

免支撑UHPC模板抗弯性能试验研究与分析

胡泽鹏¹, 祝明桥¹, 谭一萍¹, 田月强², 施广鑫³

¹湖南科技大学土木学院, 湖南 湘潭

²中路杜拉国际工程股份有限公司, 广东 广州

³中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年11月18日; 录用日期: 2025年12月9日; 发布日期: 2025年12月23日

摘要

为了解决普通叠合板模板易开裂、需设大量临时支撑的难题,研发了一种免支撑钢筋桁架UHPC模板,通过对3块免支撑钢筋桁架UHPC模板和3块UHPC模板进行静力加载试验,分析有无设置钢筋桁架的UHPC模板的破坏形态、承载力、挠度变化以及荷载-应变关系。研究表明:两种模板均基本遵循平截面假定,由于钢筋桁架显著提高了模板的抵抗矩,使钢筋桁架UHPC模板相较UHPC模板刚度和抗裂性能显著增加,且在免支撑条件下UHPC模板和钢筋桁架UHPC模板分别最大可承受均布荷载为规范设计值的1.54、1.70倍。基于应力等效假定,推导出钢筋桁架UHPC模板的开裂承载力计算式,其计算值与实测值吻合良好。经计算,在模板厚60 mm的条件下,免支撑跨度可达3.29 m,应用场景广泛。

关键词

免支撑UHPC模板, 受弯性能, 试验研究, 计算模型

Experimental Study on the Bending Performance of Unsupported UHPC Formwork

Zepeng Hu¹, Mingqiao Zhu¹, Yiping Tan¹, Yueqiang Tian², Guangxin Shi³

¹School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Zhonglu Dula International Engineering Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

³China Water Resources and Hydropower Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: November 18, 2025; accepted: December 9, 2025; published: December 23, 2025

Abstract

To address the challenges of cracking and extensive temporary support requirements in conventional

文章引用: 胡泽鹏, 祝明桥, 谭一萍, 田月强, 施广鑫. 免支撑 UHPC 模板抗弯性能试验研究与分析[J]. 土木工程, 2025, 14(12): 3055-3064. DOI: 10.12677/hjce.2025.1412327

composite slab formwork, a support-free steel truss UHPC formwork system has been developed. Static loading tests were conducted on three support-free steel truss UHPC formwork panels and three conventional UHPC formwork panels. The tests analysed the failure patterns, load-bearing capacity, deflection changes, and load-strain relationships of UHPC formwork with and without steel trusses. The research indicates that both formwork types fundamentally adhere to the flat-section assumption. The reinforcement truss significantly enhances the formwork's moment of resistance, markedly increasing the stiffness and crack resistance of the truss-reinforced UHPC formwork compared to the standard UHPC formwork. Under unsupported conditions, the UHPC formwork and truss-reinforced UHPC formwork can withstand uniformly distributed loads of up to 1.54 times and 1.70 times the code design value, respectively. Based on the stress equivalence assumption, a cracking load-bearing capacity calculation formula for the steel truss UHPC formwork was derived, with calculated values showing good agreement with measured data. Calculations indicate that under a formwork thickness of 60 mm, the unsupported span can reach 3.29 m, offering broad application potential.

Keywords

Non-Supporting UHPC Formwork, Bending Performance, Experimental Research, Computational Model

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在现代建筑工程中, 水平结构作为建筑体系中传递荷载与维持整体刚度的核心载体, 楼板作为水平结构中的关键, 其性能影响整体承载力和抗震性。全预制楼板在抗震上不如全现浇结构, 但全后浇结构施工效率低, 因此发展了叠合板技术。目前, 叠合板是装配式建筑中最常用的一种楼板结构形式之一, 由预制模板和上层后浇混凝土叠合而成, 叠合板结合了以上两种结构的优点。近年来, 国内外学者专家对叠合板的受弯性能已取得许多试验研究[1]-[4]和理论分析[5]-[7]的成果, 但由于其自重较大且普通混凝土的抗拉性能较差, 其抗弯刚度不足, 导致施工中仍需使用大量临时支撑, 不利于降低成本且效率较低。

为了减少或者避免叠合板在施工过程中设置临时支撑, 梁兴文[8]等对 10 mm 厚 UHPC 模板进行了施工加载试验, 测试了不同支撑间距下的静力性能。模板在 0.5 m 支撑间距下, 均布荷载能力是施工设计值的 1.7 倍, 但支撑间距较小, 还是需要一定的竖向支撑。为此, 吴方伯[9]、张旭[10]等通过在板底或板顶设置可拆卸桁架代替竖向支撑, 有效解决了模板开裂及施工期间受荷难题, 但桁架的拆除略显不便且拆除桁架所带来人工成本较高。此外, 还有学者[11]在板顶设置混凝土肋等措施来提高预制混凝土模板的受弯性能除此之外, 在板顶设置灌浆钢管[12]、在板底设置预应力筋[11]等措施也表现出较好的提升效果。但以上措施显著提高了预制模板的制造成本或造成施工阻碍。

目前将高性能混凝土运用在叠合板的研究还较少[13], 为了提升叠合板模板刚度, 减小自身重量, 达到免支撑的效果。本研究将超高性能混凝土(UHPC)应用于预制模板中, 能够显著提升结构抗裂性能。并以预制 UHPC 免撑模板作为底模, 在板面增设钢筋桁架, 以提升模板整体刚度。该板制作步骤简单, 易于生产, 刚度大, 施工阶段可免设临时支撑, 即可提高施工效率, 也可降低成本。为促进此模板在实际工程中的广泛应用, 本研究在免支撑条件下, 对有无钢筋桁架的预制 UHPC 模板试件进行抗弯性能试验,

深入分析其破坏模式、承载力、挠度、应变等关键结构性能。最后，建立可靠性高的 UHPC 模板开裂荷载的计算公式并提出合理的适用范围。

2. 试验概况

2.1. 试件设计

试验设计了一种免支撑钢筋桁架 UHPC 模板，其板宽 1500 mm，长 1900 mm，净跨 1800 mm，板厚 40 mm，板面设置两条钢筋桁架，伸出高度 70 mm，间距 690 mm。板身采用 UC150 混凝土，钢筋桁架上弦杆采用 12 mm 的 HRB400 钢筋，模板内部设置将 6 mm 的 HRB400 钢筋按间距 75 mm 焊接制作的钢筋网。同时设计了一组同尺寸不设钢筋桁架的 UHPC 模板作为对照组。每组 3 个试件完全相同。

将 6 mm 的 HRB400 钢筋按间距 75 mm 焊接制作的钢筋网。同时设计了一组同尺寸不设钢筋桁架的 UHPC 模板作为对照组。每组 3 个试件完全相同。试件详情见表 1、图 1。

2.2. 材料性能

UHPC 力学性能指标按《混凝土物理力学性能试验方法标准》[14](GB/T50081-2019)与《超高性能混凝土试验方法标准》[15](T/CECS864-2021)进行实测，UHPC 的立方体抗压强度 f_{cu} 、棱柱体轴心抗压强度 f_{cp} 、棱柱体轴心抗拉强度 f_t 和劈裂抗拉强度 f_{ts} 的实测强度分别为 170.23、141.24、10.30、29.84 MPa，弹性模量为 44.00 GPa。

钢筋力学性能指标参照 GBT228. 1-2010《金属材料拉伸试验：第 1 部分:室温试验方法》[16]进行实测，见表 2。

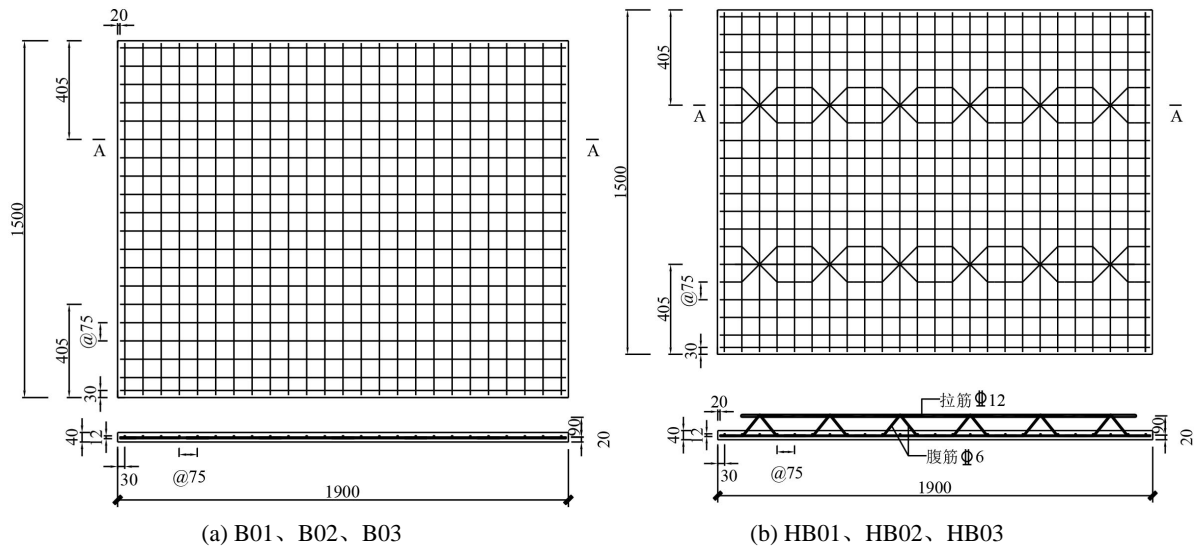


Figure 1. Reinforcement layout for test specimen
图 1. 试件配筋图

Table 1. Key design parameters
表 1. 主要设计参数

编号	构造形式	桁架间距/mm	长 × 宽 × 高/mm
B01~B03	无桁架	590	1900 × 1500 × 40
HB01~HB03	有桁架	590	1900 × 1500 × 40

Table 2. Mechanical properties of reinforcing bars
表 2. 钢筋力学性能指标

标号	公称直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
HRB400	6	487	652
	12	489.7	608

2.3. 加载方案

为了评估模板在免支撑条件下施加均布荷载的受弯性能，试验加载中采用砖块均匀堆载的方式来施加荷载。模板一端为固定铰支座、一端为滚动铰支座，支座仅提供垂直于跨度方向的竖向支撑反力，支座放置在刚性底座上，砖块放置之处铺上细砂。受力方向为边长为 1.9 m 方向，UHPC 模板每一层放置黏土砖 60 块，每块平均重量 2.3 kg，每层砖重量约为 51.1 kg/m²。具体见图 2。

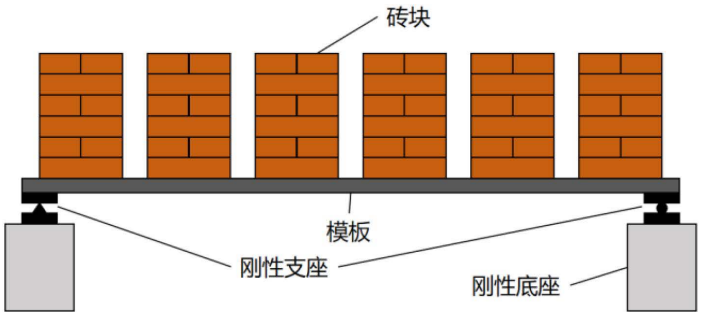


Figure 2. Loading diagram
图 2. 加载示意图

2.4. 测点布置

试件挠度通过在跨中布置的位移计测量，并且在两支座处布置百分表以及在 1/4 跨加载点处布置位移计。在模板侧面混凝土的跨中处、模板顶部和底部的跨中处和 1/4 跨处表面布置应变片。钢筋应变片分别布置于桁架钢筋的上弦筋跨中处和钢筋网跨中处。各测点布置见图 3。

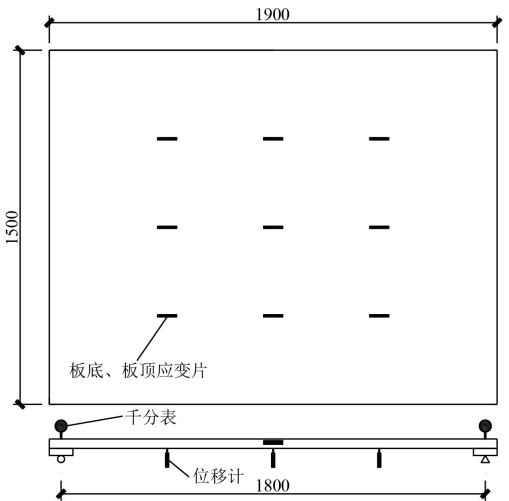


Figure 3. Schematic diagram of measurement point layout
图 3. 测点布置示意图

3. 试验现象及破坏特征

本研究对 3 块普通 UHPC 模板和 3 块免支撑钢筋桁架 UHPC 模板进行了对比试验研究。普通 UHPC 模板和免支撑钢筋桁架 UHPC 模板在加载过程中均呈现出典型的三阶段受力特征：

1) 弹性阶段。所有试件的挠度变形均随着荷载的增加而发生线性增加，整体变形和挠度较小，靠近跨中区域的板底混凝土首先达到极限拉应变，模板达到临界开裂状态，标志着弹性阶段结束。2) 裂缝开展阶段。随着荷载的继续增加，靠近跨中区域的下边缘均开始出现微裂缝，随后普通 UHPC 模板不断发出纤维拉拔声，裂缝数量持续增加并呈大致对称分布，裂缝宽度和长度扩展加速。而免支撑钢筋桁架 UHPC 模板并未出现明显的变形加速，与开裂前的抗弯刚度相近。3) 破坏阶段。当板底纵筋接近屈服时，裂缝发展趋于稳定，两种模板均形成 2~4 条贯穿板宽的主裂缝，此时普通 UHPC 模板挠度已经达到跨度的 1/30 左右，裂缝开展较密且宽度较小，侧面裂缝逐渐开展至板面，受压区混凝土未被压碎，最终未出现明显破坏，见图 4(a)。而免支撑钢筋桁架 UHPC 模板挠度还较小，桁架上弦钢筋轻微弯曲，最终由于桁架上弦钢筋局部屈曲失稳，上弦钢筋抗压失效，模板呈现低延性断裂，试件偏脆性破坏，见图 4(b)。



(a) UHPC 模板



(b) 免支撑钢筋桁架 UHPC 模板

Figure 4. Specimen failure diagram

图 4. 试件破坏图

4. 试验结果与分析

4.1. 荷载 - 挠度分析

从荷载 - 挠度曲线中可以看出，在开裂之前，试件均处于弹性阶段，刚度较大，荷载与挠度之间为基本线性关系，且免支撑钢筋桁架 UHPC 模板的斜率大于普通 UHPC 模板；随着荷载的增加，模板开裂，曲线斜率减小，尤其是普通 UHPC 模板的曲线都出现了明显拐点，试件刚度显著降低。而免支撑钢筋桁架 UHPC 模板的斜率减小幅度较小，刚度变化不大。这是由于混凝土开裂后受拉区减小，损失开裂部分

混凝土提供的刚度，反映出钢筋桁架的加入显著提高了模板的抗弯刚度。随着荷载的增加直至模板破坏，曲线仍然基本呈现线性形态，但普通 UHPC 模板的曲线弧度略大于免支撑钢筋桁架 UHPC 模板，反映出在开裂后钢筋桁架显著抑制模板的裂缝发展，使得刚度没有持续减小，见图 5。

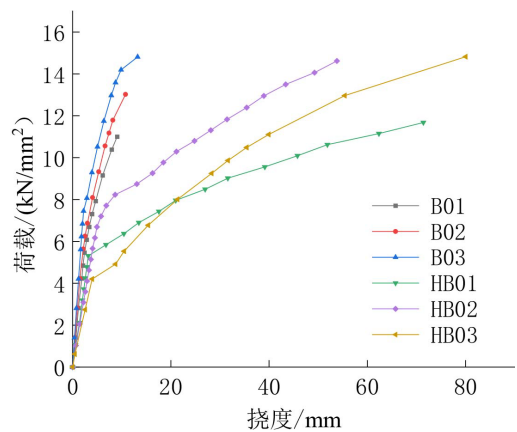


Figure 5. Mid-span deflection-load curve
图 5. 跨中挠度 - 荷载曲线

由表 3 各试件试验结果给出的各试验结果可知，免支撑钢筋桁架 UHPC 模板较普通 UHPC 模板在开裂荷载和刚度均有所提升。其中免支撑钢筋桁架 UHPC 模板的平均开裂荷载相较提升 13.2%，平均初始刚度提升 69.6%，但普通 UHPC 模板表现出了更好的延性。由于钢筋桁架在破坏阶段时发生局部屈曲失稳导致突发性失效，使得中和轴迅速下降至下层钢筋附近，模板的下部 UHPC 拉应力迅速增大，模板裂缝快速扩展，试件发生脆性破坏，导致没有体现出免支撑钢筋桁架 UHPC 模板极限荷载的优势。

Table 3. Test results for specimens
表 3. 各试件试验结果

构件编号	开裂荷载 kN/m^2	极限荷载 kN/m^2	初始刚度 N/mm
B01	6.28	12.65	1670
B02	7.68	15.61	1354
B03	5.62	14.88	1706
HB01	6.43	11.97	2247
HB02	7.24	14.01	2451
HB03	8.50	15.55	3326

根据《建筑结构荷载规范》[17] (GB 50009-2012)规定，现浇 80 mm 混凝土的工况下，取施工阶段荷载标准组合值为 5.0 kN/m^2 ，普通 UHPC 模板处于弹性状态实际可承受的荷载与均布荷载设计值之比为 1.12~1.54，而免支撑钢筋桁架 UHPC 模板处于弹性状态实际可承受的荷载与均布荷载设计值之比为 1.29~1.70，可见免支撑钢筋桁架 UHPC 模板相较具有更大的安全储备。

4.2. 应变分析

从应变沿截面高度的分布图(以 B03、HB02 为例，见图 6)可以看出，这种线性分布特征与平截面假定高度契合，即各点的应变与该点到中性轴的距离成正比。随着荷载的不断增加，模板底部出现裂缝后，受拉区混凝土减少，截面的中性轴略微上移，但各点的应变与该点到中性轴的距离仍成正比例关系。表

明两种模板在整个加载过程中都基本符合平截面假定。两图对比可以看出,免支撑钢筋桁架 UHPC 模板的中性轴上移较小,模板裂缝开展较缓慢,且免支撑钢筋桁架 UHPC 模板中性轴的高度相较明显降低,表明钢筋桁架可显著增大模板的抵抗矩,从而达到优异抗裂性能。

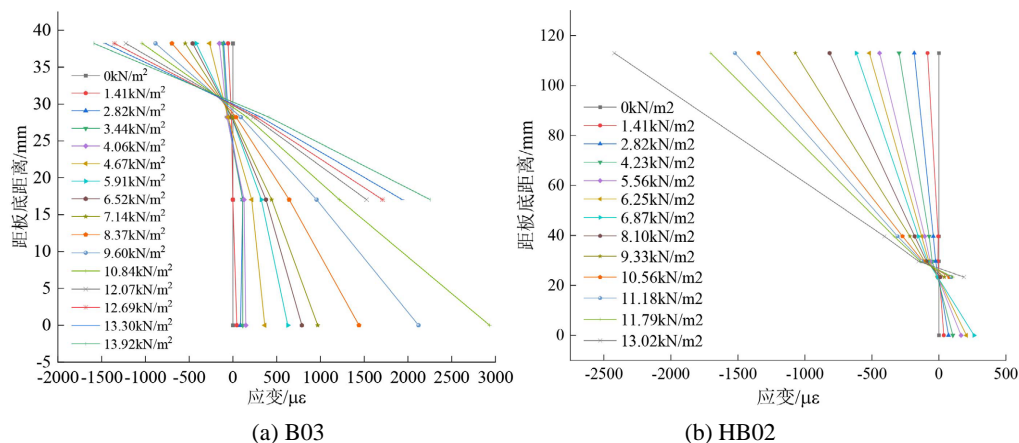


Figure 6. Strain distribution diagram along the cross-sectional height

图 6. 沿截面高度应变分布图

从荷载 - 应变曲线(以 B03、HB02 为例,见 图 7)可以看出,在模板的弹性阶段,各曲线都处于线性阶段。模板开裂后,曲线逐渐偏离线性关系,进入非线性阶段,斜率减小,应变的变化速率加快。对于普通 UHPC 模板,在未开裂之前,板底的抗拉作用主要由 UHPC 承担。随着裂缝的开展,板底的抗拉作用逐渐转移至纵筋承担。当纵筋开始屈服时,模板的挠度达到极限状态。而对于免支撑钢筋桁架 UHPC 模板,在弹性阶段,抗压作用主要由钢筋桁架承担,抗拉作用则由 UHPC 承担。在裂缝发展阶段,上弦钢筋的应变斜率逐渐增大,而板顶混凝土、板底混凝土、纵筋曲线均仍基本呈现线性关系,结合平截面假定,表明此时上弦钢筋的应变不只是由压缩变形引起的,还有因屈曲变形而引起的应变。当上弦钢筋发生屈曲失稳破坏导致突发性失效后,模板下部 UHPC 和纵筋拉应力瞬间增大至极限应变,免支撑钢筋桁架 UHPC 模板随即发生脆性破坏。

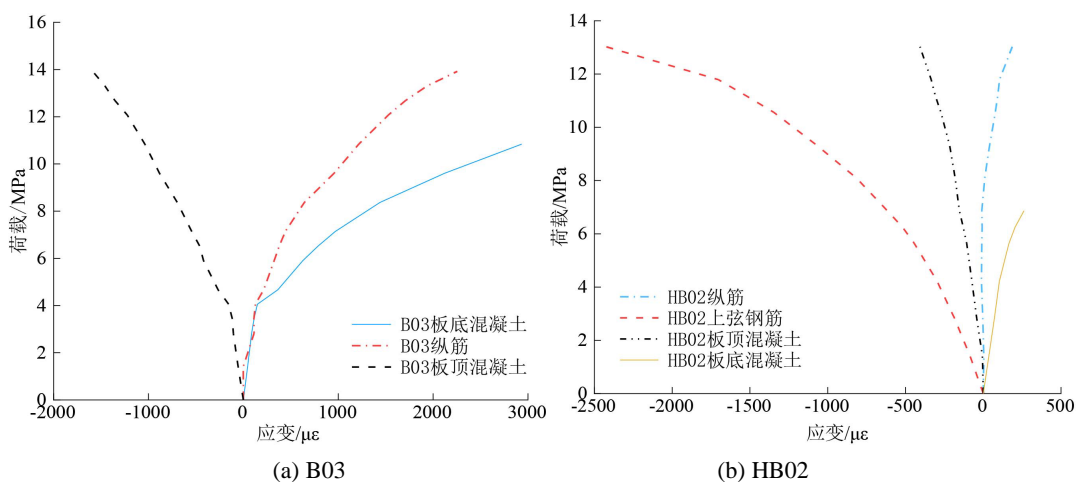


Figure 7. Load-strain curve

图 7. 荷载 - 应变曲线

综上所述,普通 UHPC 模板与免支撑钢筋桁架 UHPC 模板在整个抗弯试验过程中均遵循平截面假定,在不同受力阶段,两种模板的受力机制与破坏模式呈现出显著差异,普通 UHPC 模板凭借 UHPC 材料与钢筋的协同工作,在受力过程中展现出良好的延性,但抗弯刚度较差。免支撑钢筋桁架 UHPC 模板主要依靠钢筋桁架提供抗压能力,将中性轴高度明显降低,使在抗裂性能方面表现更为突出,但由于其上弦钢筋发生屈曲失稳呈现脆性破坏。可对板底混凝土进行抗裂加固和对上弦钢筋跨中区域进行局部抗弯加固,免支撑钢筋桁架 UHPC 模板将更能充分发挥其结构性能。

5. 承载力理论分析

钢筋桁架 UHPC 模板开裂弯矩计算

在计算钢筋桁架 UHPC 模板开裂荷载时,参考杨剑[18]对 UHPC 梁开裂荷载的应力等效假定,将受拉区 UHPC 应力和受压区 UHPC 应力假定为三角形,应力分布见图 8。

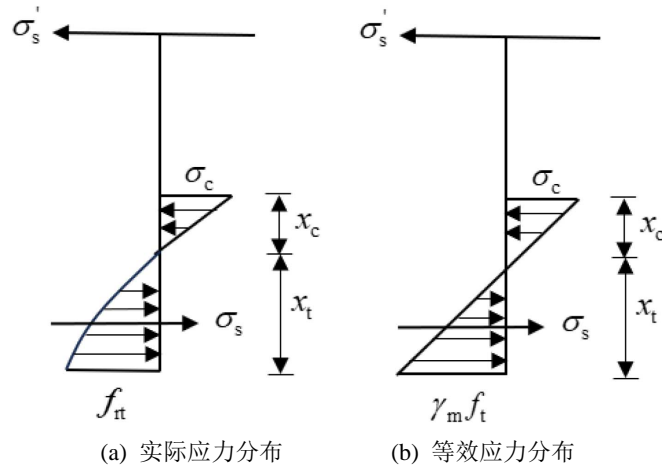


Figure 8. Stress distribution diagram for reinforced truss UHPC formwork
图 8. 钢筋桁架 UHPC 模板应力分布图

由于混凝土为非均匀弹塑性材料,受拉区在开裂前存在塑性变形,实际抵抗弯矩大于按弹性理论计算的值,所以采用[19] [20]截面抵抗矩塑性影响系数 γ_m 反映模板受拉区弹塑性发展程度,同时采用修正系数 γ 来对轴心抗拉强度与初裂弯拉强度进行修正,反应应力梯度和尺寸效应。同时开裂荷载可以看成由 UHPC 基体与钢筋两部分的弯矩组成,具体公式如式(1)~(3)。

$$M_{cr} = M_s + M_c = \gamma_m \gamma f_t W_0 \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{f_{rt}}{f_t} \quad (2)$$

$$\gamma_m = \frac{W_s}{W_0} \quad (3)$$

根据 UHPC 平截面分布假定力平衡公式、力矩平衡公式整理可得:

$$x_c = \frac{bh^2 + 2\alpha_E A_s h_0 - 2\alpha_E A'_s h'}{2(bh + \alpha_E A_s + \alpha_E A'_s)} \quad (4)$$

$$M_{cr} = \gamma f_t W_s \quad (5)$$

$$W_s = \left[\frac{bx_c^3 + 3\alpha_E A_s' (h' + x_c)^2 + b(h - x_c)^3 + 3\alpha_E A_s (h_0 - x_c)^2}{3(h - x_c)} \right] \quad (6)$$

式中: b 、 h 、 h' 为UHPC模板截面的宽度、高度和桁架高度; f_t 为初裂弯拉强度; x_c 、 x_t 为UHPC受压区和受拉区高度; A_s 、 A_s' 为钢筋截面面积和桁架钢筋截面面积; 钢筋弹性模量与混凝土弹性比值 $\alpha_E = 4.55$; h_0 为截面有效高度; W_0 为将钢筋折算为UHPC后换算截面对截面受拉边缘的弹性抵抗矩; W_s 为考虑混凝土受拉区塑性变形影响的模板截面的弹塑性抵抗矩。

结合实测值, 经计算平均后取修正系数 γ 为 0.55, 影响系数 γ_m 为 1.4。得到钢筋桁架UHPC模板的开裂荷载计算公式为:

$$M_{cr} = 0.55 \cdot 1.4 f_t W_0 \quad (7)$$

$$W_0 = \frac{I_0}{h' + h - y_0} = \left\{ \frac{bh^3}{12} + \alpha_E A_s' (h' + h - y_0)^2 + bh \left(\frac{h}{2} - y_0 \right)^2 + \alpha_E A_s (\alpha_s - y_0)^2 \right\} / (h' + h - y_0) \quad (8)$$

$$y_0 = \frac{\frac{bh^2}{2} + (\alpha_E - 1) A_s a_s + \alpha_E A_s' (h' + h)}{bh + (\alpha_E - 1) A_s + \alpha_E A_s'} \quad (9)$$

将试验值与计算值进行对比, 计算值与试验值的比值平均值为 0.980, 计算标准差为 0.072, 变异系数为 0.073, 离散程度较小, 表明公式吻合度较高, 有一定可靠性, 见表 4。

Table 4. Comparison of calculated and tested values for reinforced trust UHPC formwork

表 4. 钢筋桁架 UHPC 模板计算值与试验值对比

构件编号	计算值/(kN·m)	试验值/(kN·m)	计算值/试验值
HB01	4.09	3.89	1.05
HB02	4.31	4.39	0.98
HB03	4.71	5.19	0.91
平均值			0.980
标准差			0.072
变异系数			0.073

经计算, 若将模板厚度设置为市面上常规模板厚度 60 mm, 此钢筋桁架 UHPC 模板免支撑跨度可达 3.29 m, 可应用于大量常规住宅楼板。

6. 结论

通过对两种 UHPC 模板的受弯性能试验研究与分析, 得到如下结论:

(1) 两种模板加载全过程均基本遵循平截面假定。钢筋桁架可明显降低模板的中性轴高度, 从而提高模板的抗弯刚度。

(2) 钢筋桁架 UHPC 模板相较于普通 UHPC 模板, 其开裂弯矩提升了 13.2%; 在弹性阶段的平均初始刚度提升了 69.6%, 表明钢筋桁架的加入有效减缓了模板的变形。

(3) 试验表明, 在免支撑条件下 UHPC 模板和钢筋桁架 UHPC 模板分别最大可承受 7.68、8.50 kN/m²

均布荷载(为规范设计值的 1.54、1.70 倍), 均具有较大的安全储备。

(4) 基于平截面假定、力平衡条件以及弯矩平衡原理, 推导钢筋桁架 UHPC 模板的开裂弯矩计算公式。计算值与试验值的误差 $\leq 2.6\%$, 变异系数低于 0.073, 验证了模型的可靠性, 并经计算在模板厚度为 60 mm 的条件下, 免支撑跨度可达 3.29 m, 可应用于大量常规住宅楼板。

基金项目

湖南省自然科学基金(2024JJ7177)。

参考文献

- [1] 王龙, 金凌志, 万冬伟. 不同叠合方式超高性能混凝土叠合板受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S2): 43-51.
- [2] 周广强, 李书蓉, 张鑫, 等. 预应力混凝土钢管桁架叠合板力学性能试验研究[J]. 建筑结构, 2024, 55(4): 26-31.
- [3] 安海玉, 郑子硕, 曹宇, 等. 钢筋桁架纤维水泥叠合板受弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(16): 74-78+131.
- [4] 武立伟, 陈海彬, 刘亦斌. 混凝土预制叠合空心楼板静力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S2): 36-42.
- [5] Liu, W.Z., Cui, S.Q., Liu, C.Q., *et al.* (2021) Experimental and Theoretical Study on Flexural Behavior of Prestressed Concrete Composite Slabs with Steel Trusses. *Journal of Building Structures*, **42**, 95-106.
- [6] 聂建国, 姜越鑫, 聂鑫, 等. 叠合板中桁架钢筋对预制板受力性能的影响[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(1): 151-158.
- [7] 马兰, 陈向荣, 蒋路, 等. 钢筋桁架混凝土叠合楼板试验及有限元分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(21): 54-57+62.
- [8] 梁兴文, 王莹, 于婧, 等. 预制 UHPC 模板及采用预制模板的 RC 板受力性能及承载力分析[J]. 工程力学, 2019, 36(7): 146-155.
- [9] 吴方伯, 秦浩, 文俊, 等. 新型叠合板力学性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(1): 33-40.
- [10] 张旭, 庞祖杰, 王少杰, 等. 免支撑工具式桁架叠合板受弯性能试验研究与分析[J]. 工程力学, 2022, 40(8): 115-125.
- [11] 侯和涛, 冯明远, 邱灿星, 等. 预应力混凝土钢筋叠合板受弯性能试验与理论研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(3): 103-110.
- [12] 侯和涛, 蓝如海, 冯明远, 等. 灌浆钢管桁架混凝土叠合板抗弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(7): 29-33.
- [13] 冯鑫, 陈明, 田志昌. 混凝土叠合板分类及研究综述[J]. 建筑结构, 2023, 54(1): 138-144.
- [14] 中华人民共和国国家标准. GB-T50081-2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [15] T/CECS 864-2021 高性能混凝土试验方法标准[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2021.
- [16] 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法:GB/T 228.1-2021 [Z]. 北京: 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2021.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [18] 杨剑, 方志. 预应力超高性能混凝土梁的受弯性能研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(1): 39-46.
- [19] 刘彦男. 配置 HRB600 钢筋超高性能混凝土梁抗弯性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [20] 李莉. 活性粉末混凝土梁受力性能及设计方法研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.