外围护墙板的受力要求。

关键词　UHPC；GFRP连接件；钢龙骨复合墙板；足尺试验；四点支承；有限元分析

Research on the Flexural Behavior of Four-Point Supported Steel-Framed Composite Panel with UHPC Cladding

SHANG Renjie[1]　HUANG Pianpian[1]　XUE Weichen[2]　LI Ya[2]

（1. *Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, Beijing* 100088, *China*; 2. *College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai* 200092, *China*）

Abstract: This paper proposes a novel ultra-high performance concrete (UHPC) panel-steel keel composite wallboard. Designed with steel keels as the primary load-bearing components, the wallboard utilizes UHPC for its exterior panels to enhance impermeability and durability. Glass fiber-reinforced polymer (GFRP) connectors are employed to reduce heat conduction and improve structural integrity between the UHPC panels and the steel keel framework. This design meets the requirements for external wallboards in frame structures of ultra-low energy consumption buildings. A full-scale composite wallboard was fabricated and subjected to an out-of-plane bending test under a uniformly distributed load with four-point supports, complemented by finite element simulation. The results showed that the GFRP connectors had a significant impact on the integrity of the composite wallboard, resulting in a 30% increase in bending stiffness and a 30% reduction in both the mid-span deflection and the steel keel's mid-span bending moment. When the load reached 14 kN/m^2, the steel keel of the test wallboard reached the yield stress, and fine cracks

*“十四五”国家重点研发计划（2022YFC3801400）。

第一作者：尚仁杰，博士，正高级工程师，主要从事预应力技术和装配式围护结构研究。

电子信箱：shangrenjie@aliyun.com

收稿日期：2025-09-30

© 2026 工业建筑

with widths not exceeding 0. 1 mm appeared on the UHPC panels. At the load of 25 kN/m^2, the supports failed; the slope of the load-deflection curve decreased to 29% of its initial value, but it had not yet entered the descending section. A limited number of through-thickness cracks were observed in the UHPC panels near the four corner supports and at the mid-span of each edge. Except for some irreversible lateral deformation in the corner GFRP connectors, all other components remained intact. These findings indicate that the proposed UHPC panel-steel keel composite wallboard can meet the mechanical requirements for prefabricated exterior wallboards in frame structures.

Keywords: UHPC; GFRP connector; steel keel composite wallboard; full-scale test; four-point supports; finite element analysis

稳步发展装配式建筑和超低能耗建筑是我国建筑领域节能减碳的重要内容，也是建设安全、舒适、绿色、智慧“好房子”的重要举措。与传统建筑相比，装配式建筑不仅提升建筑质量，同时提高建筑的节能减排率，可促进我国建筑业健康可持续发展。超低能耗建筑基于当地气候特征，选用具有高气密性和高保温效果的围护结构，并通过采用热管理和可再生能源等新技术，有效降低建筑使用过程中供热和制冷所需能源。

根据住建部《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》，到2025年，我国将建成超低能耗、近零能耗建筑0. 5亿m^{2}以上，其中装配式建筑占新建建筑的面积比例达30%以上[1]，这一数字将在2030年上升至40%。装配式建筑和超低能耗建筑已被列为在2030年前实现碳达峰的重要任务。

钢结构具有自重轻、刚度大、承载力高、便于施工等优点，已在装配式建筑中广泛采用[2-5]。超高性能混凝土（UHPC）是一种具有超高力学性能和耐久性的纤维增强水泥基复合材料，具有优异的装饰性能，其水胶比远低于常规混凝土，孔隙率是普通混凝土的1/10，具有极低的吸水率，特别适合作为围护外墙的外饰面。近年来，UHPC外挂墙板[6]在国内外幕墙工程和装配式建筑中已经得到广泛应用。UHPC面板与混凝土内叶板通过不锈钢连接件连接[7]形成外挂墙板，适用于装配式框架结构体系；UHPC做成装配式肋板[8-9]可提高结构耐久性并减小肋板的厚度和重量；UHPC也在装配式桥梁结构中应用，一般将UHPC与钢相结合形成组合桥面板结构[10]。玻璃纤维增强塑料（GFRP）导热系数为0. 2~0. 3 W/（m·K），是普通钢材导热系数的1/200左右，可起到隔热、保温的节能效果，其强度是普通钢材强度的3~5倍，可作为主受力筋布置在UHPC受力结构中[11]，也可以用作预制混凝土夹心墙中内叶板和外叶板之间的连接件[12-13]，有效提高外墙的保温性能。

装配式框架结构，尤其钢框架结构，其侧向刚度相对较小，开发与之适应的多功能一体化轻质围护墙板是近年来装配式建筑发展的关键技术之一[2-3]。本文将钢结构作为主受力构件、UHPC板作为室外面板，通过GFRP连接件断桥连接，自主研发了UHPC-钢龙骨夹心保温复合外挂墙板，质量控制在150 kg/m^2，为发展装配式建筑和超低能耗建筑提供了一种可供选择的外围护结构部品。UHPC钢龙骨复合墙板主要用于装配式框架结构的外围护体系，与主体结构的连接方式为四点连接。四点支承板的受力复杂[14-15]，解析求解困难，需要通过试验或有限元分析。另外，复合墙板的钢龙骨通过GFRP连接件与UHPC板共同受力，需通过试验研究确定复杂受力的墙板性能[16]。本文按1∶1设计、制作了面积大于13 m^{2}的复合墙板，提出了通过反力架和4个千斤顶同步加载，并通过2级分配梁和1级分配钢板进行荷载分配的均布加载方案。开展UHPC-钢龙骨复合墙板四点支承平面外抗弯性能试验研究，测量墙板所受荷载、挠度、钢龙骨下表面应变，观察UHPC板、GFRP连接件和钢龙骨的破坏模式，研究复合墙板的整体刚度、破坏形态等。运用ANSYS软件建立UHPC-钢龙骨复合墙板有限元模型，模拟分析了四点支承下复合墙板变形特点，并与试验结果进行了对比分析，验证有限元模型建模方法的可靠性，并进一步分析了GFRP连接件刚度对复合墙板整体性的影响。

本文试验结果和有限元模拟规律可为正在编写的《超高性能混凝土轻钢龙骨复合外墙应用技术规程》提供技术支撑，并为该类墙板在工程中推广应用提供依据。

1　试验研究

1.1　试验墙板设计与制作

UHPC-钢龙骨复合墙板是国家重点研发计划项目组开发的适用于超低能耗和近零能耗建筑的外挂墙板，以钢龙骨为主受力结构，外侧面采用20 mm厚UHPC板作为外覆面板，可以满足抗渗、抗冻等耐久性要求，通过GFRP连接件和灌浆钢套筒将UHPC板与主受力的钢龙骨连接，形成整体墙板，内侧面采用15 mm厚纤维水泥板作为内饰板，中间填充保温材料，见图1、图2。

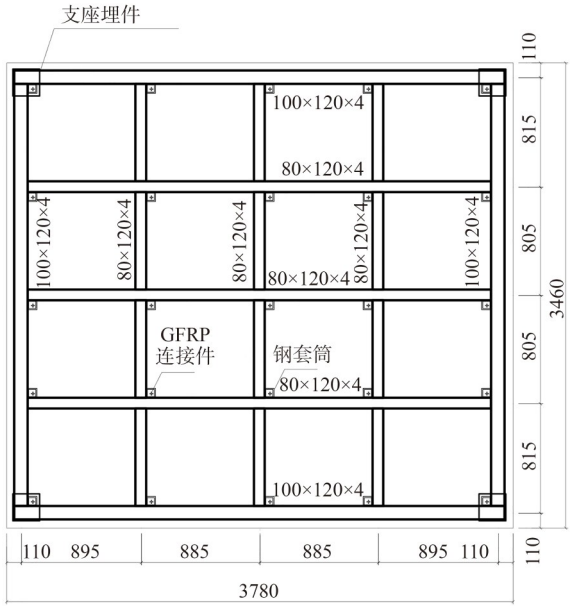


图1　UHPC-钢龙骨复合外墙板设计　mm

Fig. 1　Plan of the UHPC panel-steel keel composite wallboard

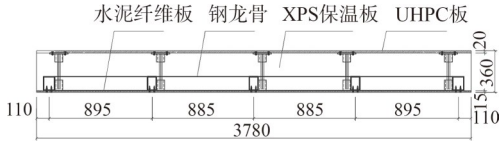


图2　UHPC-钢龙骨复合墙板剖面　mm

Fig. 2　Cross-section of the UHPC panel-steel keel composite wallboard

试验墙板平面尺寸为3780 mm×3460 mm，墙板面积13.08 m^2，厚度为360 mm，可满足寒冷地区超低能耗建筑节能要求。4个支承点位于四角的轴线交点，支承点焊接钢板。钢龙骨的中龙骨截面$b\times h\times t$=80 mm×120 mm×4 mm，边龙骨截面$b\times h\times t$=100 mm×120 mm×4 mm，由于墙板主要承受风荷载，荷载相对较小，经过初步分析，钢材选用Q235B即可满足承载力要求。实测材料性能见表1。

UHPC采用武汉源锦建材科技有限公司的UJOIN-UHPC超高性能混凝土预混料，配合比为预混料∶水∶钢纤维=1000∶90∶40，强度为UC100，28 d立方体强度f_{cu}为103.5 MPa，56 d立方体强度为117.7 MPa，根据强度确定弹性模量为40 GPa，抗弯强度标准值不低于12 MPa。

表1　钢材材性试验结果

Table 1　Material property test results of steels　MPa

钢材类型	屈服强度σ_p	抗拉强度f_u	弹性模量
Q235B	278	423	2.06×10^5

GFRP连接件由南京斯贝尔复合材料有限责任公司生产，尺寸见图3，力学参数见表2。

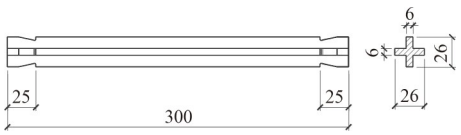


图3　GFRP连接件尺寸　mm

Fig. 3　Dimensions of the GFRP connector

表2　GFRP连接件相关参数

Table 2　Parameters of the GFRP connector

拉伸弹性模量/GPa	泊松比	拉伸强度/MPa	层间剪切强度/MPa
55.3	0.27	827	59

试验墙板在河北榆构建材有限公司工业化建筑生产线制作（图4）。提前焊接钢龙骨及灌浆套筒、连接钢板及灌浆套筒。制作流程为：在墙板生产平台上浇筑20 mm厚UHPC→安装连接钢板及灌浆套筒→安装钢龙骨与UHPC板之间的保温板→安装钢龙骨→安装GFRP连接件并灌浆→安装龙骨间的保温板→安装水泥纤维板。



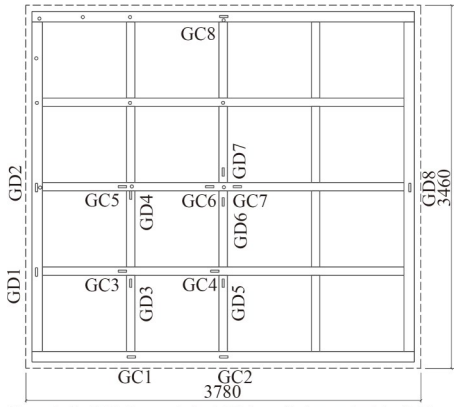
图4　UHPC-钢龙骨复合外墙板制作过程

Fig. 4　Manufacturing of UHPC panel-steel keel composite wallboards

1.2　测点布置与加载方式

选取钢龙骨的4个边龙骨和左下1/4区域的内部钢龙骨，在钢龙骨底面粘贴18个应变片（图5）。选取左上1/4区域布置11个竖向位移计，测量加载过程中的竖向变形。另外，端部布置侧向位移计测量UHPC层和钢龙骨之间的错动变形。

试验采用四点支承、均布加载方式，通过反力架和千斤顶加载（图6）：由同一个油泵→4个规格相



注：◦为位移测点；▫为应变测点，其中GD表示钢龙骨短向测点，GC表示钢龙骨长向测点。

图5 钢龙骨底部应变片及位移测点布置 mm

Fig. 5 Arrangement of strain gauges and displacement points at the bottom of the steel keel

同的千斤顶→4根一级分配梁→8根二级分配梁→16块分配钢板→64块橡胶垫加载点，通过64块橡胶垫同步加载，基本实现板的均布加载。

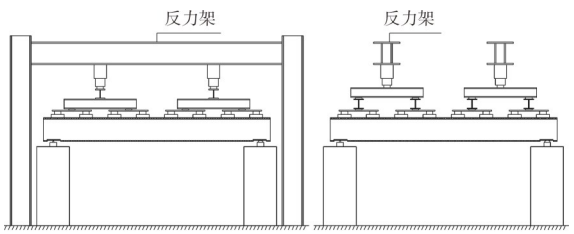


图6 加载装置示意

Fig. 6 Loading device

考虑到内饰板对承载力的贡献较小，在加载前去除内饰板以便于观察试验现象。墙板自重17.53 kN，折合均布荷载1.34 kN/m^2，去除内饰板后墙板剩余自重为1.04 kN/m^2。分配梁、分配钢板、橡胶垫等加载系统自重11.60 kN，折合均布荷载0.89 kN/m^2，因此，千斤顶加载前墙板所受面荷载为q_0=1.93 kN/m^2，总计Q_0=25.24 kN。

加载采用荷载控制，4个千斤顶均安装力传感器，4个力传感器合力为F。预加载F=8 kN，使加载装置紧密接触，然后将荷载归零。参考GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》，以荷载增量ΔF=4 kN逐级加载，每级荷载持荷时间不少于2 min。试验中当切线刚度降低到初始刚度的20%时，采用位移控制加载，每级加载控制跨中挠度增加约1 mm。

复合墙板使用中主要承受平面外均布荷载，千斤顶加载为集中力。为便于文中表述，将集中荷载、均布荷载以及不同加载阶段的表达符号列入表3。

表3 墙板荷载对应符号

Table 3 Load representations for the wallboard

加载阶段	集中荷载	均布荷载
千斤顶加载前	Q_0	q_0
千斤顶加载	F	q_1
总荷载	Q_k	q_k

2 试验结果分析

2.1 加载与变形过程

均布荷载q_1–跨中挠度f曲线见图7。可见，墙板承受荷载小于q_1=10.0 kN/m^{2}时，试件基本处于线弹性阶段，初始刚度约为0.55 kN/m^2·mm^{-1}，正常使用荷载2.0 kN/m^{2}时的跨中挠度仅为3.7 mm，约为跨度的1/1000。当荷载增加至q_1=12.0~14.0 kN/m^{2}时，荷载–挠度曲线切线斜率略有减小，当荷载增加至q_1=15.0 kN/m^{2}时，挠度为31 mm，在UHPC板边缘的跨中位置首次观察到裂缝出现，裂缝宽度小于0.1 mm，荷载–挠度曲线切线斜率降为0.42 kN/m^2·mm^{-1}。继续加载到q_1=20.0 kN/m^{2}时，曲线斜率又有明显减小，切线斜率降为0.30 kN/m^2·mm^{-1}；当加载到q_1=25.0 kN/m^{2}时，支承墙板的一个支座侧向变形较大，不能继续加载，停止试验，此时墙板挠度为62 mm，切线刚度降为0.16 kN/m^2·mm^{-1}，为初始刚度的29%，荷载–挠度曲线尚未达到下降段，墙板本身仍可以继续加载，整个荷载–挠度曲线光滑平顺。

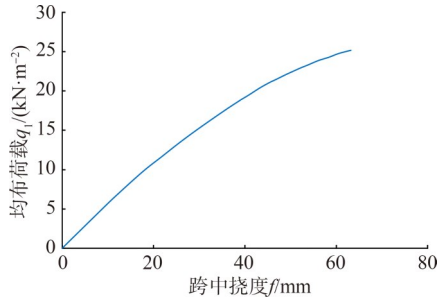


图7 复合墙板荷载–挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curve of the composite wallboard

2.2 四点支承挠度分布

最大荷载下复合墙板变形见图8、9。根据不同位置位移计的挠度值及结构对称性，绘制荷载F=300 kN时墙板挠度分布，见图10。可以直观看出：

1）跨中挠度减去端部挠度作为单根钢肋梁相对挠度，相对挠度变化规律为：边梁>次边梁>中间梁，相对挠度大则曲率大，相同截面时，曲率大则弯矩大，因此，边梁弯矩>次边梁弯矩>中间梁弯矩。

2）所有挠度随荷载增大表现出非线性增长，见

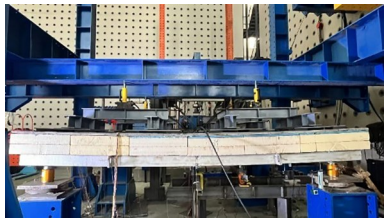


图 8　墙板变形(长跨方向)

Fig. 8　Deformation of the wallboard (long-span direction)



图 9　墙板变形(短跨方向)

Fig. 9　Deformation of the wallboard (short-span direction)

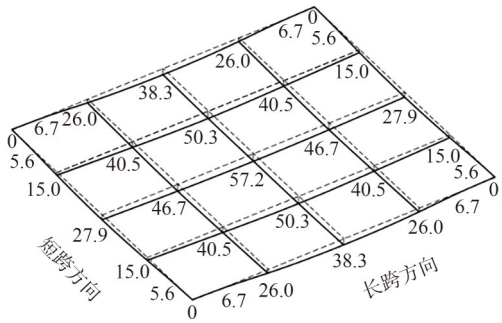


图 10　墙板挠度分布　mm

Fig. 10　Deflection distribution of the wallboard

表 4,且长跨方向边梁挠度大于短跨方向边梁挠度。当荷载 F 从 100 kN 增加到 300 kN 时,长跨与短跨方向边梁跨中挠度差值从 1.5 mm 增加至 10.4 mm。

3)由于复合墙板四角支承点离墙板边缘 110 mm,在承受均布荷载过程中墙板 4 个角点发生向上的翘曲。

4)墙板变形与无梁楼盖结构角板的变形类似,四点支承墙板与边支承墙板相比,受力更为复杂。

表 4　不同荷载水平下边梁跨中挠度

Table 4　Mid-span deflections of edge beams under different load levels

荷载 F/kN	挠度/mm		挠度差值/mm
	长跨方向	短跨方向	
100	9.3	7.8	1.5
200	20.7	16.5	4.2
300	38.3	27.9	10.4

2.3　墙板端面纵向变形与墙板整体性

在 UHPC-钢龙骨复合墙板端面布置位移计,记录 UHPC 层和钢龙骨的端部纵向变形,并绘制得到荷载-纵向变形曲线(图 11)。可以看出,在加载过程中,上层的 UHPC 板在缩短,下层的钢龙骨在伸长,由于钢龙骨位移计位置在形心偏下,因此钢龙骨纵向变形包括弯曲产生的纵向伸长和轴向拉伸伸长。根据试验曲线可以推断,由于 GFRP 连接件水平方向的抗剪作用,UHPC 板和钢龙骨保持一定的共同作用,使得 UHPC 板受压、钢龙骨受拉,墙板整体刚度高于钢龙骨刚度和 UHPC 板刚度的线性叠加。

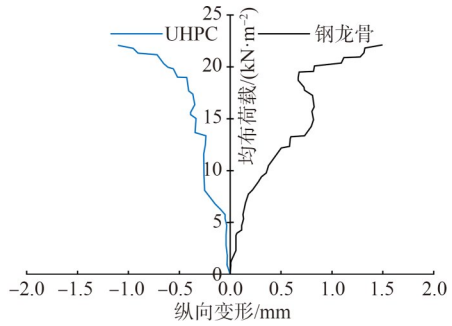


图 11　复合墙板端部荷载-纵向变形曲线

Fig. 11　Load-longitudinal displacement curve at the end of the composite wallboard

2.4　钢龙骨应变与屈服

试验过程中钢龙骨的荷载 q_1-应变曲线见图 12,测点编号见图 5。可以看出:

1)复合墙板在承受均布荷载过程中,钢龙骨应变大小:GC8>GC7、GD2>GD1>GD3,这说明在相同荷载作用下,钢龙骨边梁跨中位置产生的应变大于中间梁跨中应变。

2)轻钢龙骨实测屈服强度 278 MPa,对应的应变约为 1350×10^{-6}。当钢龙骨应变达到 1350×10^{-6} 后,荷载-应变曲线出现非线性,但由于复合墙板为多次超静定结构,边龙骨屈服后结构产生内力重分布,墙板能继续承受更大荷载。

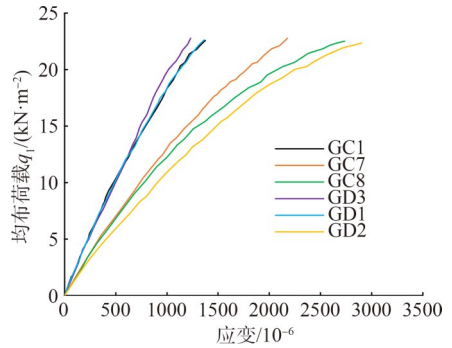


图 12　钢龙骨荷载-应变曲线

Fig. 12　Load-strain curves of steel keels

3）边龙骨跨中的GC8和GD2率先进入屈服阶段，这是由于边梁相对挠度大于内梁，跨中弯矩大，故弯矩产生的曲率大，应变也大。GD2最先达到屈服应变时均布荷载q_1约为14 kN/m^2。当均布荷载q_1达到22.7 kN/m^{2}时，边龙骨跨中应变达到2900×10^{-6}。由于边龙骨跨中的GC8和GD2率先进入屈服，因此边龙骨的相对挠度最大，与图10的挠度分布吻合。

2.5 墙板破坏形态

1）墙板整体形态：UHPC-轻钢龙骨复合墙板加载到F=327 kN、q_1=25 kN/m^{2}时，支座不能继续加载。墙板跨中最大挠度62 mm（为长跨的1/57），荷载-挠度曲线（图7）尚未达到下降段，除支座外，墙板仍可以继续承受荷载的增加。

2）钢龙骨：钢龙骨出现局部屈服，主要集中在钢龙骨各跨的跨中位置，其中边龙骨跨中应变达到2900×10^{-6}以上，在q_1达到22.7 kN/m^{2}后未采集到应变数据，但墙板仍能继续承受荷载。

3）UHPC板：加载中UHPC薄板出现贯穿板厚的裂缝，主要集中出现在四周边缘的跨中和四个支座附近，但裂缝数量较少且裂缝宽度较小，除标注的裂缝宽度约0.35 mm外，其余裂缝宽度均不大于0.20 mm；卸载后对UHPC板上表面进行了观察，长向接近跨中位置有一条较长裂缝，宽度约0.15~0.20 mm（图13）。

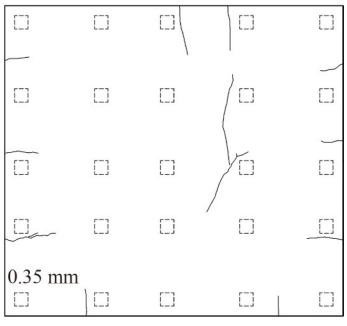


图13 卸载后UHPC板裂缝分布

Fig. 13 Distribution of cracks on the UHPC panel after unloading

4）GFRP连接件：角部4个连接件沿剪力方向发生轻微不可恢复变形[图14(a)]，但连接件尚未剪切断开，连接件在灌浆套筒中充分锚固，钢套筒与UHPC板通过预埋件连接牢固，预埋件附近未出现UHPC开裂；其余21个连接件未见明显变形[图14(b)]。



（a）角部连接件　　（b）中间连接件

图14 GFRP连接件

Fig. 14 GFRP conector

3 有限元分析

3.1 有限元模型

采用ANSYS软件建模分析，由于结构设计大都基于线弹性内力分析结果，因此，材料本构关系均采用线弹性，未考虑钢材屈服后、UHPC开裂后GFRP连接件的材料非线性。UHPC立方体抗压强度取103.5 MPa，弹性模量取40×10^3 MPa，按Shell 63单元划分，位置在UHPC板形心高度处；钢龙骨按Beam 4单元划分，位置在密肋梁的形心高度处；GFRP连接件弹性模量取55.0×10^3 MPa，按Beam 4单元划分，GFRP连接件锚入套筒部分按刚域考虑，钢套筒按Beam 4单元划分，忽略填充的挤塑聚苯板（XPS），几何尺寸参数见1.1节。4个支承点采用铰支座约束，只约束竖向位移，墙板中心对称点约束水平向位移和绕竖直轴的转动。为了与试验对比，不考虑下层纤维水泥板，复合墙板单元划分见图15。

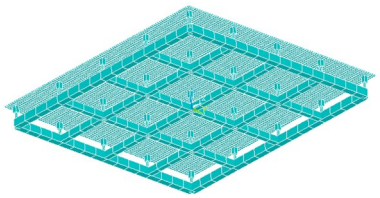


图15 钢龙骨复合墙板单元划分

Fig. 15 Meshing of the composite wallboard

北方寒冷地区及严寒地区使用该外墙板时，风荷载标准值w_k一般不大于1.5 kN/m^2，考虑结构自重后总均布荷载q_{k0}取2.0 kN/m^2，墙板竖向变形见图16。可见，墙板最大挠度为4.401 mm，仅为跨度的1/780。

3.2 GFRP连接件刚度对整体性的影响

通过改变有限元模型中GFRP弹性模量来改变GFRP连接件刚度，模拟分析得到连接件不同刚度下墙板跨中挠度f、边梁弯矩M_b及轴力N_b、内梁弯矩

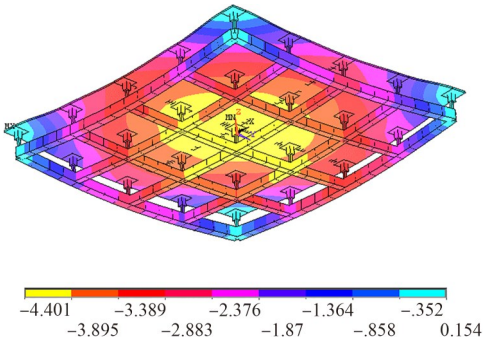


图 16　复合墙板竖向变形　mm

Fig. 16　Vertical deformation of the composite wallboard

M_n及轴力N_n、连接件x向剪力值V_x及y向剪力值V_y等力学量值，形成表 5。以 GFRP 实际刚度为基准，连接件不同刚度下的力学量与实际刚度下力学量比值为纵坐标，GFRP 刚度比K为横坐标，将表 5 的数值绘制在图 17 中。从表 5 和图 17 可以看出：

1）提高连接件刚度，可以增加 UHPC 面板与钢龙骨的共同作用，提高墙板抗弯刚度，减小跨中挠度值f，减小钢龙骨边梁的跨中弯矩M_b和内梁跨中弯矩M_n，增加钢龙骨边梁的跨中轴力N_b和内梁跨中轴力N_n，增加连接件水平剪力V_x和V_y。

表 5　GFRP 连接件刚度对墙板整体受力的影响

Table 5　Effects of GFRP connector stiffness on the global mechanical behaviorof the wallboard

GFRP 刚度比 K	f/mm	M_b/（kN·m）	N_b/kN	M_n/（kN·m）	N_n/kN	V_x/kN	V_y/kN
0.001	6.58	2.67	0.011	1.830	0.010	0.007	0.006
0.01	6.67	2.67	0.086	1.840	0.076	0.055	0.046
0.1	6.17	2.47	0.714	1.690	0.615	0.430	0.369
1.0	4.40	1.88	2.880	1.210	2.480	1.560	1.430
10	2.97	1.40	4.740	0.825	3.920	2.490	2.340
100	1.54	1.24	7.350	0.534	4.950	3.880	3.690
1000	0.76	1.26	9.380	0.553	5.260	5.120	4.990
10000	0.64	1.29	9.790	0.561	5.250	5.540	5.420

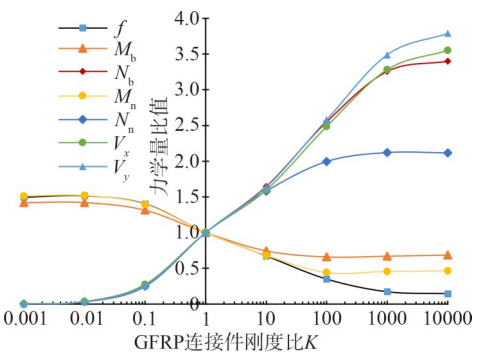


图 17　力学量比值−GFRP 连接件刚度比K曲线

Fig. 17　Mechanical quantity ratio-GFRP connector stiffness ratio curves

2）当连接件刚度降低到 1/1000 时，上层 UHPC 板与钢龙骨几乎不再存在共同作用，连接件承受的剪力、钢龙骨梁轴力都趋于零，跨中挠度、钢龙骨梁弯矩趋于稳定值。

3）当连接件刚度增加到 1000 倍时，上层 UHPC 与钢龙骨共同作用效果显著，跨中挠度、钢龙骨弯矩和轴力、连接件剪力等力学量数值趋于稳定值。

4）采用的 GFRP 连接件实际刚度对复合墙板的整体性具有显著的影响。实际刚度下计算跨中挠度为 4.40 mm，边龙骨跨中弯矩为 1.88 kN·m；刚度减小到 1/1000 时跨中挠度为 6.58 mm，边龙骨跨中弯矩为 2.67 kN·m，因此，考虑共同作用后刚度增加 33%，钢龙骨跨中弯矩减小 30%，UHPC 板与钢龙骨的共同作用效应明显。

3.3　有限元计算与试验数据的对比

1）复合墙板整体刚度。

有限元采用线弹性本构关系，荷载−挠度曲线为直线，选取 GFRP 刚度比为 1、0.1 和 10 三种情况，并与试验曲线进行比较（图 18）。可以看出，GFRP 刚度比为 1 时，复合墙板的弹性刚度为 0.46 kN/m^2·mm^{-1}，试验曲线的初始刚度为 0.55 kN/m^2·mm^{-1}，比有限元计算刚度大 19%，主要原因是试验板填充了 XPS 板，XPS 板限制了 GFRP 连接件的侧向变形，提高了整体刚度；GFRP 刚度比为 0.1 时，复合墙板的弹性刚度为 0.32 kN/m^2·mm^{-1}；GFRP 刚度比为 10 时，复合墙板的弹性刚度为 0.67 kN/m^2·mm^{-1}，可见 GFRP 连接件刚度对复合墙板抗弯刚度影响明显。

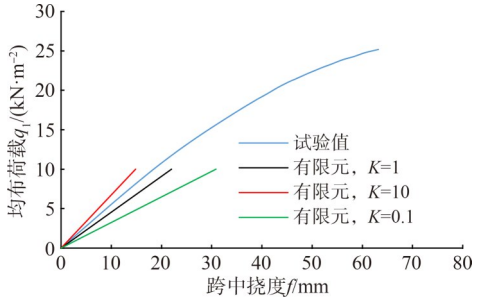


图 18　GFRP 刚度对复合墙板初始刚度影响

Fig. 18　Effects of GFRP stiffness on the initial stiffness of the composite wallboard

2）钢龙骨的承载力。

不考虑连接件刚度对整体性的影响时，边龙骨跨中弯矩为 2.67 kN·m；考虑连接件刚度影响后，跨中弯矩为 1.88 kN·m，弯矩减小 30%。边龙骨：截面面积A_{0b}=1696 mm^2，截面模量W_{0b}=0.0605×10^6 mm^3；

内龙骨：截面面积 A_{0n}=1536 mm^2，截面模量 W_{0n}=0.0515×10^6 mm^3。

根据表5边龙骨和内龙骨在GFRP实际刚度比为1.0时内力值，计算出钢龙骨下翼缘应力值。

边龙骨拉应力：

$$\sigma_{sb}=\frac{M_b}{W_{0b}}+\frac{N_b}{A_{0b}}=32.8\ \text{MPa} \quad (1)$$

内龙骨拉应力：

$$\sigma_{sn}=\frac{M_n}{W_{0n}}+\frac{N_n}{A_{0n}}=25.1\ \text{MPa} \quad (2)$$

由此计算边龙骨下缘达到屈服强度 σ_p=278 MPa时的荷载为：

$$q_k=\frac{\sigma_p}{\sigma_{sb}}\cdot q_{k0}=\frac{278}{32.8}\times 2.0=17.0\ \text{kN/m}^2 \quad (3)$$

试验得到边龙骨达到屈服应变1350×10^{-6}时 q_1=14.0 kN/m^2，对应的总均布荷载为：

$$q_k=q_0+q_1=1.93+14.0=15.9\ \text{kN/m}^2 \quad (4)$$

式(4)和(3)比较，试验结果与有限元计算结果吻合很好。

3）GFRP连接件受力。

所受剪力最大的连接件是位于4个角部的连接件，面荷载为2 kN/m^{2}时，有限元计算剪力为：长向 V_x=1.56 kN，短向 V_y=1.43 kN。对于“十”字形截面连接件，考虑中间顺着剪力方向的矩形截面承担该方向的剪力，因此，长向（x向）剪应力为：

$$\tau=1.5\times\frac{V_x}{A_x}=1.5\times\frac{1560}{6\times 26}=15.0\ \text{MPa} \quad (5)$$

GFRP连接件剪切强度为 τ_u=59 MPa，对应的均布荷载按线性计算约为7.8 kN/m^2，完全可以满足墙板正常受力要求。试验完成后拆除填充的XPS板，发现角部GFRP连接件有一定的侧向剪切变形不能恢复（图14），说明已经发生剪切破坏，与有限元计算结果吻合。

4）UHPC板应力分布。

UHPC板厚度为20 mm，强度为UC100，抗拉强度标准值不低于12 MPa，在GFRP连接件顶部有连接钢板局部加强，有限元计算时考虑了加强的影响，UHPC表面荷载 q=2 kN/m^2，整个墙板未加强部位的UHPC板顶面最大主拉应力见图19，图20为中间区格UHPC板顶面最大主拉应力分布。UHPC板最大拉应力发生在4个角部GFRP连接件处，最大拉应力为12.555 MPa（图19），达到了UHPC抗拉强度值，试验中UHPC板也是在4个角部最先发现开裂。中间区格最大拉应力为4.21 MPa（图20），正常使用阶段风荷载下不会开裂。

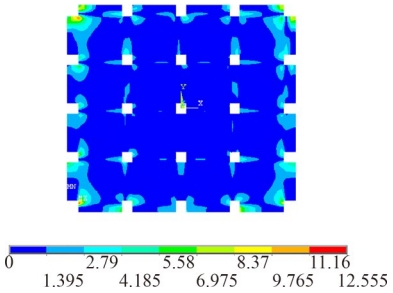


图19 UHPC板顶面最大拉应力分布 MPa

Fig. 19 Maximum tensile stress distribution on the top surface of the UHPC panel

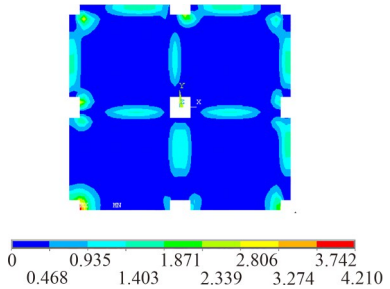


图20 UHPC板中间区格顶面最大拉应力分布 MPa

Fig. 20 Maximum tensile stress distribution on the top surface of the UHPC panel's middle grid area

由于有限元计算中没有考虑UHPC板的塑性发展，因此，在连接件附近应力集中较为严重。而实际受力中，墙板GFRP连接件附近的应力集中会由于塑性重分布而减小，应力远小于应力集中值。

4 结 论

利用反力架和4个千斤顶同步加载，均匀分配到64个均布点，实现了复合墙板平面外的近似均布加载，完成了UHPC-钢龙骨复合板四点支承受弯试验，并进行了有限元模拟，可得如下结论：

1）由GFRP连接件将UHPC面板和钢龙骨连接形成的复合墙板整体性较强，试验墙板弹性刚度约为0.55 kN/m^2·mm^{-1}，有限元计算弹性刚度约为0.46 kN/m^2·mm^{-1}，试验刚度比有限元计算刚度高19%。试验抗弯刚度高是由于填充的XPS保温板限制了GFRP连接件侧向变形，提高了UHPC和钢龙骨之间的连接刚度。

2）依据试验荷载-挠度曲线，可将复合墙板加载载过程分为三个阶段：均布荷载 q_1<10 kN/m^{2}时，基本为线弹性阶段，荷载-挠度曲线基本为直线；均布荷载 q_1=12.0~20.0 kN/m^{2}时，荷载-挠度切线斜率逐渐减

小，切线刚度由初始值 0.55 kN/m^2·mm^{-1}逐渐降低到 0.30 kN/m^2·mm^{-1}；均布荷载 q_1=20.0~22.7 kN/m^{2}时，荷载-挠度切线斜率明显减小，由 0.30 kN/m^2·mm^{-1}迅速减小到 0.16 kN/m^2·mm^{-1}。

3）荷载 q_1 达到 25.0 kN/m^{2}时，由于支座不能继续加载而停止试验，跨中挠度达到 62 mm，约为长跨的 1/57；UHPC 板裂缝主要集中在四周边缘的跨中以及支座附近的反弯点，裂缝宽度一般不大于 0.2 mm；轻钢龙骨发生部分屈服，屈服区域主要集中在钢龙骨的跨中位置，其中，边龙骨跨中最先发生屈服；角部 GFRP 连接件发生不可恢复剪切变形，但是连接件与灌浆套筒连接牢固，套筒与轻钢龙骨和 UHPC 板连接牢固。

4）有限元分析可知，连接件刚度逐渐减小时，UHPC 板与密肋的整体效应逐渐减小，当刚度减小到实际刚度的 1/1000 时，复合墙板整体性基本可以忽略；当连接件刚度逐渐增大时，UHPC 板与钢龙骨的整体效应增强，当刚度增大到实际刚度的 1000 倍时，整体效应达到稳定值。

5）由 GFRP 连接件断桥连接的 UHPC-钢龙骨复合墙板整体性好，刚度大，承载力高，质量可以控制在 150 kg/m^2，适用于超低能耗建筑中装配式框架结构的外挂墙板。

6）通过有限元研究了 GFRP 连接件刚度对复合墙板整体性的影响，UHPC 板厚度、钢龙骨截面变化、连接件布置间距等都会影响复合墙板整体性，仍需要进一步研究。

参　考　文　献

[1] “十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划[J]. 建筑监督检测与造价，2022，15(2)：1-9.

[2] 王月栋，张泽宇，郭剑云，等. 钢结构建筑轻质环保围护体系产业化关键技术与产品应用研究[J]. 建筑钢结构进展，2021，23(10)：75-92.

[3] 郝际平，孙晓岭，薛强，等. 绿色装配式钢结构建筑体系研究与应用[J]. 工程力学，2017，34(1)：1-13.

[4] 尚仁杰，寅志强. 钢框架-聚苯颗粒混凝土灌注墙抗侧力试验研究[J]. 钢结构(中英文)，2019，34(7)：7-11.

[5] 陆均，王文胜，蒋怡青，等. 基于钢结构建筑的装配式外立面整合性围护系统[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2025，53(6)：873-877.

[6] 刘方宁，吕梁胜，林建华，等. 超高性能混凝土外挂墙板及其性能研究综述[J]. 材料导报，2023，37(增刊 1)：216-232.

[7] 周袁凯，王晶秋，刘建飞，等. UHPC 夹心保温外挂墙板不锈钢连接件拉拔试验研究[J/OL]. 工业建筑，2025[2025-08-13]. https:// link. cnki. net/urlid/ 11. 2068. tu. 20250813. 1506. 004.

[8] 胡贤忠，杨雨舒，吴凤英，等. 轻型 UHPC 肋板的正截面抗裂性能[J/OL]. 工业建筑，2025[2025-04-08]. https://link. cnki. net/urlid/11. 2068. TU. 2025 0408. 1455. 008.

[9] QIU M, SHAO X, WILLE K, et al. Experimental investigation on flexural behavior of reinforced ultra high performance concrete low-profile T beams[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2020, 14:1-20.

[10] 任重，袁宇清，陈阳. 装配式钢-薄层 UHPC 组合梁大直径短栓钉连接件抗剪性能有限元分析[J]. 工业建筑，2023，53(11)：180-187.

[11] MA J, LI G T, DENG X F, et al. Seismic behavior of ultra-high performance concrete columns with GFRP bars under different loading directions [J]. Engineering Structures, 2023, 289: 116334.

[12] 刘霞，汪昕，杨谭，等. FRP 拉结件增强预制混凝土夹芯外挂墙板抗弯性能研究[J]. 建筑结构，2025，55(6)：45-52.

[13] 薛伟辰，付凯，秦珩. 预制夹芯保温墙体 FRP 连接件抗拉强度加速老化试验研究[J]. 建筑材料学报，2014，17(3)：420-424.

[14] 杨雨诗，安东琦，倪卓凡，等. 四角点支承四边自由矩形薄板屈曲问题的新解析解[J]. 计算力学学报，2020，37(5)：517-523.

[15] 丁然，张亚朋，武维宏，等. 超高性能混凝土华夫板受力性能试验研究与数值模拟[J]. 建筑结构学报，2024，45(8)：93-107.

[16] 尚仁杰，杨潇，寅志强，等. 基于试验的轻质围护墙板承载力设计值确定方法[J]. 工业建筑，2019，49(12)：166-170.