



新型保温结构一体化免拆模外墙体系构建及其连接件节点力学性能研究

齐凯¹, 徐玉峰², 卢旦³, 杨博^{1,4}, 朱翔宇⁵

(1. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江华临建设集团有限公司, 杭州 311100;
3. 华东建筑集团股份有限公司, 上海 200002; 4. 浙江建设职业技术学院建筑工程学院, 杭州 311231;
5. 中交浚浦建筑科技(上海)有限公司, 上海 200002)

摘要: 为提高建筑外墙保温层的力学性能并确保其与主体结构的协同工作能力, 基于保温结构一体化理念研发了新型免拆模外墙体系。在该体系中, 保温层兼作中间混凝土墙体的浇筑模板而无需后续拆除处理, 且在浇筑过程中与连接件共同形成无空腔一体化结构。通过连接件的尾盘受拉试验以及两种免拆模板中连接件的拉拔试验和直剪试验, 研究在浇筑混凝土墙体过程中连接件节点的力学性能; 采用 Abaqus 软件对免拆模板进行数值模拟, 对比两种免拆模板试件的破坏形态、荷载-位移曲线、抗拉拔承载力、抗剪承载力。结果表明: 在拉拔试验和局部直剪试验中, 连接件均未发生变形; 复合板的拉拔承载力与直剪承载力分别为 1.50 kN 与 1.93 kN, 较热固板分别提升 305% 与 2044%。有限元模拟结果与试验数据一致, 表明试验结果有效。研究结果证实该体系能有效提高保温层的力学性能, 简化施工流程。该研究可为该新型免拆模外墙体系的优化设计和工程应用提供理论支撑。

关键词: 保温结构一体化; 免拆模板; 建筑外墙; 反向拉拔试验; 正向直剪试验; 数值模拟

中图分类号: TU501

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2025)09-0676-12

引文格式: 齐凯, 徐玉峰, 卢旦, 等. 新型保温结构一体化免拆模外墙体系构建及其连接件节点力学性能研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2025, 53(5): 676-687.

Reference Format: QI Kai, XU Yufeng, LU Dan, et al. Construction of a new non-demoulding exterior wall system based on the integrated insulation-structure concept and study on the mechanical properties of its connecting nodes[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(5): 676-687.

Construction of a new non-demoulding exterior wall system based on the integrated insulation-structure concept and study on the mechanical properties of its connecting nodes

QI Kai¹, XU Yufeng², LU Dan³, YANG Bo^{1,4}, ZHU Xiangyu⁵

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Hualin Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 311100, China; 3. Architecture Group PLC, Shanghai 200002, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China; 5. CCCC Junpu Architecture Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: To improve the mechanical performance of building exterior wall insulation layers and ensure their collaborative working capacity with the main structure, a new non-demoulding exterior wall system was developed based on the integrated insulation-structure concept. In this system, the insulation layer serves as the formwork for casting the intermediate concrete wall without subsequent removal treatment, and together with connectors during the casting process, forms a cavity-free integrated

收稿日期: 2025-01-14 网络出版日期: 2025-04-29

基金项目: 浙江省自然科学基金重点项目(LZ23A020008)

作者简介: 齐凯(1999—), 男, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 主要从事装配式混凝土结构方面的研究。

通信作者: 杨博, E-mail: youngbo@zstu.edu.cn

structure. Through the end-plate tensile test of connectors and the pull-out tests and direct shear tests of connectors in two types of non-demoulding formwork, the article studied the mechanical performance of connector nodes during the casting process of concrete walls, adopted Abaqus software to conduct finite element simulation on non-demoulding formwork and compared the failure modes, load-displacement curves, pull-out bearing capacities, and shear bearing capacities of the two types of non-demoulding formwork specimens. The results indicate that in the pull-out tests and partial direct shear tests, the connectors did not undergo deformation; the pull-out bearing capacity and direct shear bearing capacity of the composite board were 1.50 kN and 1.93 kN, respectively, showing increases of 305% and 2044% compared with thermosetting composite polystyrene foam insulation board (TEPS). The finite element simulation results are consistent with experimental data, indicating the experimental results are valid. The research results confirm that this system can effectively improve the mechanical performance of the insulation layer and simplify construction processes. This study can provide theoretical support for the optimized design and engineering application of this new non-demoulding exterior wall system.

Key words: integrated insulation-structure; non-demoulding formwork; building exterior wall; reverse pull-out test; direct shear test; numerical simulation

0 引 言

近年来,中国提出了“碳达峰、碳中和”目标,积极推广应用装配式建筑及绿色建材已经成为建筑业实现该目标的重要举措^[1]。《2023 中国建筑与城市基础设施碳排放研究报告》显示,2021 年全国房屋建筑全过程能耗总量已占全国能源消费的 36.3%^[2];作为建筑物的关键组成部分,建筑外墙的建造工艺革新直接影响施工效率与资源能源节约。如何通过应用新技术、新材料创新施工方法,在提升效率的同时减少建材浪费和能源消耗,已成为建筑业亟待解决的重要课题^[3]。另外,一般民用建筑物的设计使用年限为 50 年,而建筑外墙外保温系统为 25 年,经过长时间的使用,传统建筑外墙的保温层容易出现开裂、空鼓以及脱落等现象^[4],这不仅会严重影响建筑物的正常使用,甚至会出现脱落而砸伤人或车等安全隐患^[5]。在传统的模板工程中,通常要在混凝土浇筑完成并且凝固之后才能拆除模板(拆模);即便如此,拆模之后混凝土表面往往还存在不平整的情况,需要对混凝土表面进行额外处理,增加了现场施工的工作量^[6]。为了解决上述问题,免拆模外墙体系应运而生。

自 20 世纪 60 年代开始,国内外学者就开始对免拆模外墙体系开展了大量研究。Richard 等^[7]设计了一种 FRP 抗剪连接件,并通过试验研究了其抗剪性能,发现连接件作为夹心保温墙板中的重要构件,需要足够的强度来保证内、外墙体之间的协同工作。Huang 等^[8]以截面尺寸差异化的十字形玻璃纤维增强聚合物连接件为研究对象,对其装配式夹

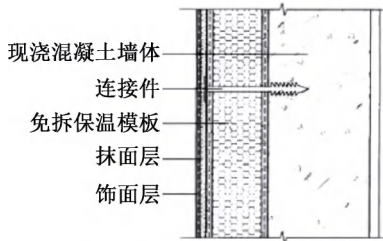
芯保温墙板结构开展系统性试验,通过抗拔承载力试验评价来试件的核心力学性能参数,确定优化后的 GFRP 连接件在基体锚固性能与抗拔力学性能方面均表现优异。Franzoni 等^[9]开发了一种新型大尺寸保温复合板,对其物理力学性能和耐久性等进行了评估,发现该复合板具有优异的性能。彭月飞等^[10]研发了一种用于提升建筑外墙保温系统锚固性能的旋锁式膨胀连接锚栓,并研究了该锚栓在混凝土、烧结砖等实心及空心墙体中的力学性能,发现其在 5 类墙体材料中的最大抗拉承载力可达 1.45 kN。公心怡等^[11]设计了一种由镀锌金属钉和带圆盘的尼龙膨胀套管组成的锚栓,该锚栓的抗拉试验和疲劳试验结果表明,当锚固深度为 85 mm 时, A3.5 和 A5.0 蒸压加气混凝土砌体的抗拉承载力标准值均为最大值,分别为 0.714、1.086 kN。张瑞^[12]设计了并制作了敲击式锚栓和旋入式锚栓,设计了 5 种锚固深度,并分别研究了两种锚栓在蒸压加气混凝土实心砌块内的抗拉承载力标准值,发现这 2 种锚栓的抗拉承载力均在锚固深度为 85 mm 时达到最大,分别为 0.56、0.16 kN。郝雨杭等^[13]设计了一种锚固深度为 40 mm 的棒状 FRP 连接件,抗拔和抗剪试验结果表明,改善连接件的构造可以有效提高其抗拔和抗剪性能。赵学斐等^[14]研究了免拆复合保温模板工程应用存在的问题,发现在传统的免拆模外墙体系施工过程中,背楞安装颇为繁琐,需要耗费大量的人力与时间进行精准定位、固定;而在拆除阶段,还会产生大量的建筑垃圾。

综上所述,在传统的免拆模外墙体系中,连接件仅嵌入混凝土墙体一定深度的做法,并不能保证墙

体的稳定性,且有被拔出的风险;同时,免拆模板也需要足够的抗拉拔性能和抗剪性能,才能避免因强度不足而发生破坏。因此,设计一种新型保温结构一体化外墙体系,既能够提供结构支撑和保温功能,又能简化施工流程并提高施工效率,还能解决保温层易开裂、脱落等问题,对目前的保温外墙工程具有重要的实际意义。

1 新型保温结构一体化免拆模外墙体系构建

在传统的免拆模外墙体系中,连接件通常只嵌入混凝土墙体一定深度来确保结构的稳定性^[13]。传统免拆复合保温模板墙体系统构造示意图如图1



(a) 外墙体系构造示意图

(a)所示,横竖向背楞施工图如图1(b)所示。为了进一步增强模板在浇筑混凝土过程中的稳定性,保证施工面的平整度,同时避免连接件在浇筑混凝土的过程中因锚固强度不足而被拔出^[14],往往需要在模板的支撑点处和连接件位置处额外安装横向和竖向的背楞。这种安装过程不仅增加了施工人员的操作难度,而且拆卸和更换过程中会产生废弃物,建筑垃圾大量增加。另外,在现有的免拆模外墙体系中,外侧预制板仅采用保温板,这些保温材料虽然可以满足保温性能的要求,但因其强度低,在施工及使用过程中极易出现连接件内陷或保温板破坏等现象^[14]。

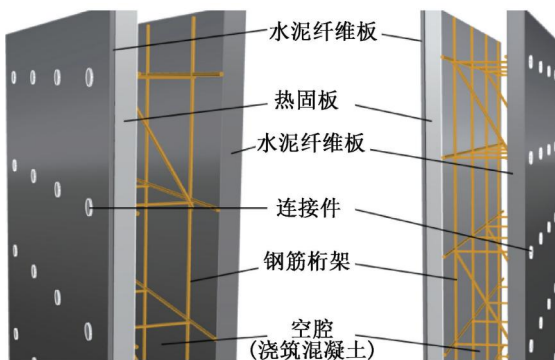


(b) 外墙横竖向背楞施工图

图1 传统免拆模外墙构造图及背楞施工图

本研究提出了一种新型保温结构一体化免拆模外墙体系,该体系构造示意图如图2(a)所示,施工图如图2(b)所示。该体系由免拆模板、连接件和钢筋桁架组成。其中,免拆模板由水泥纤维板和热固板复合而成,构成墙体的保温层,并通过连接件与基层墙体连接成一个整体,一次性浇筑,共

同受力。这样不仅可以提高保温层的强度,在施工中也无需安装繁琐的背楞,依靠简单的支撑和贯通的连接件就可以完成背楞施工;同时,保温板可以兼作混凝土的浇筑模板而无需拆除,不仅方便现场施工作业,还可以有效减少建筑垃圾的产生。



(a) 外墙体系构造示意图



(b) 外墙体系施工图

图2 新型保温结构一体化免拆模外墙体系构造示意图及施工图

热固板(Thermosetting composite polystyrene foam insulation board, TEPS),也称为热固复合聚苯不燃保温板或匀质板。热固板具有良好的隔热性能,具有均匀细致的闭孔结构,与聚苯颗粒混合后导热系数低,绝热性能与聚氨酯、挤塑聚苯乙烯相当。水泥纤维板也称水泥压力板,具有防火防潮、高强度、隔音等特点;天然植物纤维因其独特的增强特性

被广泛应用于水泥基复合材料改良。由参考文献^[15]可知,植物纤维能有效改善材料的力学性能,同时保持基体的密实度。因此,本研究选用来源广泛、可持续性突出的麦秸纤维作为增强相,通过预加工获得粒径 ≤ 2 mm的纤维颗粒,按照水泥质量2.0%的掺量设计,采用干混-湿拌工艺制备纤维增强水泥基体。

热固板和水泥纤维板的材料属性数据由厂家提供,如表 1 和表 2 所示。将热固板和水泥纤维板复合使用,可以增强保温层强度,提升隔热保温效果,提高结构稳定性和耐久性。

表 1 热固板材料属性

检测项目	检测结果
干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.16
抗压强度/MPa	0.21
垂直于板面方向的抗拉强度/kPa	113
软化系数	0.84
导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0.045
体积吸水率/%	5
干燥收缩值(浸水 24 h)/($\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$)	2.7
抗冻性(D_{15})质量损失率/%	3
抗冻性(D_{15})抗压强度损失率/%	16
燃烧性能等级	A2

表 2 水泥纤维板材料属性

检测项目	检测结果
表观密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.36
体积吸水率/%	29.60
导热系数/($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	0.24
湿涨率/%	0.20
燃烧性能等级	A1
不透水性	24 h 后板的底面未出现潮湿痕迹和水滴
抗折强度(饱水强度一平均值)/MPa	8.30
抗折强度(饱水强度单块一最低值)/MPa	7.40

在本研究提出的新型保温结构一体化免拆模外墙体系中,连接件贯通两侧的复合板和基层墙体,组成了新型保温结构一体化的免拆模外墙。这样做可以提高连接件的抗拉拔强度,有效避免了连接件在浇筑混凝土时被拔出;同时,在施工中也无需安装繁琐的背楞,仅靠简单的支撑和贯通的连接件就可以完成背楞的工作。

2 连接件的尾盘受拉试验

2.1 试验设计与加载方案

连接件的破坏形式包括连接件尾盘断裂、尾盘与杆件连接处破坏、锚固段破坏,其中连接件尾盘断裂是目前免拆模外墙体系中最容易出现的破坏形式^[16]。为了研究连接件尾盘的抗拉拔强度,确保在浇筑混凝土时连接件不会因尾盘断裂而失效,本研究对 3 个连接件试件开展了尾盘受拉试验,3 个试件的照片如图 3 所示。3 个试件均为塑料 T 型圆盘

和金属杆件组合的形式,T 型圆盘采用尼龙材质,金属杆件采用奥氏体不锈钢。其中,外侧圆盘直径为 40 mm,厚度为 4 mm;内侧圆盘直径为 16 mm,厚度为 30 mm;杆件直径为 6 mm,总长度为 170 mm,两端通过螺纹与 T 型圆盘相连接。

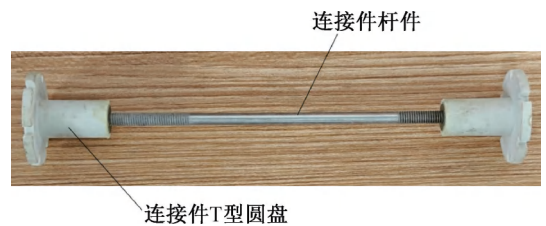


图 3 连接件试件照片

本测试在浙江理工大学材料力学实验室进行,依据《外墙保温用锚栓》(JG/T 366—2012)对 3 个试件进行连接件的尾盘受拉试验,测试装置与试验机连接照片见图 4,力、位移量测设备的精度及误差应符合现行国家标准《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)有关规定。试验开始前,先将连接件尾盘放置在上部夹具上,并紧密贴合;然后,下部夹具夹持并固定在连接件杆件的尾端,将其与拉伸试验机连接。在试验过程中,上部夹具完全固定,下部夹具对连接件匀速施加沿杆件方向的拉力,拉伸速率设定为 5 mm/min,分别记录 3 个试件连接件杆底端位移 5 mm 时的荷载值,以此作为试件的受拉试验值。

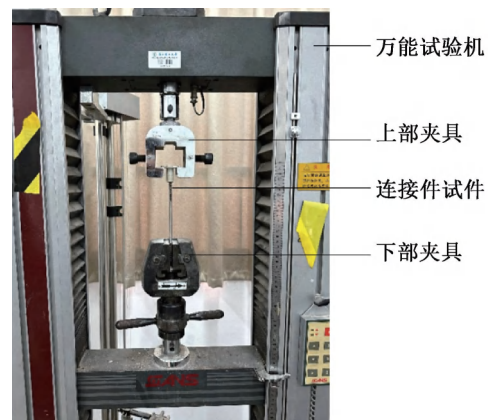


图 4 尾盘受拉试验测试装置与试验机连接照片

2.2 试验现象与结果分析

连接件尾盘受拉照片如图 5 所示。在连接件尾盘受拉过程中,连接件尾盘仅在拉力反方向发生弯曲,但在连接件圆盘、杆件、连接处均未破坏。当位移施加至 5 mm 处时,结束试验。最终试验结果见表 3 所示。由表 3 可知,连接件的尾盘受拉平均值为 8.40 kN。



图5 连接件尾盘受拉照片

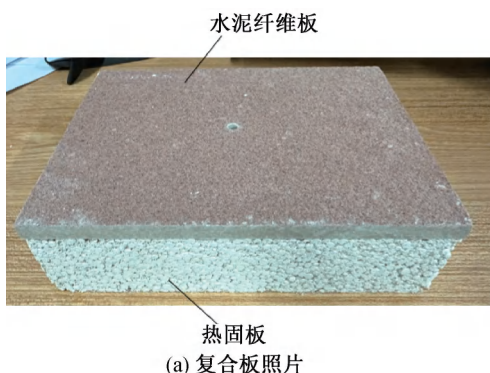
表3 连接件的尾盘受拉试验结果

试件编号	尾盘受拉试验值/kN	尾盘受拉平均值/kN
试件 1	8.42	8.40
试件 2	8.32	
试件 3	8.45	

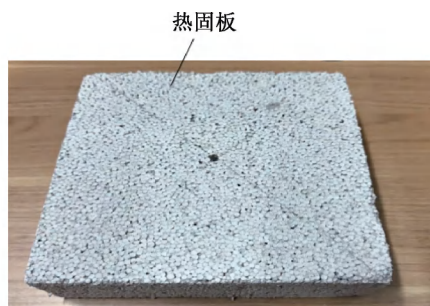
3 免拆模板中连接件的反向拉拔试验

3.1 试验设计与加载方案

为了研究免拆模板在混凝土浇筑过程中涨模力对连接件的影响,需要对免拆模板中的连接件进行反向拉拔试验。本研究设计了两组共6个免拆模板试件,两组试件的照片如图6所示。第1组免拆模板试件模拟新型免拆模外墙体系,在热固板外侧复



(a) 复合板照片



(b) 热固板照片

图6 两种免拆模板试件照片

3.2 试验现象与结果分析

热固板在受拉试验中的受拉特征照片分别如图8(a)和图8(b)所示,复合板在受拉试验中的受拉特征照片如图8(c)所示。

在热固板的受拉试验中,连接件圆盘在受力过程中逐渐陷入热固板内,最终热固板与连接件圆盘接触部分发生局部破坏。而在复合板的受拉试验中,当施加的荷载达到峰值荷载,约为2.7 kN

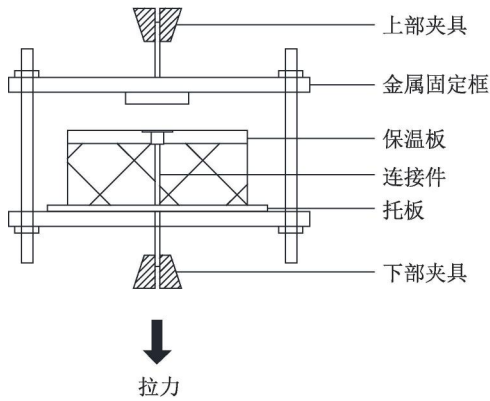
合水泥纤维板(以下简称“复合板”),具体编号为 A_1 、 A_2 、 A_3 ,每件试件的尺寸统一为 $200\text{ mm}\times 140\text{ mm}\times 55\text{ mm}$,其中水泥纤维板的厚度为 10 mm ,而热固板的厚度则为 45 mm 。第2组免拆模板试件模拟传统免拆模外墙体系,免拆模板仅使用热固板,编号为 B_1 、 B_2 、 B_3 ,每件试件的尺寸统一为 $200\text{ mm}\times 140\text{ mm}\times 55\text{ mm}$ 。

依据《外墙外保温工程技术标准》(JGJ 144—2019)和《预制保温墙体用纤维增强塑料连接件》(JG/T 561—2019),对两组试件进行了连接件的反向拉拔试验。首先,将试件放置在托板上,随后在试件的上表面放置金属固定框,并使用螺栓进行固定,确保保温板的中心位置与露出螺杆的连接件精确对齐,且连接件的尾盘与保温板的上表面紧密贴合。然后,使用连接件锚杆夹具夹持并固定连接件杆件的尾端,将其与拉伸试验机相连,试验加载示意图、测试装置与试验机连接方式见图7。在试验过程中,下部夹具对连接件匀速施加沿杆件方向的拉力,拉伸速率控制在 5 mm/min ,记录连接件杆底端位移 10 mm 处的荷载值,以此作为试件的承载力试验值。为了确保试验数据的准确性和可靠性,试验中使用的力和位移测量设备的精度及其误差均严格遵循现行国家标准《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)的相关规定。

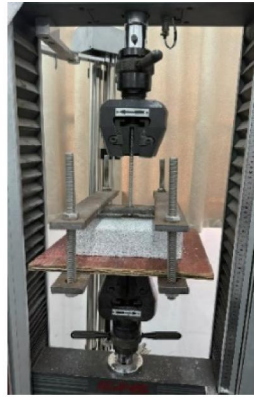
时,水泥纤维板层在跨中处出现了裂缝,同时水泥纤维板层与热固板层的四角开始出现脱离现象,并伴随热固板被压碎的声音。随着荷载继续下降至 2 kN ,水泥纤维板层与热固板层的四角完全脱离。在位移达到 10 mm 时,试验结束。此时,与热固板不同的是,在复合板受拉过程中,连接件圆盘与水泥纤维板接触部分并未出现任何破坏。因此,在热固板外侧复合板,可以有效避免连接件因

免拆模板强度不足而内陷的情况。图 9(a)和图 9(b)分别为复合板和热固板在反向拉拔试验过程中的荷载-位移曲线。由图 9(b)可知, B_3 曲线和其

他 2 条曲线相比, 抗拉拔能力较强, 这可能是由于试验样本材料材芯密实度更高, 使得 B_3 试件表现出更高的峰值荷载。



(a) 试验加载示意图



(b) 热固板照片



(c) 复合板照片

图 7 反向拉拔试验加载示意图和测试装置与试验机连接照片



(a) 拆除固定装置后热固板受拉特征照片

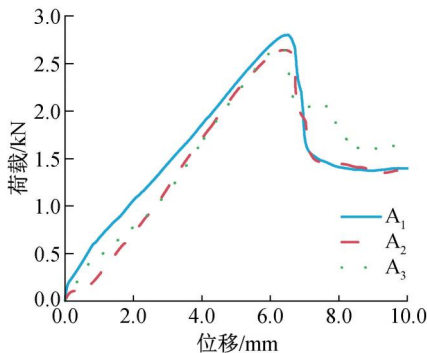


(b) 拆除连接件后热固板受拉特征照片

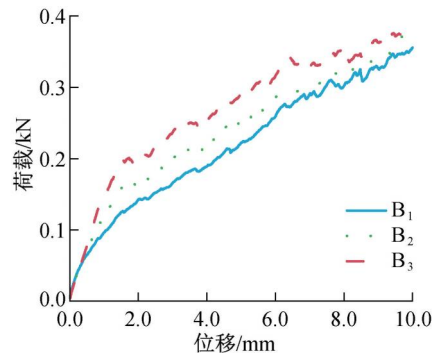


(c) 复合板受拉特征照片

图 8 两种免拆模板试件的受拉特征照片



(a) 复合板试件



(b) 热固板试件

图 9 免拆模板中连接件反向拉拔试验过程中的荷载-位移曲线

上述试验结果见表4所示,根据上述试验结果,在传统免拆模外墙体系中,热固板抗拉拔强度低,其反向拉拔承载力的平均值仅为0.37 kN。在本研究提出的模板体系中,水泥纤维板中的天然植物纤维可以有效提高水泥板的抗拉拔性能,进而使得复合板的反向拉拔承载力平均值提升至1.50 kN,增幅达305%。这一提升效果不仅有效地增强了免拆模板的抗拉性能,还提高了免拆模板与连接件之间的材料利用率,在确保结构稳定性的同时,优化了材料的使用效率。

表4 保温板中连接件的反向拉拔试验结果

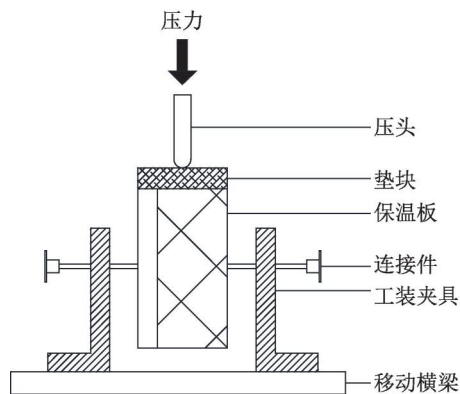
免拆模板类型	试验编号	反向拉拔试验值/kN	反向拉拔平均值/kN
复合板	A ₁	1.40	1.50
	A ₂	1.44	
	A ₃	1.66	
热固板	B ₁	0.36	0.37
	B ₂	0.38	
	B ₃	0.38	

连接件的尾盘受拉承载力平均值为8.40 kN,而复合板的抗拉拔承载力平均值为1.50 kN,因此在该模板体系中,连接件不会先于复合板发生破坏。连接件尾盘和杆件在复合板中的拉拔和局部直剪试验均未出现明显变形,表明其可替代背楞为免拆模外墙体系提供稳定性。

4 免拆模板中连接件的局部正向直剪试验

4.1 试验设计与加载方案

为了研究混凝土浇筑成型后,连接件节点在承



(a) 试验加载示意图



(b) 热固板照片



(c) 复合板照片

图10 局部正向直剪试验加载示意图和测试装置与试验机连接照片

4.2 试验现象与结果分析

试件的破坏形态分别如图11和图12所示,其中图11为热固板的受剪特征照片,图12为复合板

受墙体自重荷载时的受力性能,本研究开展了连接件的局部正向直剪试验。该试验设计了两组共6个试件,试件由免拆模板和连接件组成。两组免拆模板试件模拟新型免拆模外墙体系,采用复合板,具体编号为A₄、A₅、A₆,每件试件的尺寸统一为200 mm×140 mm×55 mm,其中水泥纤维板和热固板的厚度分别为10 mm和45 mm。第2组免拆模板试件模拟传统免拆模外墙体系,免拆模板仅使用热固板,编号为B₄、B₅、B₆,每件试件的尺寸统一为200 mm×140 mm×55 mm。

依据《外墙外保温工程技术标准》(JGJ 144—2019)和《预制保温墙体用纤维增强塑料连接件》(JG/T 561—2019)对两组试件进行连接件的局部正向直剪试验,试验加载示意图、测试装置与试验机连接照片见图10。试验过程中,连接件的两端水平固定在工装夹具的两端,工装夹具固定在试验机的移动横梁上。压头与试验机的上部相连,并且完全固定。在压头和试件接触位置增加一块钢垫块和木板,使压力可以均匀地传递给试件。连接件从免拆模板中间穿越,其长度超过免拆模板的厚度,以确保试验的有效性。同时,保留足够的空间以避免试件在试验过程中与工装夹具发生接触。在试验过程中,对试件施加竖直向下的压力,压缩速率控制在1 mm/min,记录板顶位移达到2.5 mm时的荷载值,以此作为试件的承载力试验值。为了确保试验数据的准确性和可靠性,试验中使用的力和位移测量设备的精度及其误差均严格遵循现行国家标准《混凝土结构试验方法标准》(GB/T—50152)的相关规定。

的受剪特征照片。在热固板受剪试验中,热固板沿着受剪方向破坏,即板中心孔洞沿着轴向被挤压破坏,而连接件杆件自身强度高,未达到其破坏强度,

因此其杆件并未发生弯折与断裂。在复合板受剪试验中,随着加载的进行,水泥纤维板侧未出现变形,而热固板侧沿受剪方向破坏,即板中心孔洞沿着轴向发生破坏,且仅热固板侧出现破坏,压头板出现倾斜,剪力作用方向发生改变,终止试验。

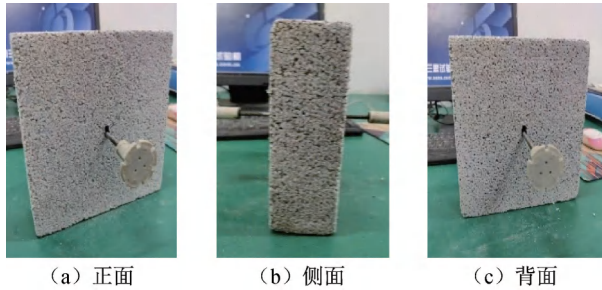


图 11 热固板受剪特征照片

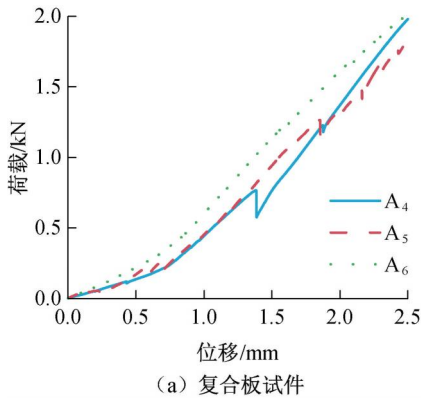


图 13 免拆模板中连接件局部正向直剪试验过程中的荷载-位移曲线

上述试验结果如表 5 所示,由表 5 可知,在传统的免拆模外墙体系中,热固板的局部正向直剪承载力的平均值仅为 0.09 kN。在本研究提出的模板体系中,水泥纤维板的存在使得复合板的局部正向直剪承载力平均值显著提升至 1.93 kN,增幅达 2044%,这一显著提升有效地增强了免拆模板的抗剪性能。

表 5 保温板中连接件的局部正向直剪试验结果

免拆模板类型	试验编号	局部正向直剪试验值/kN	局部正向直剪平均值/kN
复合板	A ₄	1.98	1.93
	A ₅	1.81	
	A ₆	2.01	
热固板	B ₄	0.09	0.09
	B ₅	0.08	
	B ₆	0.09	

5 有限元数值模拟

5.1 数值模拟与材料属性介绍

本研究采用 Abaqus 有限元软件对复合板进行数值模拟,通过与试验结果对比分析,验证试验结果

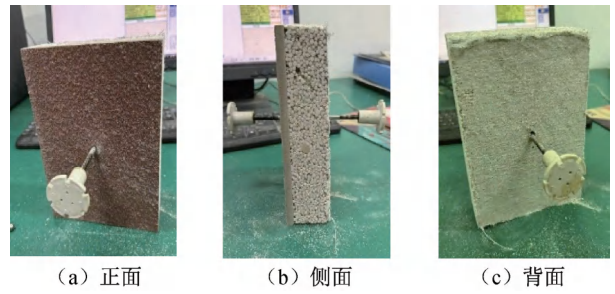
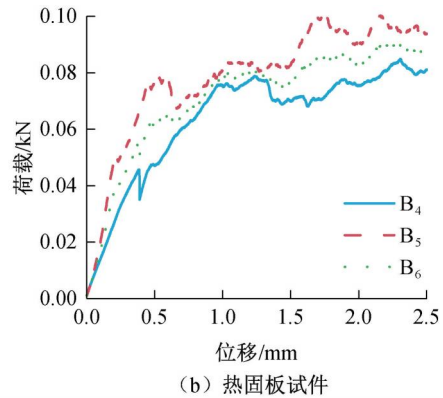


图 12 复合板受剪特征照片

图 13(a)和图 13(b)分别为复合板和热固板在局部正向直剪试验过程中的荷载-位移曲线。根据复合板的荷载-位移曲线可知,A₄ 曲线在 1.3 mm 处、A₅ 曲线在 1.8 mm 处都有明显下降段。这是因为热固板内部发生了局部破坏,导致复合板整体的抗剪能力下降。



的有效性;在此基础上,开展相关参数的影响分析。

利用 Abaqus 有限元软件建立复合板的有限元模型,其中水泥纤维板、热固板、连接件圆盘、连接件杆件、垫块以及压头均采用实体单元 C3D8R 模拟。表 6 为有限元模型中各组成部分的材料参数,其中水泥纤维板、热固板、连接件的材料参数由厂家提供。垫块在拉拔试验中作为固定装置中的一部分,需要其托起整块保温板,因此,需要保证其不会破坏,故采用弹性模型;在直剪试验中需要将压力完整、均匀地传递给保温板,因此,需要保证其刚度足够大,故采用弹性模型。压头属于加载装置,也需保证其在试验中不会被破坏。垫块和压头均取铁块

表 6 有限元模型中各组成部分的材料参数

材料名称	弹性模量/MPa	泊松比
水泥纤维板	1.90×10^4	0.26
热固板	20.00	0.10
连接件圆盘	2.83×10^3	0.39
连接件杆件	2.06×10^5	0.30
垫块	2.00×10^5	0.30
压头	2.00×10^5	0.30

根据试验现象可知,在反向拉拔试验和局部正向直剪试验中,连接件并未出现变形和破坏,因此连接件采用线性弹性模型;连接件杆件材质为奥氏体不锈钢,采用钢筋双折线模型;水泥纤维板属于水泥基材料,在研究中借鉴混凝土的本构关系^[17],使用Abaqus自带的混凝土损伤塑性模型;热固板是以模塑聚苯乙烯泡沫塑料板(Expandable polystyrene, EPS)为保温基体,通过特殊的处理剂复合制成的板状制品,因此,在进行热固板的有限元模拟时,采用EPS的本构模型。由参考文献[18]可知, EPS材料在单轴压缩条件下应力应变曲线先由弹性阶段发展至弹塑性阶段,后过渡至塑性阶段。为了方便分析,本研究采用简化后的理想弹塑性模型,该模型可用式(1)和式(2)表示:

$$\sigma = E\epsilon, \epsilon < \epsilon_{ep} \quad (1)$$

$$\sigma = f_m, \epsilon \geq \epsilon_{ep} \quad (2)$$

其中: σ 表示材料的压应力,MPa; E 表示材料的弹性模量,MPa; ϵ 表示材料的压缩应变,%; ϵ_{ep} 表示材料应力-应变曲线上弹性范围临界点处的应变值,%; f_m 表示材料的抗压强度,MPa。

5.2 复合板中连接件的反向拉拔数值模拟

5.2.1 模型构建

复合板中连接件的反向拉拔分析有限元模型如图14所示,其中:水泥纤维板的尺寸为200 mm×140 mm×10 mm;热固板的尺寸为200 mm×140 mm×45 mm;连接件的外侧圆盘直径为40 mm,厚度为4 mm;内侧圆盘直径为16 mm,厚度为30 mm;连接件杆件长度为170 mm。

对模型中垫块下部施加完全固定约束,并在连接件杆件尾端设置集合点 RP-2,在 PR-2 处施加 z 轴正方向的位移加载,位移加载幅值为10 mm。

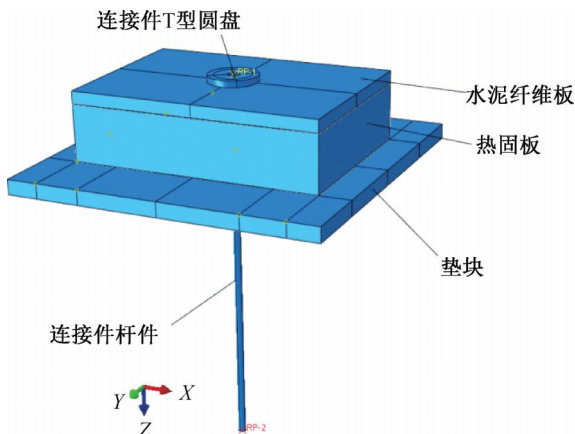


图14 反向拉拔分析的有限元模型

5.2.2 模拟结果与分析

复合板模型的计算结果如图15所示,复合板的受拉特征为水泥纤维板层与热固板层脱开,有限元模拟结果与试验结果一致,且水泥纤维板中心未出现破坏而使连接件内陷。这表明水泥纤维板的存在可以有效地提高复合板的抗拉性能。

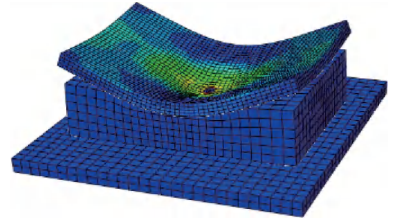


图15 反向拉拔数值模拟计算结果

输出连接件杆件底端集合点 RP-2 位置处的荷载位移曲线,反向拉拔数值模拟的荷载-位移曲线如图16所示,由图可知,当加载至10 mm时,其荷载大小为1.54 kN。模拟结果与试验结果一致,表明该有限元模型能有效模拟复合板的反向拉拔过程。

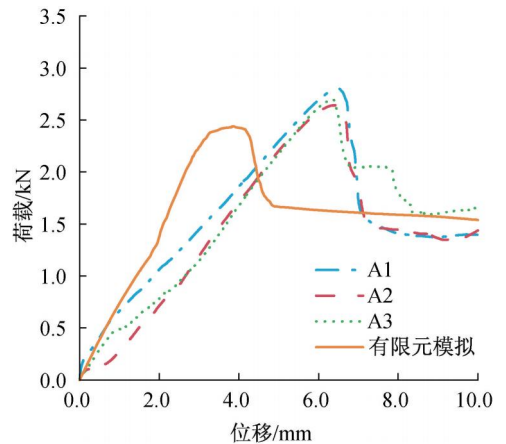


图16 反向拉拔数值模拟的荷载-位移曲线

5.3 复合板中连接件的局部正向直剪数值模拟

5.3.1 模型构建

复合板中连接件的局部正向直剪分析有限元模型图如图17所示,其中:水泥纤维板的尺寸为200 mm×140 mm×10 mm,热固板的尺寸为200 mm×140 mm×45 mm,连接件的杆件长度为170 mm。对模型中连接件两端施加竖直向上的约束,并在压头顶部中心设置集合点 RP-1,在 PR-1 处施加 x 轴负方向的位移加载,位移加载幅值为2.5 mm。

5.3.2 模拟结果与分析

图18为复合板模型的计算结果图,复合板的受剪特征为热固板侧因孔洞受杆件剪力影响而发生变形,这导致垫块发生倾斜。有限元模拟结果与试验结果一致,且水泥纤维板测无变形,表明水泥纤维板的存在可以有效地提高复合板的抗剪性能。

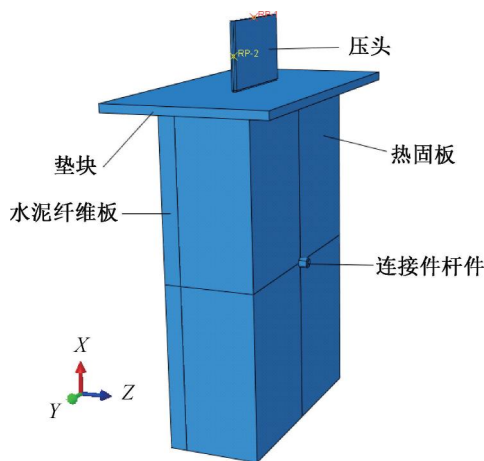


图 17 局部正向直剪分析的有限元模型



图 18 局部正向直剪数值模拟计算结果

输出板顶中心位置处的荷载-位移曲线,局部正向直剪数值模拟的荷载-位移曲线如图 19 所示。从图 19 可知,当加载至 2.5 mm 时,其荷载大小为 1.89 kN,与试验结果一致,表明该有限元模型能有效模拟复合板的局部正向直剪过程。

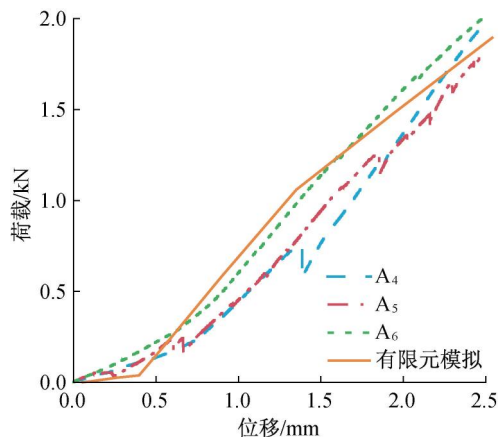


图 19 局部正向直剪数值模拟的荷载-位移曲线

5.4 参数分析

5.4.1 模型参数设计

本研究针对水泥纤维板厚度对复合板抗拉拔性能和抗剪性能的影响进行参数分析。为了确定厚度变化对复合板整体强度和稳定性的影响,通

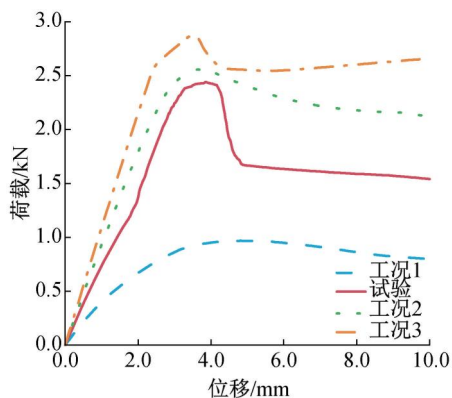
过改变水泥纤维板的厚度设计了 3 个工况,模拟并比较不同厚度下复合板的抗拉拔性能和抗剪性能,试验及工况主要参数如表 7 所示。分析结果将为优化新型保温结构一体化免拆模外墙体系设计提供依据,提升其在实际工程应用中的结构安全性。

表 7 试验及工况主要参数

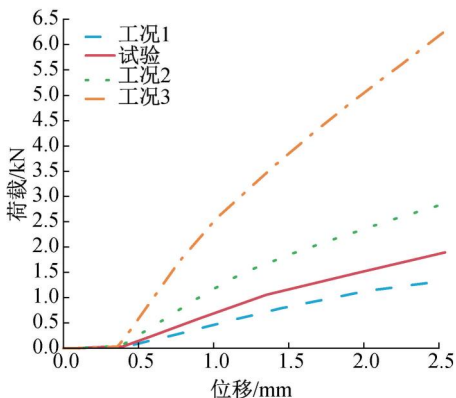
工况类型	水泥纤维板厚度/mm	热固板厚度/mm	复合板总厚度/mm	尺寸/mm
试验	10	45		
工况 1	5	50	55	200×140
工况 2	15	40		
工况 3	20	35		

5.4.2 计算结果及分析

通过复合板中的连接件反向拉拔模拟以及局部正向直剪模拟,计算得出的荷载-位移曲线如图 20 所示。其中,取连接件杆底端位移 10 mm 时的荷载值为模型的抗拉拔承载力,复合板顶位移 2.5 mm 时的荷载值则作为模型的抗剪承载力。



(a) 反向拉拔模拟所得荷载-位移曲线



(b) 局部正向直剪模拟所得荷载-位移曲线

图 20 复合板有限元模拟结果

不同工况下复合板中的连接件反向拉拔试验和局部正向直剪试验的模拟结果见表 8。根据模拟结果可知,以 5 mm 厚的水泥纤维板为基础,每增加

5 mm 厚度,复合板的抗拉拔性能分别提升了 92.5%、37.6%、25.4%,抗剪性能分别提升了 39.0%、60.8%、111.5%。这些数据表明,随着水泥纤维板厚度的增加,复合板的抗拉拔性能和抗剪性能得到了显著增强。综合考虑力学性能和经济性,得出以下结论:将 20 mm 厚的水泥纤维板与 35 mm 厚的热固板复合使用,可以在力学性能上达到最优;而将 10 mm 厚的水泥纤维板与 45 mm 厚的热固板复合使用,则更为经济高效。这为新型保温结构一体化免拆模外墙体系的设计和材料选择提供了科学依据。

表 8 不同工况下试验模拟结果

工况类型	反向拉拔模拟/kN	局部正向直剪模拟/kN
试验	1.54	1.89
工况 1	0.80	1.36
工况 2	2.12	3.04
工况 3	2.66	6.43

6 结 论

本研究以热固板与水泥纤维板复合形成的免拆模板为核心,结合贯通式连接件与钢筋桁架,构建了兼具保温、结构、模板功能的新型保温结构一体化免拆模外墙体系,并对该体系中连接件节点的抗拉拔性能和抗剪性能进行了试验研究和有限元模拟分析,主要结论以下:

a)连接件尾盘受拉承载力平均值为 8.40 kN,显著高于复合板的抗拉拔承载力 1.50 kN,表明连接件在体系工作中保持完整,未发生变形破坏,可替代背楞提供结构稳定性。

b)复合板反向拉拔承载力较热固板提升 305%,复合板中的水泥纤维板有效抑制了连接件内陷,避免了免拆模板的局部破坏。

c)复合板局部正向直剪承载力较热固板提升 2044%,复合板中的水泥纤维板显著增强了界面抗剪能力,且自身未出现损伤。

d)有限元模型能有效地模拟复合板的受拉和受剪过程,且有限元模拟结果与试验结果完全一致。参数分析表明,水泥纤维板的厚度与免拆模板的力学性能呈正相关,在免拆模板厚度一定的情况下,水泥纤维板越厚,其抗拉拔和抗剪性能越强。

本研究将水泥纤维板引入保温结构一体化免拆模外墙体系,在一定程度上解决了传统保温模板强度低、易破坏的技术难题;同时,提出的贯通式连接节点设计与保温板构造优化方法,可以显著提升体

系的结构性能与施工可靠性,有助于推动装配式建筑围护体系向多功能集成化方向发展,实现建筑节能降耗与工业化建造。

参考文献:

- [1] 王晶, 李晓丹, 赵嘉诚, 等. 近 20 年中国建筑节能研究的进程、热点和趋势分析[J]. 建筑科学, 2024, 40(2): 179-188.
- [2] 王滢. 基于公共管理的角度探索城市建筑节能[J]. 建筑结构, 2023, 53(7): 159.
- [3] 徐涛. 绿色建筑背景下装配式建筑的发展与应用[J]. 建材发展导向, 2025, 23(3): 133-135.
- [4] 马少春, 谷宇, 鲍鹏. 一种新型结构与保温一体化复合墙板节点试验[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(2): 396-403.
- [5] 钱小龙, 原瑞增, 王渊. 河南省建筑保温与结构一体化技术研究与应用[J]. 河南科技, 2017, (9): 118-121.
- [6] 王朋, 尤学辉, 史庆轩, 等. 混凝土免拆模板组合构件力学性能研究综述[J]. 混凝土, 2022 (9): 161-168.
- [7] Richard O, West R, Reilly A, et al. Composite behaviour of fibre-reinforced concrete sandwich panels with FRP shear connectors[J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109475.
- [8] Huang J, Jiang Q, Chong X, et al. Experimental study on precast concrete sandwich panel with cross-shaped GFRP connectors[J]. Magazine of Concrete Research, 2018, 72(3): 1-49.
- [9] Franzoni E, Pigino B, Graziani G, et al. A new prefabricated external thermal insulation composite board with ceramic finishing for buildings retrofitting[J]. Materials and Structures, 2016, 49(4): 1527-1542.
- [10] 彭月飞, 杨晨. 建筑保温用旋锁式膨胀连接锚栓的开发与应用研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(11): 93-97.
- [11] 公心怡, 刁文鹏, 李安起, 等. 建筑外墙外保温系统锚栓变幅疲劳性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(7): 155-162.
- [12] 张瑞. 外墙外保温系统锚栓疲劳性能试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020: 25-36.
- [13] 郝雨杭, 付素娟, 匡田, 等. 预制夹芯保温墙体棒状 FRP 连接件力学性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(3): 7-10.
- [14] 赵学斐, 陈乐琦, 田炜. 免拆复合保温模板工程应用存在的问题及应对策略[C]//2024 年全国工程建设行业施工技术交流论文集(上册). 北京:《施工技术(中英文)》杂志社, 2024: 893-898.
- [15] 姜德民, 徐浩东, 康红龙, 等. 植物纤维增强水泥基复合材料面临的问题及相关改性研究现状[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(2): 387-396.
- [16] 殷珊. 外墙保温装饰一体板在高层建筑外墙上的应用[J]. 城市建筑, 2014(23): 237.
- [17] 宇文秉楠. 装配式型钢骨架结构保温一体化复合墙体抗侧性能研究[D]. 聊城: 聊城大学, 2022: 15-17.
- [18] 刘磊. EPS 夹心墙的保温性能和力学性能研究[D]. 荆州: 长江大学, 2012: 47-48.

团队介绍

杨博教授团队专注于复合材料力学与结构、弹性力学及装配式混凝土结构等方面的研究。在功能梯度复合材料板结构分析方面,基于三维弹性理论提出了三维解析求解方法;在装配式混凝土结构分析方面,提出了装配式混凝土构件和节点的精细化分析方法,研发了系列新型高效的预制部品部件。团队共主持完成国家自然科学基金 4 项,浙江省自然科学基金 5 项(其中重点项目 1 项)。目前已发表论文 100 余篇,其中 SCI 论文 70 篇,EI 论文 15 篇;授权发明专利 12 项,软件著作权 5 部。

杨博教授,2011 年毕业于浙江大学土木系结构工程专业,获博士学位;2015 年 9 月—2016 年 8 月在澳大利亚昆士兰大学访学。他在功能梯度材料板结构及含孔口板结构力学行为的解析解研究、装配式混凝土结构分析等方面做出了多个创新性的研究工作。

(责任编辑:康 锋)