

# 新型UHPC组合肋预应力混凝土叠合板 力学性能试验研究

雷 华<sup>1</sup>, 王 璐<sup>2</sup>, 郭建好<sup>2</sup>, 宫 海<sup>2</sup>, 陈 晨<sup>2</sup>, 易鼎鼎<sup>2</sup>, AUNG Khaing Min<sup>3,4,5,6\*</sup>,  
MYO Thet Khaing<sup>3,7</sup>, 熊石根<sup>4,5,6,8</sup>, 岳 峰<sup>4,5,6,8</sup>

(1. 广州城市职业学院 智慧城建学院, 广州 440111; 2. 南通装配式建筑与智能结构研究院, 江苏 南通 226007;  
3. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084; 4. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;  
5. 上海交通大学 上海市公共建筑和基础设施数字化运维重点实验室, 上海 200240; 6. 上海交通大学  
海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 7. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;  
8. 上海交通大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057)

**摘要:** 文中通过开展静力荷载试验研究, 对比分析了钢管桁架预应力混凝土叠合板(简称PK3板)和两种不同新型超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)组合肋预应力混凝土叠合板(简称TY板)的静力学性能差异。本试验采用逐级加载方案, 对各级加载工况下试件的板底裂缝开展、挠度变形、钢筋桁架应变、板底应变等参数进行系统测试, 并对各类预制板在变形过程中的抗裂能力、荷载-挠度变化趋势、钢筋桁架应变分布等力学响应特征开展了系统性对比分析。试验结果表明: 相较于PK3板, TY板在相同荷载条件下, 不仅裂缝宽度更小, 且扩展速率更缓, 在裂缝控制性能上展现出显著技术优势; 且TY板的挠度也明显小于PK3板的挠度, 表明TY板具有良好的抗弯能力; 对于不同类型的TY板, 发现梯形桁架型的TY板相比于普通钢筋桁架型TY板表现出更优的力学性能。本试验通过对TY板裂缝控制性能与刚度特性的系统验证, 证实其为一种性能优良、适用场景广泛的预制装配式叠合板板材。

**关键词:** 静力荷载试验; 预应力混凝土叠合板; UHPC组合肋; 梯形钢筋桁架; 裂缝宽度; 刚度; 承载力

中图分类号: TU398<sup>+</sup>.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)01-0021-13

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20250516001

## Experimental Study on Mechanical Properties of New UHPC Combined Rib Prestressed Concrete Composite Slabs

LEI Hua<sup>1</sup>, WANG Lu<sup>2</sup>, GUO Jianhao<sup>2</sup>, GONG Hai<sup>2</sup>, CHEN Chen<sup>2</sup>, YI Dingding<sup>2</sup>,  
AUNG Khaing Min<sup>3,4,5,6\*</sup>, MYO Thet Khaing<sup>3,7</sup>, XIONG Shigen<sup>4,5,6,8</sup>, YUE Feng<sup>4,5,6,8</sup>

(1. School of Smart Urban Construction, Guangzhou City Polytechnic, Guangzhou 440111, China; 2. Nantong Research Institute of Assembled Buildings and Intelligent Structures, Nantong 226007, China; 3. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 5. Shanghai Key Laboratory of Digital Maintenance of Buildings and Infrastructure, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 6. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 7. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 8. Shenzhen Research Institute,

收稿日期: 2025-05-16

作者简介:

雷 华(1976—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事智能建造技术、新型建筑材料方面的研究。E-mail: Lyt2006@gcp.edu.cn。

通信作者:

AUNG Khaing Min(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事建筑结构智能设计、结构抗震性能方面的研究。

E-mail: 1922496661@qq.com。

Shanghai Jiao Tong University, Shenzhen 518057, China)

\*Corresponding author: 1922496661@qq.com

**Abstract:** In this paper, static load tests were carried out to comparatively study the differences in the static mechanical properties of a prestressed concrete composite slab with steel-tube truss (PK3 slab) and two different ultra high-performance concrete (UHPC) new combined rib prestressed concrete composite slabs (TY slab). The test was conducted by loading step by step to observe the crack development, deflection deformation, reinforcement truss strain, and strain of the slab bottom under loading conditions at all levels. A systematic comparative analysis was carried out on the crack resistance, load-deflection trends, and reinforcement truss strain conditions of the various prefabricated slabs during the deformation process. The test results show that compared with the PK3 slab, the TY slab has a smaller crack width and slower crack propagation rate under the same load, which shows obvious advantages in crack control. The deflection of the TY slab is also obviously smaller than that of the PK3 slab, which shows good bending capacity. For different types of TY slab, it is found that the trapezoidal truss-type TY slab shows better mechanical properties compared with ordinary steel truss-type TY slab. Through the verification of crack control and stiffness of the TY slab in this experimental study, it is an excellent and ideal prefabricated assembled composite slab.

**Keywords:** static load test; prestressed concrete composite slab; UHPC combined rib; trapezoidal steel truss-type; crack width; stiffness; bearing capacity

随着装配式建筑技术的快速发展,叠合板作为其核心的构件之一,因生产率高、施工便捷、绿色环保等优势,被广泛应用于住宅、办公楼、学校等多类建筑中<sup>[1]</sup>。但当前叠合板在工程应用中仍存在若干突出问题,例如:预应力混凝土叠合板在服役期易产生反拱现象;钢筋桁架叠合板存在厚度大、自重大的问题,服役过程中容易出现开裂;预应力叠合板的板肋制作困难,导致生产率较低,上述问题已逐渐成为制约叠合板技术进一步发展的瓶颈<sup>[2-3]</sup>。

预应力带肋混凝土叠合板(简称PK板)通过在底板中设置预应力筋,以提升预制板的性能。吴方伯等<sup>[4-6]</sup>对预制预应力混凝土矩形肋薄板进行了规格设计与系统研究,重点研究了其极限承载力、刚度和抗裂性能,结果表明:此类薄板的承载力能满足施工阶段要求,可以作为无支撑体系模板。吴方伯等<sup>[7]</sup>通过对叠合板开展了单项模拟静力试验研究,提出了新型叠合板,通过在叠合面引入连锁咬合效应,显著抑制了叠合面界面损伤的累积,大幅提升了叠合层与预制底板之间的协同受力性能。柳旭东等<sup>[8]</sup>研发并试验了一种新型带辅助预应力混凝土叠合板,提出了此类叠合板的结构设计方法。结果表明:该新型叠合板的施工过程符合现行相关规范要求,具有良好的抗弯和抗剪性能,所提出的设计方案能够显著提升其结构承载能力与施工效率。刘香等<sup>[9]</sup>对新型预制带钢筋桁架叠合板开展了研究,结果表明:此新型叠合板表现出良好的抗弯性能,改善了施工过程中结构的整体稳定性。曹霞等<sup>[10]</sup>对UHPC叠合板的受弯性能开展了研究,发现叠合面配置钢筋不仅能有效减小构件间的相对位移,还能显著提升构件卸载后的复位性能,同时大幅改善了板材的受弯性能。

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)<sup>[11-14]</sup>以其超高的抗压强度、卓越的耐久性与优异的抗裂性能,在现代建筑与桥梁工程中得到了广泛应用。UHPC在满足大跨度、轻量化、高承载能力等严苛设计要求的同时,还能够通过减少构件厚度和优化材料用量来实现更高的经济性和施工效率<sup>[15]</sup>。目前,国内外对UHPC叠合板的研究多集中于其基本力学性能和不同构造形式对性能的影响,例如叠合界面构造、钢筋配置形式等。

UHPC组合肋预应力叠合板(简称TY板)是UHPC材料及装配式混凝土叠合板技术的创新应用之一,它结合了UHPC、钢筋桁架及预应力混凝土底板的优点,通过提高构件的整体刚度和抗裂性能,能够在施工过程中有效解决传统叠合板模板支撑多、施工质量难以保证等问题,从而显著提升装配式建筑和桥梁结构的施工效率和质量<sup>[16]</sup>。

此外,TY板通过合理的结构设计,可在实现高承载性能的同时减少钢筋和混凝土用量,符合绿色建筑和可持续发展的理念<sup>[17]</sup>。TY板具有显著施工优势:其侧边无外伸钢筋,采用侧向密拼施工工艺,且可减少叠合板下方支撑数量,有效节约施工措施费。作为一类新型叠合板,已有部分研究表明其具备良好的力学性能与工程应用优势,但针对其结构受力机理的系统性试验验证及优化设计方法研究仍然不足,亟需开展深入的研究<sup>[18]</sup>。本文基于试验研究,探讨UHPC组合肋预应力叠合板在不同荷载条件下的力学性能表现,重点分析其抗裂性能、刚度、抗弯承载力等关键参数。研究成果旨在为TY板的设计与应用提供理论依据和实践指导,以期推动该新型构件在土木工程中的广泛应用。

## 1 试验概况

### 1.1 TY板试件制作

TY板属于装配式混凝土叠合板范畴,主要由混凝土底板与UHPC组合肋组成;底板内配置单向预应力钢筋,另一方向设置构造配筋。该类叠合板的关键设计参数如

下:预制底板厚度不小于35 mm,现浇混凝土厚度不小于65 mm,可实现最小楼板厚度110 mm。预制底板的混凝土强度不低于40 MPa。本试验采用的足尺试验原型板,为从预制工厂现场随机抽取的成品板,其制作工艺流程如图1所示。

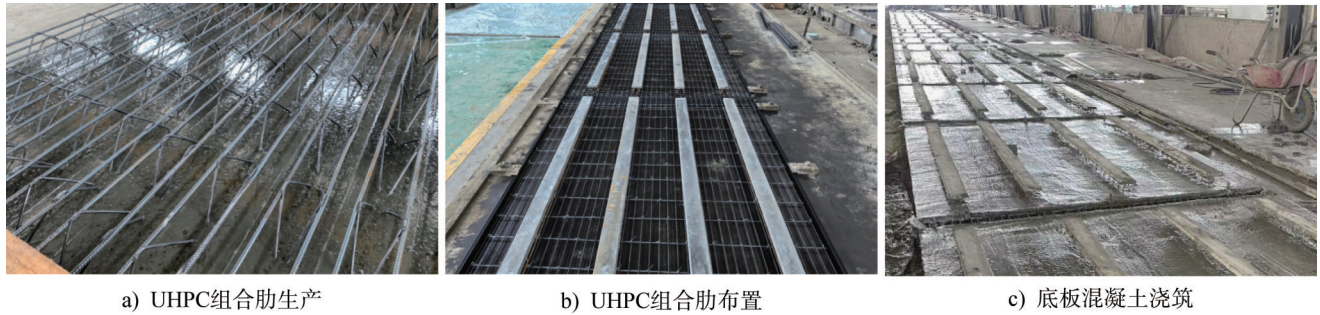


图1 TY预制板生产流程

Fig. 1 Production process of TY prefabricated slab

### 1.2 试件参数与分组

本试验选取两种UHPC组合肋类型的TY板及一块PK3板,共计3块试验板开展力学性能测试(表1)。其中,PK3板(试件PK3)由配置预应力钢丝的预制混凝土底板与钢管桁架构成,钢管内部灌注高强砂浆,其构造示意如图2所示。TY板由配置预应力钢丝的混凝土底板

与UHPC组合肋组成,UHPC组合肋采用UHPC与钢筋桁架一体浇筑成型。3块试验板的混凝土底板统一设置为底板厚度为35 mm,混凝土强度等级为40 MPa。同时,TY板根据UHPC组合肋不同,可分为普通三角钢筋桁架型(试件TY-普,图3)及新型梯形钢筋桁架型(试件TY-梯,图4)。

表1 试件参数

Table 1 Specimen parameters

| 序号 | 试件编号 | 试验板种类 | 组合肋型式   | 支撑形式 | 平面尺寸/mm     | 堆载跨度/m |
|----|------|-------|---------|------|-------------|--------|
| 1  | PK3  | PK3板  | 钢管桁架型   |      |             |        |
| 2  | TY-普 | TY板   | 普通钢筋桁架型 | 免撑   | 4 120×2 060 | 3.5    |
| 3  | TY-梯 | TY板   | 梯形桁架型   |      |             |        |

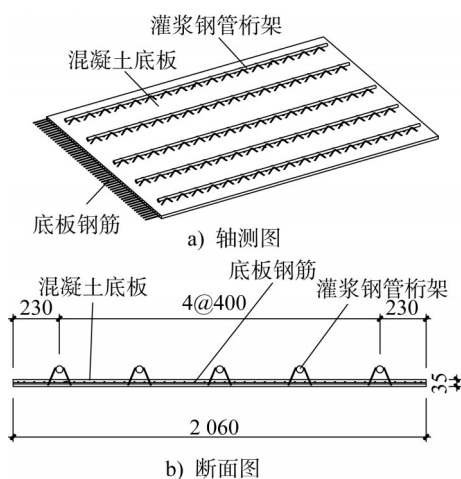


图2 PK3板构造示意(单位:mm)

Fig. 2 Diagram of PK3 slab construction (unit: mm)

新型梯形钢筋桁架组合肋<sup>[19]</sup>作为普通三角钢筋桁架组合肋的迭代优化构造形式,既确保了力学性能的稳定,又显著提升了生产加工与施工应用的便利性。普通三角钢筋桁架组合肋与新型梯形钢筋桁架组合肋示意图如图5所示。

UHPC凭借其优异的材料性能优势,显著提升了所有应用构件的核心力学性能指标。其抗压强度远超普通混凝土(normal concrete, NC)的抗压强度,同时具备更优的抗冲击性能,能够灵活应对施工现场的复杂工况,例如整捆钢筋堆放产生的集中荷载、冲击荷载,以及各类机械工具作业过程中产生的碰撞与压力荷载等。与之相比,普通混凝土肋难以适配工程中此类严苛服役环境的使用。

UHPC相较于普通混凝土具有极高的韧性及优异的

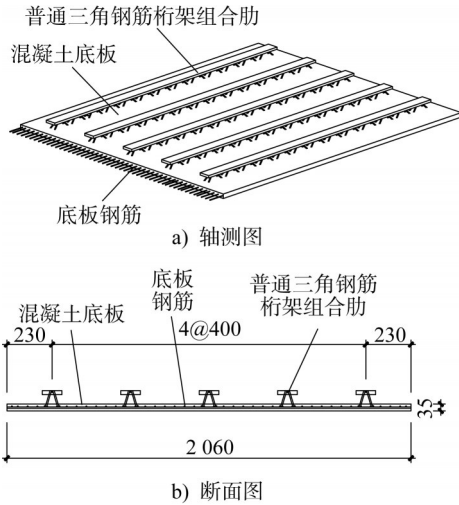


图3 TY板构造示意(普通三角钢筋桁架型)(单位:mm)  
 Fig. 3 Diagram of TY slab construction (ordinary steel truss-type) (unit: mm)

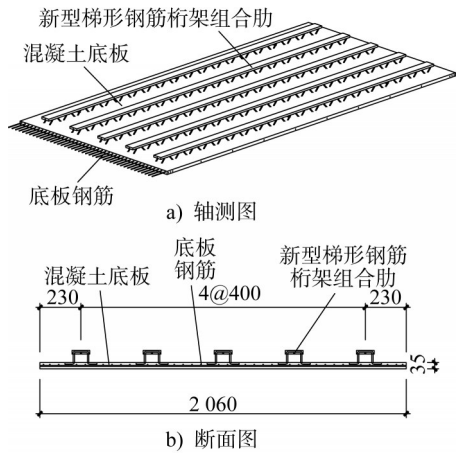
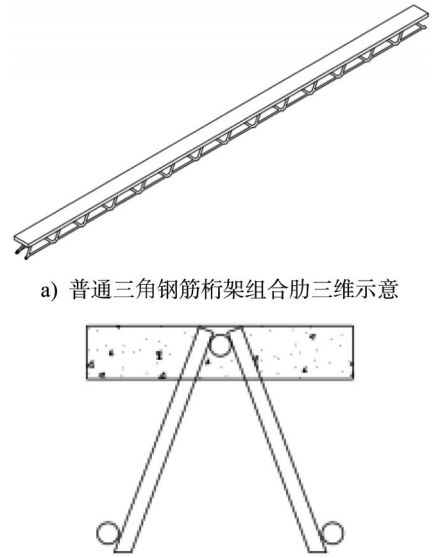


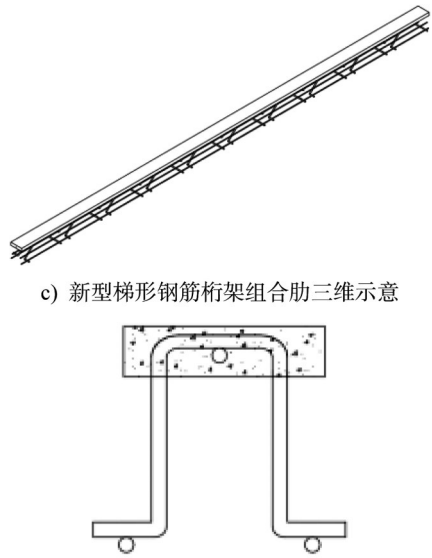
图4 TY板构造示意(新型梯形钢筋桁架型)  
 (单位:mm)

Fig. 4 Diagram of TY slab construction (trapezoidal steel truss-type) (unit: mm)

黏聚性能。这显著增强了UHPC与上弦钢筋之间的界面黏结强度,使得握裹作用更为可靠,从而大幅提升了组合肋的整体协同工作性能与结构整体性。普通混凝土的开裂抗弯强度通常为2.8~4.1 MPa,极限抗弯强度为18~35 MPa,其破坏模式表现出显著的脆性特征,且裂缝扩展速率较快;而UHPC借助纤维的增强效应,其开裂抗弯强度可提升至7.5~15 MPa,极限抗弯强度达22~45 MPa,相较于普通混凝土展现出更优异的承载性能与裂缝控制能力。在抗弯刚度方面,普通C30混凝土的弹性模量约为30 GPa,其在使用阶段刚度衰减较快,且裂缝的发展会显著降低构件承载力;UHPC的弹性模量约为41 GPa,依托其高密实度与纤维阻裂效应,在弹塑性阶段刚度衰减更为平缓。在TY板结构中,混凝土底板与UHPC组合肋协同



a) 普通三角钢筋桁架组合肋三维示意  
 b) 普通三角钢筋桁架组合肋截面示意



c) 新型梯形钢筋桁架组合肋三维示意  
 d) 新型梯形钢筋桁架组合肋截面示意

图5 UHPC组合肋

Fig. 5 UHPC composite rib

工作,UHPC不仅能显著提高结构的抗弯强度,还能有效增强结构的整体抗弯刚度。使用UHPC材料,可在确保组合肋达到设计力学性能要求的前提下,显著减小其截面尺寸,进而有效降低构件自重。UHPC材料的这一优势不仅有助于提升工厂预制生产效率,其较小截面尺寸所带来的空间优势,还能为组合肋下方预留充足的管线敷设与施工操作空间,建筑设备系统的顺利实施提供了保障。

1.3 加载制度

本试验严格遵循《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)<sup>[20]</sup>的规定,采用分级加载方案,通过均布堆载方式模拟楼板施工过程中的受力状态。试验板采用两端简支的支承形式,荷载标准值综合考虑预制板自重、后浇层自重及施工活载,经计算等效为3.75 kN·m<sup>-2</sup>。加载

采用铸铁砝码均布施加,分级逐步加载直至板件发生破坏,试验前通过预加载与卸载清零处理,保障测试数据的可靠性,分级控制加载值如表2所示。每级荷载的持续时

间控制在5~10 min,最后一次加载时间为30 min,荷载的布设点位如图6所示。

表2 分级控制加载值

Table 2 Multi-step control load

| 序号 | 试件编号 | 试验板种类 | 跨度/mm | 正常使用极限状态/<br>(kN·m <sup>-2</sup> ) | 开裂前每级加载/<br>(kN·m <sup>-2</sup> ) | 加载块数/个 |
|----|------|-------|-------|------------------------------------|-----------------------------------|--------|
| 1  | PK3  | PK3板  |       |                                    |                                   |        |
| 2  | TY-普 | TY板   | 3.5   | 3.75                               | 0.375                             | 11     |
| 3  | TY-梯 | TY板   |       |                                    |                                   |        |

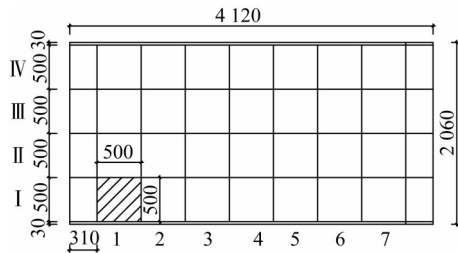


图6 加载单元示意(单位:mm)

Fig. 6 Diagram of loading unit (unit: mm)

1.4 试验布置

为更好地观察试验板底部的位移、应变云分布和裂缝发展行为,试验采用百分表位移计与DIC三维全场位移应变系统同步进行测试。在跨中处及四分点处布置共9个挠度测点和9个应变片,以采集试验板挠度与钢筋桁架应变数据。主要测试仪器如表3所示,试验布置示意如图7与图8所示。

表3 加载设备和仪器

Table 3 Loading equipment and devices

| 序号 | 名称                     | 型号                 | 量程            | 个数/个    |
|----|------------------------|--------------------|---------------|---------|
| 1  | 动态应变测试分析系统             | DH8306             | ±30 000 με    | 1       |
| 2  | 裂缝宽度仪                  | 海创高科HC-CK101       | 0.01~2.00 mm  | 1       |
| 3  | 应变片                    | BFH120-6AA-R1-P300 | 120 Ω(2.0±1%) | 9(每个试件) |
| 4  | 百分表                    | 312-404            | 50 mm         | 9(每个试件) |
| 5  | 非接触式数字散斑三维全场位移应变测量分析系统 | XTDIC8.0           | ±0.01%~1 000% | 1       |



图7 试验设备布置

Fig. 7 Test setups

2 试验结果与破坏特征分析

2.1 裂缝发展模式与分布规律

加载前,测得试件PK3的初始反拱值为3 cm。当加

载至2.25 kN·m<sup>-2</sup>,试件PK3的挠度发生突变,受力状态由线性弹性阶段转入非线性弹塑性阶段,同时应变测点数据亦出现显著波动;此外,于板底I-4区域首次观测到裂缝,表明试件在荷载作用为13.75 kN至16.5 kN区间已进入塑性工作阶段。此后继续加载至19.25 kN以上,试件PK3的挠度增长显著,每级加载的最大位移均增加约10 mm。通过裂缝观测仪观测发现,加载过程中该试件的原有裂缝持续扩展并向周围延伸,同时伴随新裂缝的产生。加载至24.75 kN时,部分百分表位移计达到量程极限,导致无法继续记录试件的真实位移。最终加载至27.5 kN,停止试验,此时试件最大挠度已达48.57 mm,所有百分表位移计均超过量程极限。对板底裂缝的观测结果表明:试件板底处已出现贯穿性裂缝,裂缝宽度约为0.1 mm(图9a))。试件PK3的整体刚度相对较弱,当在

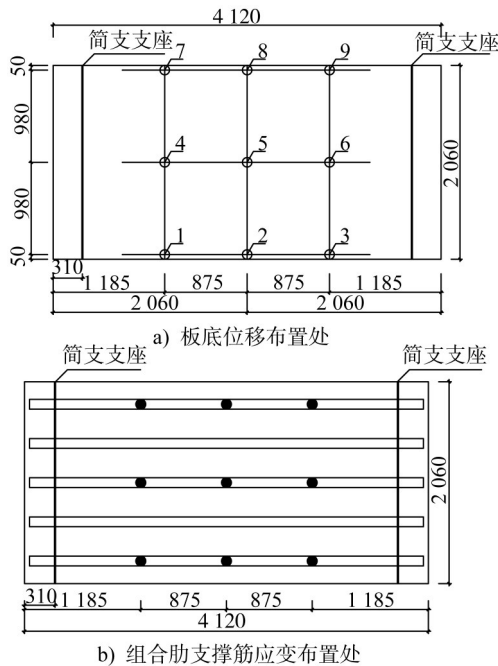
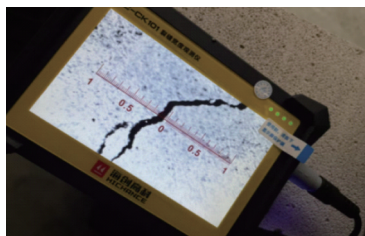


图8 三类板材的位移计和应变片布置(单位:mm)

Fig. 8 Arrangement of displacement meters and strain gauges of 3 types of slabs (unit: mm)

3.5 m 跨度条件下采用标准砝码堆载时,其未能达到预设挠度控制标准,呈现出较大的变形。然而,由于预应力筋布置较为密集,裂缝的开展速率与发展范围受到一定程度的抑制。卸载砝码并对试件进行起吊后观察发现,板底逐渐恢复至反拱状态,部分已开展裂缝出现闭合现象。



a) 试件PK3



b) 试件TY-普

图9 不同试件的裂缝观测图

Fig. 9 Crack observation diagrams of different specimens

采用普通三角钢筋桁架型组合肋设计的试件TY-普,在整个试验过程中表现出良好的刚度保持性能,其变

形响应基本呈线性演化特征。当加载至27.5 kN时,于I-5区首次观察到宽度约0.02 mm的微裂缝,此时最大挠度为15 mm;当加载至30.25 kN时,该裂缝进一步扩展,且在同一区域出现了一条新裂缝;当加载至33 kN时,在II-4区观察到新增了一条宽度约0.10 mm的裂缝,同时在IV-4区出现了一条宽度约0.04 mm的裂缝。试验结束时通过观察发现:试件TY-普的裂缝均分布于板侧跨中部位,裂缝宽度整体较小(图9b)),最大挠度为16.05 mm,且出现在板底跨中位置。综合该试件的最大变形与裂缝观测结果可知,试件TY-普板的刚度性能优于试件PK3的刚度性能,其裂缝与变形均满足规范设计要求,且最大变形值约为试件PK3的33%。

采用新型梯形钢筋桁架设计的试件TY-梯,在整个加载过程中保持了良好的刚度性能,挠度基本呈线性发展。加载至33 kN时,试验加载过程达到预设终点,期间未观察到裂缝的产生。试验结束时,该试件板底跨中位置的最大挠度为11.73 mm。综合上述试件的最大变形及裂缝观测结果表明:试件TY-梯的刚度性能优于试件TY-普的刚度性能,且明显优于试件PK3的刚度性能;其裂缝控制和挠度控制均满足规范要求。刚度对比结果表明,第一组3块预应力试验板的刚度比约为PK3板:TY-普板:TY-梯板=1:3:4。

## 2.2 荷载-挠度响应特性

通过观察图10各试件的荷载-挠度曲线可知,随着荷载的增加,各试件测点的挠度均呈现上升的趋势,尤其是位于试件中间部位的测点2、5、8,其挠度普遍高于位于边缘部位的测点1、3、4、6、7、9的挠度,这表明试件中间部位承受了更大的应力和变形。图10a)中测点5布置于试件跨中位置,依据结构受力特性通常预期为挠度最大值测点,然而图10a)的测试数据表明,该测点的挠度并未达到最大值,这可能是由于在试验测点布置过程中,未充分预留位移计的安装空间,导致当荷载达到22.00 kN、24.75 kN时,位移计已达到其测量极限。测点7未能正常采集数据,这是由于试验中位移计出现了故障。

通过图10a)的荷载-挠度曲线可以看出,荷载从0至13.75 kN时,荷载与挠度的关系呈线性增长趋势,表明在这一阶段试件PK3仍处于弹性范围内,结构展示出良好的刚度和稳定性。加载至16.5 kN后,试件PK3的挠度增长斜率显著增大,表明试件开始进入非线性工作阶段,这可能是由于结构内部开始出现微小的裂纹或塑性变形导致的。从图10b)和c)的挠度变化趋势可知,试件TY-普与TY-梯整体挠度的发展趋势近似为线性关系,表明试件在试验加载的荷载范围内,始终展现出优异的整体刚度保持性能与结构稳定性,且全程仍处于弹性工作阶段。

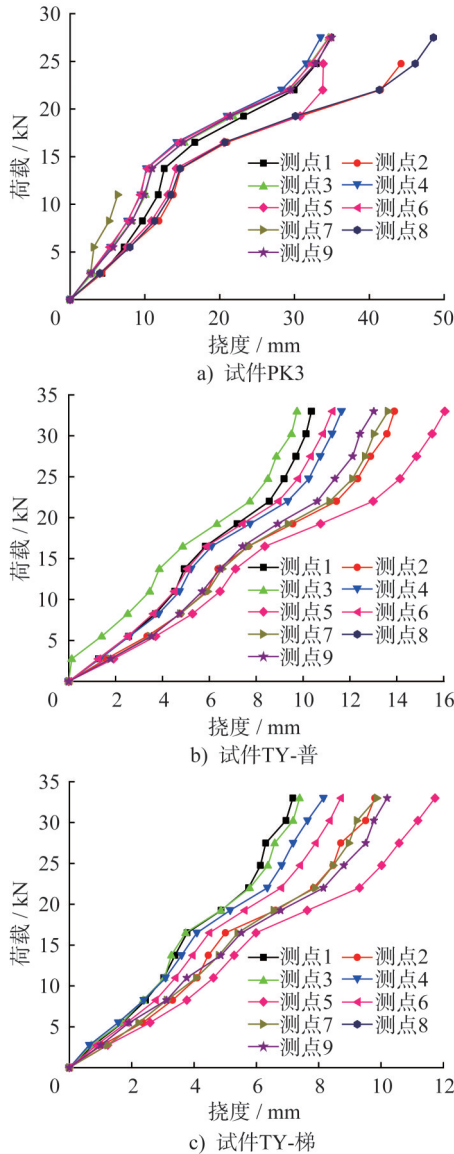


图10 不同试件的荷载-挠度曲线

Fig. 10 Load-deflection curves of different specimens

对各试件的性能比较可以发现,试件PK3的最大挠度为48.57 mm,显著高于试件TY-普和TY-梯的最大挠度,其二者最大挠度分别为16.05 mm、11.73 mm。这一对比突显出试件TY系列的力学性能显著优于试件PK3的力学性能,其中试件TY-梯的性能表现尤为突出。

综上所述,试件TY系列(尤其是试件TY-梯)的设计和材料选择优于传统的试件PK3的相应值,其展现出更高的结构刚度与更小的最大挠度,进而提升了结构的整体承载力和耐久性。因此,在后续相关结构设计中,建议充分考虑上述优势特征,以进一步优化结构设计方案、提升材料利用效率。

对不同试件在测点5和测点6的挠度进行对比分析可知:随着荷载的增加,各试件的挠度呈现出上升趋势。通过观察测点5、测点6的挠度变化可知(图11):当荷载

增至13.75 kN后,试件PK3的挠度增长显著,远大于试件TY系列的挠度值,试件TY系列的挠度值基本维持线性增长。出现此现象是由于试件PK3在加载至13.75 kN后已进入塑性阶段,且出现了微小裂缝,而试件TY-普和TY-梯则仍处于弹性阶段。

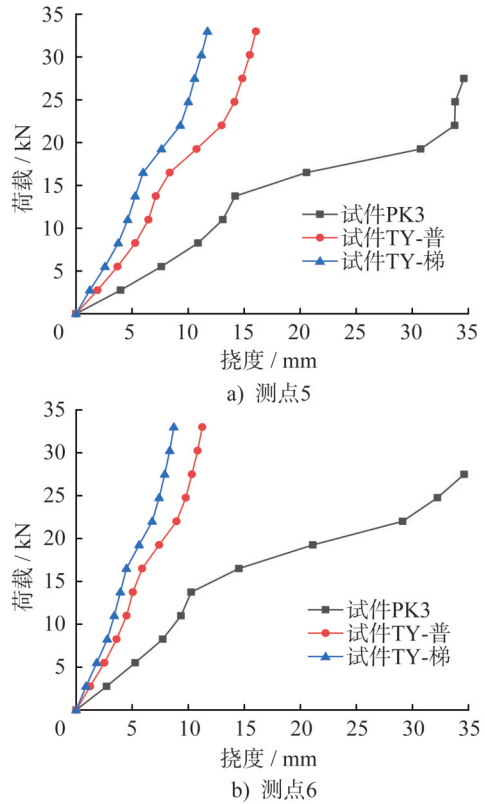


图11 不同试件测点5和6的挠度对比

Fig. 11 Comparison of deflections at measurement points 5 and 6 for different specimens

对DIC应变测试系统的测量结果与百分表位移计测得的不同试件最大挠度进行对比验证,如图12所示。结果表明,试件PK3在加载至19.25 kN时,百分表位移计已达到测量极限,因此导致后续数据出现较大差异,而前几级荷载对应的测试数据最大误差较小;试件TY-普不同加载级的挠度数据整体一致性良好,仅在荷载为5.5~11.0 kN时,DIC测量结果出现较大的波动;试件TY-梯不同加载级的挠度数据整体吻合度良好。总体而言,3个试件的百分表位移计和DIC测量结果均表现出良好的可靠性和一致性。

表4的相对挠度定量分析结果表明,三类试验板材的刚度性能差异得到了明确揭示:TY-梯板以16%低于限值达到最优水平,满足规范限值。其中,TY-普板以14%略高于限值,PK3板以247%显著高于限值,二者均未满足规范限值要求。基于上述分析得出结论:TY-梯板的刚度性能要优于TY-普板和PK3板的刚度性能。

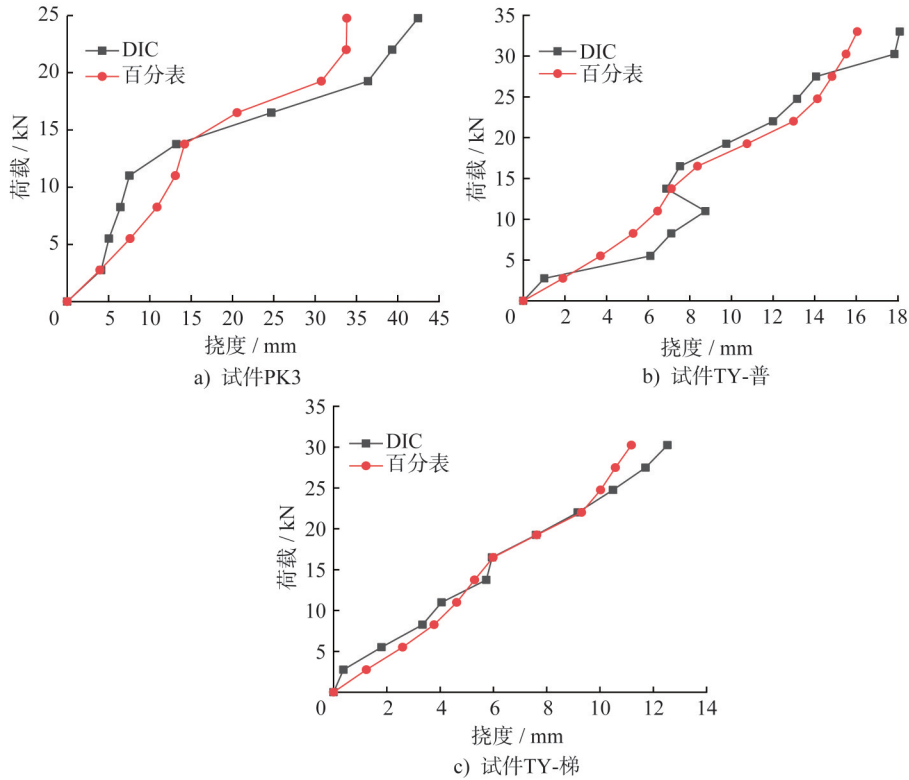


图 12 不同试件利用百分表位移计和 DIC 测试的最大挠度对比验证

Fig. 12 Comparison and verification of maximum deflection of different specimens using dialgauge displacement meter and DIC testing

表 4 三类板材挠度-跨度比与规范限值对比结果

Table 4 Comparison of deflection to span ratios of three slab types with code limits

| 试验板类型 | 跨度 $L/m$ | 挠度 $\delta/mm$ | $\delta/L$ | 规范限值符合性                |
|-------|----------|----------------|------------|------------------------|
| PK3板  |          | 48.57          | 1/72       | 不满足(显著大于限值,大于程度约为247%) |
| TY-普板 | 3.5      | 16.05          | 1/218      | 不满足(略大于限值,大于程度约为14%)   |
| TY-梯板 |          | 11.73          | 1/298      | 满足(小于限值,小于程度约为16%)     |

注:《混凝土结构设计标准》(GB 50010—2010)要求楼盖舒适性挠度限值  $\delta/L \leq 1/250$ 。

### 2.3 钢筋桁架应变演化规律

将试验测得试件在各荷载下的应变进行均值处理,绘制如图 13 所示各试件的荷载-应变曲线。由图可知:随着荷载的增加,各试件钢筋桁架测点的应变普遍呈逐渐增大的趋势。图 13a)、c)中,前三荷载级试件的应变异常偏高,这可能是由于从开始加载时即启动数据采集,导致早期数据可能受初始条件影响而出现异常。理论计算结果预测测点 5 处应变达到最大,而试验数据显示,试件 PK3 和试件 TY-普的应变最大值出现在测点 6,试件 TY-梯的最大应变值分别出现在测点 1、7。该偏差可能源于预应力施加不足或过量,导致结构两端或特定区域产生异常应变。

从图 13 可以看出,试件 PK3、TY-普、TY-梯钢筋桁架的最大应变值分别为  $323.94 \mu\epsilon$ 、 $590.52 \mu\epsilon$ 、 $362.78 \mu\epsilon$ ;

试件 PK3 钢筋桁架的荷载-应变曲线的出现较大波动且峰值也较大,这表明其在某些测点上的应变值显著高于其他两试件的应变值,可能源于结构受力时的不均匀性较大,或材料自身抗裂性能较差。相比之下,试件 TY-梯钢筋桁架的荷载-应变曲线相对平稳,但在荷载达到 19.25 kN 后出现了较高的峰值,这表明尽管试件自身整体性能较优,但在特定条件下可能存在应力集中现象。试件 TY-普钢筋桁架的荷载-应变曲线总体较平缓,展现出较低的应变值和较好的均匀性,表明其整体结构刚度可能更优。试件 PK3 钢筋桁架的荷载-应变增长速率较快,这一现象表明该试件在较低的荷载水平下即趋近于材料的弹性极限。试件 TY-梯和 TY-普表现出较好的弹性特性和较高的极限荷载,尤其是试件 TY-普,其荷载-应变曲线的稳定性和较低的峰值表明了试件整体具

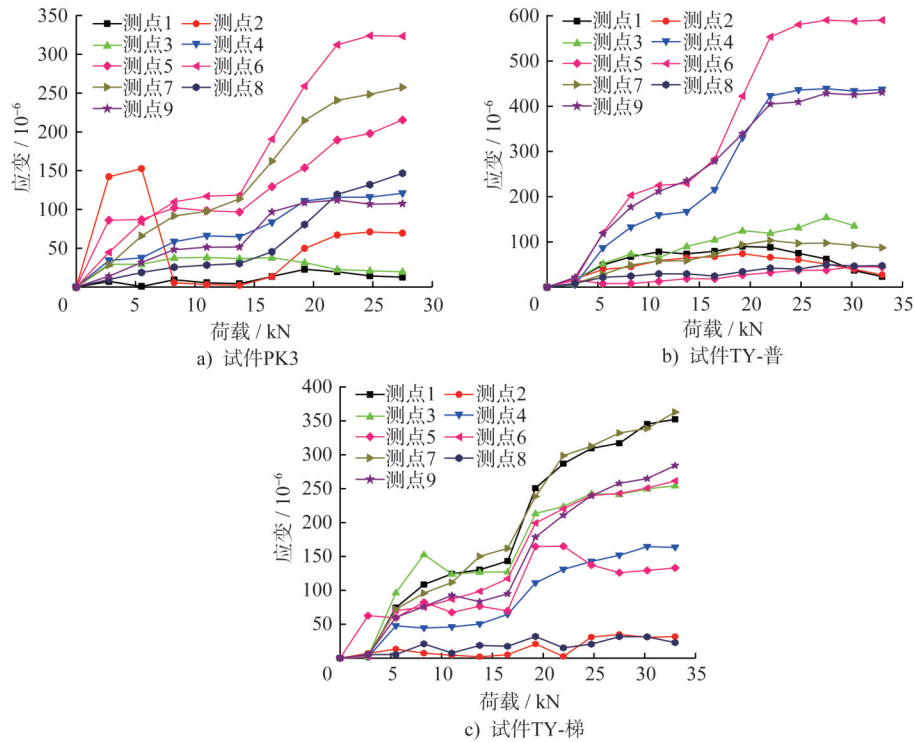


图 13 不同试件钢筋桁架在各加载级别的荷载-应变变化曲线

Fig. 13 Load-strain variation curves of steel truss of different specimens at each loading level

有较高的结构安全性。

由各试件钢筋桁架在测点5的应变对比(图14a)可知,试件PK3的应变普遍高于试件TY系列的应变,而试件TY-普的应变几乎未超过  $50 \mu\epsilon$ 。图14b)揭示了试件PK3测点6的应变高于试件TY-梯测点6的应变,且试件TY-普的应变远超其他两试件的相应值。综上所述,试件TY系列的力学性能整体优于PK3的力学性能。

### 2.4 基于DIC的板底全场应变演化规律

通过DIC测试得到各试件板底的主应变分布云图(图15)。从图中可以看出,从试件PK3、TY-普至试件TY-梯,试件板底的主应变呈逐渐减小趋势,表明试件TY系列的强度与刚度表现更优异。

## 3 叠合板有限元分析

### 3.1 模型与材料本构

为验证试验结果的合理性,本研究基于ABAQUS有限元软件建立三维模型,其几何尺寸及材料参数均与试验保持一致,如图16所示。

### 3.2 荷载与边界条件

本研究采用ABAQUS建立三维有限元模型以复现试验过程中的工况,如图17所示。荷载施加包含两部分:(1)结构自重荷载;(2)试验过程外荷载,按分级增量控制策略逐步施加。边界条件依据实际试验支撑体

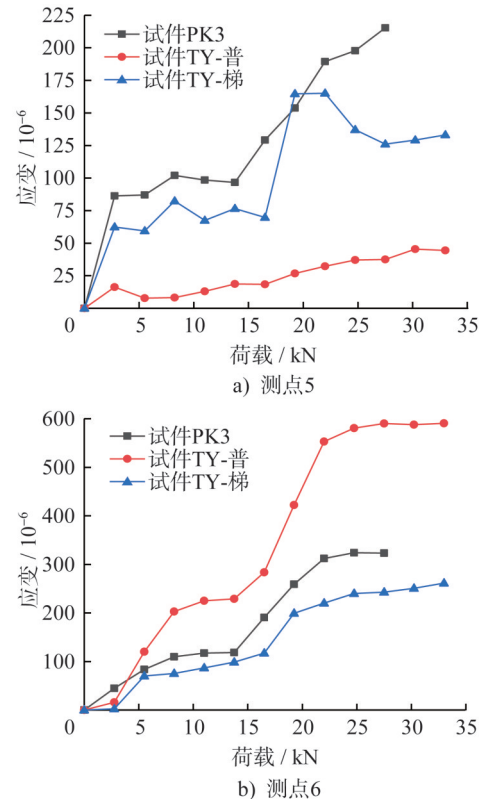


图 14 不同试件钢筋桁架测点5和6在各加载级别的应变对比

Fig. 14 Comparison of strain at measurement points 5 and 6 under different loading levels for steel truss of different specimens

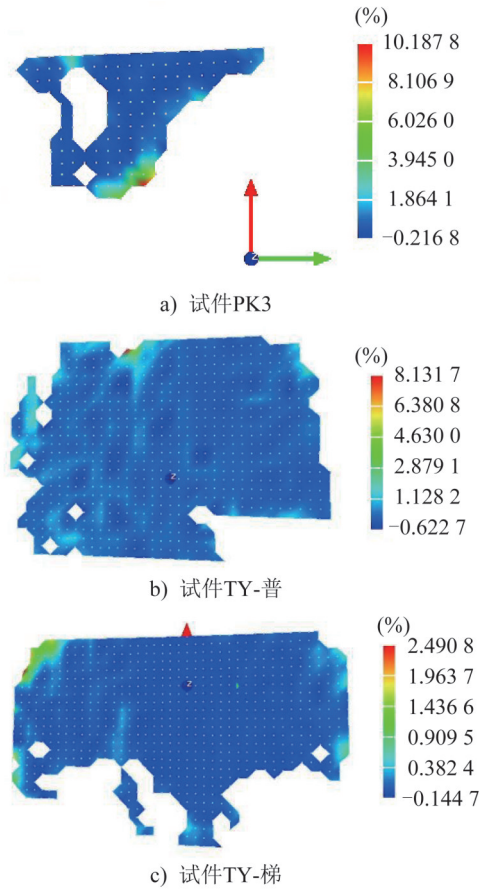


图 15 不同试件板底最大主应变分布云图 (荷载为 22 kN 时)

Fig. 15 Contours of maximum principal strain distribution at the bottom of different specimen slabs (when loaded to 22 kN)

系设定:模型简支端采用铰接约束(释放平面内转动自由度),固支端施加全位移约束(限制  $x/y/z$  向平动及转动),支撑跨距严格保持在 3.5 m,以精确模拟试验约束状态。

### 3.3 有限元计算结果

ABAQUS 有限元模型的计算结果表明:模型 TY-普通、TY-梯与模型 PK3 三类试验板材的计算挠度响应,与试验实测结果呈现良好的相关性。有限元模拟与试验数据具体对比如表 5 和图 18 所示,其所有模型的最大挠度均发生于跨中,符合简支边界变形理论。模型 TY-梯展现出最高的模拟精度,其误差率为 3.32%;相比之下,模型 TY-普与 PK3 的误差率分为 5.30% 和 11.22%。此外,在最优刚度性能对应的荷载-挠度响应中,模型 TY-梯的最大挠度较模型 TY-普的最大挠度降低了 28.3% (12.12 mm 与 16.90 mm 相比),验证了组合肋构造对刚度的显著提升作用。

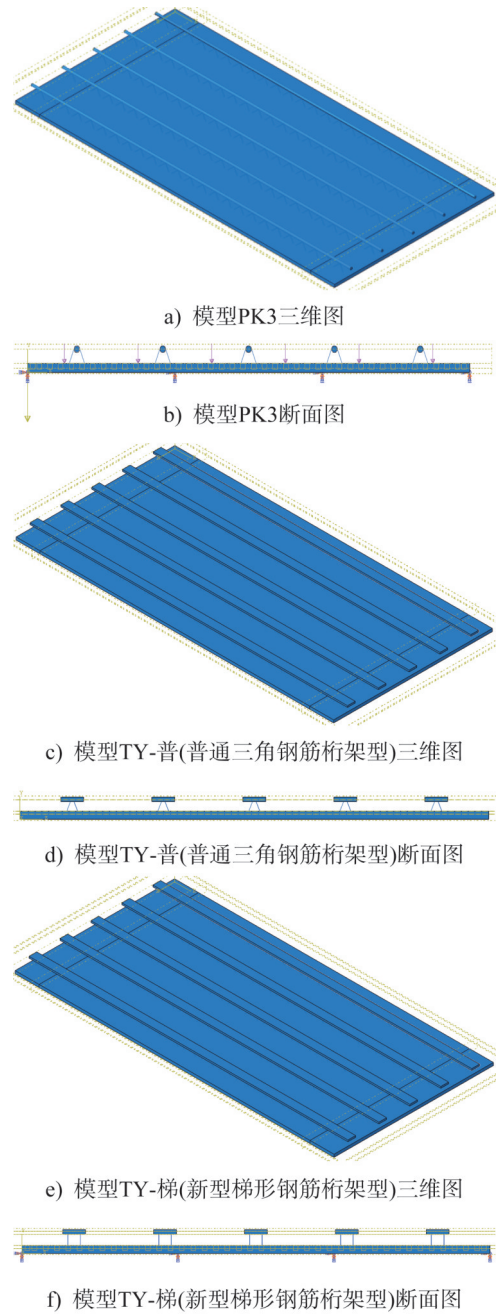


图 16 三维模型建立

Fig. 16 3D-Model setup

### 3.4 UHPC 组合肋厚度对 TY-梯形板性能的影响规律

基于 TY-梯形组合肋板开展的 UHPC 组合肋厚度参数分析结果表明:UHPC 组合肋厚度对叠合板的刚度具有显著调控效应,如表 6 所示。当肋厚增至 20 mm 时,该模型在标准荷载 ( $3.75 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ) 下跨中最大挠度仅 12.12 mm,如表 7 所示,且抗弯刚度满足免支撑施工的挠度控制限值 ( $\leq L/250$ )。

当 UHPC 组合肋厚增加至 25~30 mm 时,虽可提升截面刚度(对应挠度分别降至 9.8 mm、8.2 mm),但结构

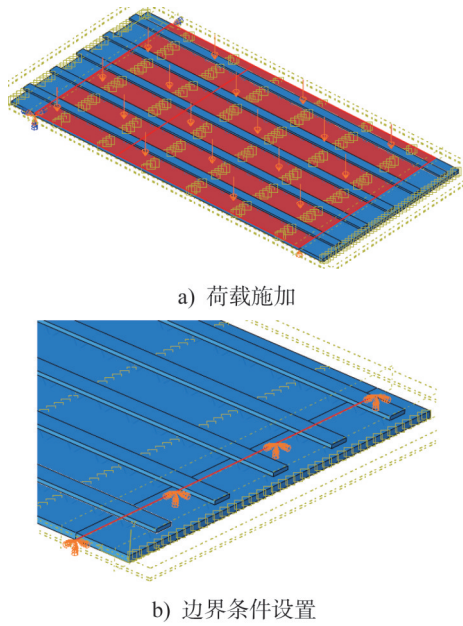


图17 荷载与边界条件

Fig. 17 Loading and boundary conditions

表5 数值模拟结果与试验结果验证

Table 5 Numerical simulation results and test results verification

| 板材类型 | 均布荷载/<br>(kN·m <sup>-2</sup> ) | 模拟最大<br>挠度/mm | 试验最大<br>挠度/mm | 误差/%  |
|------|--------------------------------|---------------|---------------|-------|
| PK3板 |                                | 43.12         | 48.57         | 11.22 |
| TY普板 | 3.75                           | 16.90         | 16.05         | 5.30  |
| TY梯板 |                                | 12.12         | 11.73         | 3.32  |

自重随之显著增加,UHPC用量的增加导致构件自重上升18%~26%,不仅降低了构件运输与安装效率,还抬高了工程综合造价。因此,UHPC组合肋厚取20mm时,能够在刚度、经济性与施工兼容性间实现最优平衡。

### 4 结论

本试验通过对目前在建筑市场有较多工程应用的钢管桁架预应力混凝土叠合板(PK3板)与2种类型的UHPC组合肋预应力混凝土叠合板(TY板)的力学性能进行对比分析,得出以下结论:

(1) 在裂缝控制方面,TY板表现出明显的优势,尤其是梯形钢筋桁架的TY-梯板。与PK3板相比,TY板在相同荷载下的裂缝宽度较小,且裂缝扩展速度较慢。此外,TY板的挠度控制也显著优于PK3板的挠度控制。相同支撑跨度下,TY-梯板的最大挠度为11.73mm,而PK3板的最大挠度达到了48.57mm,显示出TY板在控制结构变形方面的显著优势。

(2) 试验结果表明,TY板在刚度和承载力方面显著

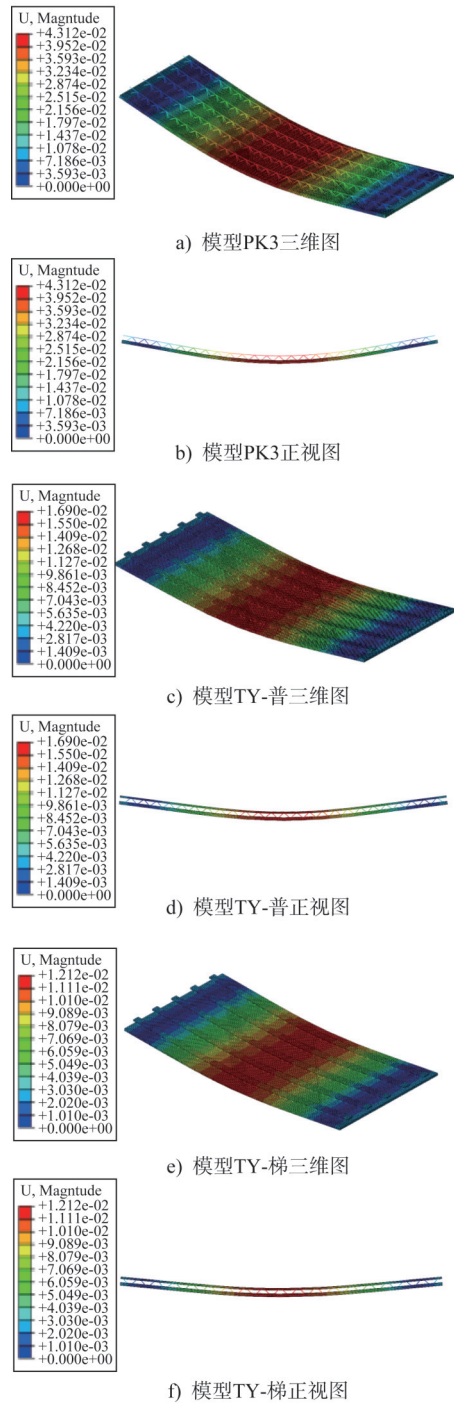


图18 不同模型的位移分布云图 (unit:mm)

Fig. 18 Contours of displacement distribution for different models (unit: mm)

表6 TY-梯板在不同组合肋厚度下的最大变形结果  
Table 6 The maximum deformation results of TY-traeozoidal slab under different combined rib thickness

| 板材类型  | 组合肋厚度/mm | 最大变形/mm |
|-------|----------|---------|
| TY-梯板 | 20       | 12.12   |
|       | 25       | 10.97   |
|       | 30       | 6.08    |

优于PK3板的对应值。特别是TY-梯板,其设计不仅有效提升了叠合板的整体刚度,还能够承受更高的荷载,而不发生显著的变形。在加载至较大荷载时,PK3板的挠度明显较大,显示出较低的结构刚度,而TY板在同样条件下则能保持较小的挠度,表现出良好的抗弯能力。

(3) 通过对比不同TY板的性能,发现梯形桁架型的TY-梯板相比于普通钢筋桁架型的TY-普板表现出更优的力学性能。进一步增强叠合板的刚度和承载力,同时也更有效地控制了裂缝的产生,显著降低了变形幅值,展示了优异的结构性能和耐久性。

(4) 基于叠合板的有限元数值模拟分析与足尺堆载试验结果,TY-梯板所采用的UHPC组合肋在结构刚度方面显著优于PK3板使用的灌浆钢管桁架。UHPC组合肋的应用有效提升了叠合板的整体抗弯承载能力。

(5) PK板采用的灌浆钢管桁架,其钢管构件外径通常为28 mm,此尺寸导致桁架下方净空高度受限。在实际工程应用中,该限制易引发管线敷设困难,尤其在管线交叉区域,施工操作空间局促,作业难度显著增加。

总体而言,TY板尤其是梯形钢筋桁架型TY板,力学性能显著优于传统的PK3板力学性能,其优越的刚度、承载力及良好的裂缝和挠度控制性能,使其成为一种更为理想的预制叠合板选型。在工程实践中,建议优先考虑TY板作为装配式预制叠合板,以提高结构的整体刚度、承载力、耐久性和施工效率。

## 参考文献:

- [ 1 ] 张卓,任锐,张祥,等. 预应力混凝土钢管桁架叠合板施工关键技术研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊2): 1887-1893. DOI:10.19701/j.jzjg.23S2854.  
ZHANG Zhuo, REN Rui, ZHANG Xiang, et al. Research on key construction techniques of prestressed concrete steel tube truss composite slab [J]. Building Structure, 2023, 53 (Suppl. 2): 1887-1893. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S2854. (in Chinese)
- [ 2 ] 陈海,孙伟民,郭樟根,等. 预应力混凝土叠合板受弯性能的试验研究[J]. 特种结构, 2012, 29(3): 11-13. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3598.2012.03.003.  
CHEN Hai, SUN Weimin, GUO Zhanggen, et al. The experimental study of flexural performance of prestressed concrete composite slabs [J]. Special Structures, 2012, 29(3): 11-13. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3598.2012.03.003. (in Chinese)
- [ 3 ] 王金,曹清,李妍. 装配式建筑叠合楼板设计中若干问题讨论[J]. 建筑结构, 2017, 47(增刊1): 890-892. DOI: 10.19701/j.jzjg.2017.s1.192.  
WANG Jin, CAO Qing, LI Yan. Discussion on some problems in the design of laminated floor slab of assembled building [J]. Building Structure, 2017, 47 (Suppl. 1): 890-892. DOI: 10.19701/j.jzjg.2017.s1.192. (in Chinese)
- [ 4 ] 吴方伯,黄海林,陈伟,等. 预制带肋薄板混凝土叠合板件受弯性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(4): 7-12, 19. DOI: 10.3969/j.issn.1674-4764.2011.04.002.  
WU Fangbo, HUANG Hailin, CHEN Wei, et al. Experimental analysis on the mechanical properties of concrete composite slabs with precast prestressed rectangular rib panels [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33 (4): 7-12, 19. DOI: 10.3969/j.issn.1674-4764.2011.04.002. (in Chinese)
- [ 5 ] 吴方伯,黄海林,陈伟,等. 叠合板用预制预应力混凝土带肋薄板的刚度试验研究与计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(4): 1-7.  
WU Fangbo, HUANG Hailin, CHEN Wei, et al. Experimental study and calculating methods on bending rigidity of precast prestressed concrete ribbed panels for composite slabs [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(4): 1-7. (in Chinese)
- [ 6 ] 吴方伯,黄海林,陈伟,等. 预制预应力带肋底板-混凝土叠合板双向受力效应理论分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(11): 55-58. DOI: 10.13204/j.gygz2010.11.015.  
WU Fangbo, HUANG Hailin, CHEN Wei, et al. Theoretical study on two-way effects of concrete composite slab with precast prestressed ribbed panel [J]. Industrial Construction, 2010, 40 (11): 55-58. DOI: 10.13204/j.gygz2010.11.015. (in Chinese)
- [ 7 ] 吴方伯,刘彪,周绪红,等. 新型叠合楼板的叠合面连锁咬合效应分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(2): 1-7.  
WU Fangbo, LIU Biao, ZHOU Xuhong, et al. Analysis of the interlocking effect of the combined interface in a new type of composite floor [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(2): 1-7. (in Chinese)
- [ 8 ] 柳旭东,王东辉,刘帅,等. 新型带肋预应力混凝土叠合板试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(5): 98-101. DOI: 10.13204/j.gygz201605018.  
LIU Xudong, WANG Donghui, LIU Shuai, et al. Experimental study of a new ribbed prestressed concrete laminated slab [J]. Industrial Construction, 2016, 46 (5): 98-101. DOI: 10.13204/j.gygz201605018. (in Chinese)
- [ 9 ] 刘香,倪东阳,李娟. 预制带肋钢筋桁架叠合板的试验与有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(1): 42-52. DOI: 10.11717/j.issn.2095-1922.2018.01.05.  
LIU Xiang, NI Dongyang, LI Juan. Experimental study and finite element analysis of prefabricated ribbed steel truss laminated slabs [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2018, 34(1): 42-52. DOI: 10.11717/j.issn:2095-1922.2018.01.05. (in Chinese)
- [ 10 ] 曹霞,李月霞,刘超. 叠合面钢筋对UHPC叠合板受弯性能影响试验研究[J]. 混凝土, 2022(9): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2022.09.001.  
CAO Xia, LI Yuexia, LIU Chao. Experimental study on

- flexural behavior of UHPC composite slab with the steel of combined interface[J].Concrete, 2022(9):1-5.DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2022.09.001.(in Chinese)
- [11] YANG S L, MILLARD S G, SOUTSOS M N, et al. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPRC) [J].Construction and Building Materials, 2009, 23(6):2291-2298.DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.11.012.
- [12] SCHMIDT M, FEHLING E. Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe[J]. American Concrete Institute, 2005, 228 (1) : 51-78. DOI: 10.14359/14460.
- [13] 顾轶,姚亚锋,江林.浅谈UHPC桁架肋预应力叠合板施工技术的应用[J].江西建材,2024(10):316-318,331.DOI:10.3969/j.issn.1006-2890.2024.10.113.  
GU Yi, YAO Yafeng, JIANG Lin. A brief discussion on the engineering application of construction technology of prestressed composite slab with UHPC truss rib [J]. Jiangxi Building Materials, 2024(10):316-318, 331. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2890.2024.10.113.(in Chinese)
- [14] 刘旺宗,钱慧,石聪.UHPC桁架筋叠合板在钢桁-混凝土组合梁中的应用研究[J].工程技术研究,2024,9(20):114-116.DOI:10.19537/j.cnki.2096-2789.2024.20.038.  
LIU Wangzong, QIAN Hui, SHI Cong. Research on the application of UHPC truss reinforced composite slab in steel truss-concrete composite beam [J]. Engineering and Technological Research, 2024, 9 (20) : 114-116. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2024.20.038.(in Chinese)
- [15] 陈思远.UHPRC-RC叠合板抗弯性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.  
CHEN Siyuan. Flexural performance of hybrid slab of UHPRC-RC [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.(in Chinese)
- [16] 王若晨.预制底板不同构造形式对UHPC叠合板受弯性能影响的有限元分析[J].价值工程,2023,42(26):75-78.DOI:10.3969/j.issn.1006-4311.2023.26.025.  
WANG Ruochen. Finite element analysis of the influence of different constructions of precast bottom slabs on the flexural behavior of UHPC composite slabs [J]. Value Engineering, 2023,42(26):75-78.DOI:10.3969/j.issn.1006-4311.2023.26.025.(in Chinese)
- [17] 查上,邓文琴,刘朵,等.波形钢腹板工字钢-UHPC组合梁抗弯性能试验研究[J/OL].工程力学,2024;1-12.(2024-03-06)[2025-05-16].https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=GCLX2024030100C&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.  
ZHA Shang, DENG Wenqin, LIU Duo, et al. Experimental study on flexural behavior of I-beam-UHPC composite beam with corrugated steel web [J/OL]. Engineering Mechanics, 2024;1-12.(2024-03-06)[2025-05-16].https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=GCLX2024030100C&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
- [18] 王珏,季文玉,李旺旺.预应力活性粉末混凝土-普通混凝土叠合梁疲劳全过程分析[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(5):917-924,931.DOI:10.3785/j.issn.1008-973X.2019.05.012.  
WANG Jue, JI Wenyu, LI Wangwang. Full-range analysis on fatigue performance of prestressed reactive powder concrete-normal concrete composite beam [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(5):917-924, 931. DOI:10.3785/j.issn.1008-973X.2019.05.012.(in Chinese)
- [19] T/CECS 1538—2024 超高性能混凝土肋装配式楼板应用技术规程[S].  
T/CECS 1538—2024 Technical specification for application of ultra high performance concrete ribbed prefabricated floor slabs[S].(in Chinese)
- [20] GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S].  
GB/T 50152—2012 Standard for test method of concrete structures[S].(in Chinese)