

# 饱水状态下PFCB-钢筋桁架楼承板施工阶段力学性能研究

王建烁<sup>1,2</sup>, 王腾<sup>1,2</sup>, 陈志华<sup>1,3\*</sup>, 甘威<sup>1,2</sup>, 陶红斌<sup>4</sup>, 任伟<sup>5</sup>

(1. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室, 天津 300384; 3. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 4. 多维联合集团有限公司, 北京 100070; 5. 长安大学 旧桥检测与加固技术交通运输行业重点实验室, 西安 710064)

**摘要:** 提出了一种新型免拆模钢筋桁架楼承板(PFCB-钢筋桁架楼承板), 该楼承板由钢筋桁架和纤维水泥底板通过自攻螺钉和连接件预制连接而成。为研究PFCB-钢筋桁架楼承板在施工阶段的受力性能, 并考虑施工时混凝土砂浆中水分或降水天气对纤维水泥板底模的影响, 对PFCB-钢筋桁架楼承板进行了饱水状态下的承压能力试验。采用有限元软件对楼承板结构进行了参数化分析, 得到了楼承板极限承载力与刚度的变化规律, 发现PFCB-钢筋桁架楼承板在均布设计组合荷载以及集中荷载下性能良好, 极限荷载下跨度为 3 600 mm 试件的挠度控制在 6~8 mm; 改变自攻螺钉间距与钢筋桁架高度对试件的承载力影响比较显著。

**关键词:** 纤维水泥底板; 钢筋桁架楼承板; 饱水状态; 用钢量; 参数化分析

中图分类号: TU398<sup>+.9</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)04-0118-13

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231020002

## Mechanical Properties of PFCB-Steel-Bars Truss Deck in the Construction Stage Under Water-Saturated Condition

WANG Jianshuo<sup>1,2</sup>, WANG Teng<sup>1,2</sup>, CHEN Zhihua<sup>1,3\*</sup>, GAN Wei<sup>1,2</sup>,  
TAO Hongbin<sup>4</sup>, REN Wei<sup>5</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin 300384, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. Duowei Union Group Co., Ltd., Beijing 100070, China; 5. Key Laboratory of Transport of Industry of Bridge Detection Reinforcement Technology, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

\*Corresponding author: zhchen@tju.deu.cn

**Abstract:** This paper proposes a new type of steel-bars truss deck with permanent bottom form (PFCB-steel-bars truss deck), which is an assembled floor deck consisting of steel-bars truss and permanent fiber cement bottom (PFCB) prefabricated with self-tapping screws and connectors. In order to study the structural performance of PFCB-steel-bars truss deck in the construction stage and to consider the influence of moisture in concrete mortar or precipitation

收稿日期: 2023-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(52408204), 天津自然科学基金青年项目(23JCQNJC00410), 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102213519)

作者简介:

王建烁(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事装配式建筑、建筑雪荷载方面的研究。E-mail: wjs\_mutong@163.com。

王腾(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事装配式建筑围护结构方面的研究。

通信作者:

陈志华(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构、空间结构与组合结构方面的研究。E-mail: zhchen@tju.deu.cn。

weather on fiber cement bottom form during construction, a compressive capacity test of PFCB-steel-bars truss deck was conducted under water-saturated condition. A parametric analysis of the steel-bars truss deck structure was carried out using finite element software simulation, and the change rule of ultimate bearing capacity and stiffness was obtained. The results demonstrate that the PFCB-steel-bars truss deck has good performance under uniform design combination load and concentrated load, and the deflection of the specimens with a span of 3 600 mm is controlled to be between 6-8 mm under the ultimate load. Moreover, the change of the self-tapping screws spacing and the height of the steel trusses has a more obvious effect on the load bearing capacity of specimens.

**Keywords:** permanent fiber cement bottom (PFCB); steel-bars truss deck; water-saturated condition; steel consumption; parametric analysis

为促进绿色建筑发展,推动先进的建造方式,国家相继发布了《国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见》、《住房和城乡建设部等部门关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》、《关于印发绿色建筑创建行动方案的通知》等文件。在此背景下,我国装配式建筑步入蓬勃发展阶段,建筑“三板体系”也应运而生。“三板”即预制楼板、预制内墙板与预制外墙板。钢筋桁架楼承板是一种新型的预制楼板,具有自重轻、易安装、少支撑、易埋管线、免安装底模、现场可修改尺寸、调整方便等优点。预制楼板是装配式建筑结构的重要组成部分,钢筋桁架楼承板也是其中的一种<sup>[1]</sup>。但相较于其他预制楼板,目前有关钢筋桁架楼承板的研究较少。

钢筋桁架楼承板在国内的研究刚起步,且大部分研究内容集中在施工技术方面<sup>[2]</sup>。面对实际工程中遇到的点焊式钢筋桁架楼承板的焊点脱焊、钢板剥离、浇筑漏浆等问题,焦渊<sup>[3]</sup>进行了相关研究分析;部分学者对桁架与底板的连接方式进行了优化,如贾斌等<sup>[4]</sup>将普通钢筋桁架楼承板体系改造为可拆卸木模板自承式钢筋桁架楼承板体系;周剑<sup>[5]</sup>对基础计算理论,尤其是免拆底模钢筋桁架楼承板在施工阶段的设计内容以及在使用阶段的验算内容进行了研究;对于新型材料底板的承载力,如细石混凝土板底模,张翠玉<sup>[6]</sup>、孙彤彤等<sup>[7]</sup>研究了该种材料底板锚固型钢桁架楼承板的抗弯性能;TIAN等<sup>[8]</sup>研究了型钢桁架楼承板的弯曲性能,得到其极限荷载为 $22.5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 。QI等<sup>[9]</sup>提出采用钢管来代替上弦钢筋,使楼承板的抗弯性能显著提高。DIZDAR等<sup>[10]</sup>重点研究了下承式楼承板钢桁架的刚度实测值与设计值的差异;FLINT等<sup>[11]</sup>、CHANG等<sup>[12]</sup>、郝祯<sup>[13]</sup>对钢筋桁架楼承板的耐火性能进行了深入研究;同时KANG等<sup>[14]</sup>、WEN等<sup>[15]</sup>、TORRENTS等<sup>[16]</sup>也对纤维水泥材料进行了详细研究。

然而,国内外学者主要关注干燥状态下纤维水泥底板(permanent fiber cement bottom, PFCB)的钢筋桁架楼承板的结构性能,对于实际工程中水泥砂浆水分对纤维水泥板的渗入,以及降水天气对纤维水泥底板楼承板的影响研究较少。

本文提出一种新型的以纤维水泥板为底模的钢筋桁

架楼承板(PFCB-钢筋桁架楼承板)。对施工阶段PFCB-钢筋桁架楼承板在饱水状态下的受力性能进行试验研究,并结合《钢筋桁架楼承板应用技术规程》(T/CECS 1069—2022)<sup>[17]</sup>验证该种楼承板的适用性。采用ABAQUS有限元分析软件对其受力性能进行模拟分析,研究螺钉间距、桁架间距、桁架高度、钢筋直径、底板厚度等因素对PFCB-钢筋桁架楼承板力学性能的影响。

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计

PFCB-钢筋桁架楼承板的底板为纤维水泥板,上方的钢筋桁架弯脚处焊接有连接件,钢筋桁架、连接件与底板之间采用自攻螺钉连接形成整体,如图1所示。钢筋桁架的上下弦均采用直径为10 mm的HRB400热轧三级盘螺钢筋。腹杆钢筋采用冷轧光圆钢筋CPB550,抗拉强度不小于550 MPa。钢板连接件采用镀锌钢板,屈服强度不小于235 MPa。自攻螺钉采用马氏体型不锈钢12Cr13材质的十字沉头自钻自攻螺钉ST5.5 mm×28 mm,其表面经过了钝化处理。

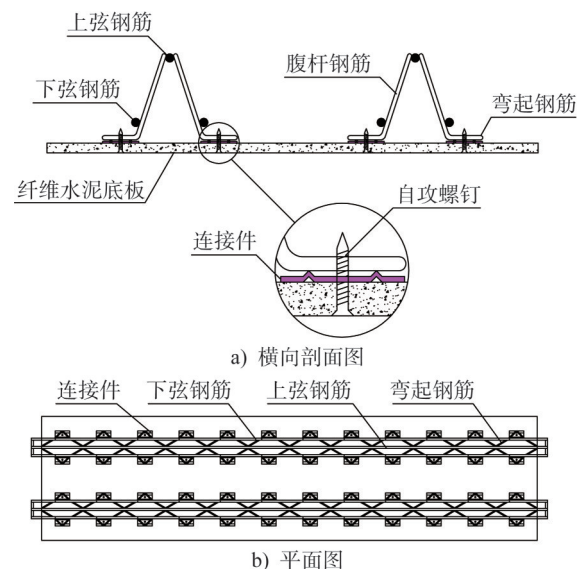


图1 PFCB-钢筋桁架楼承板试件构造详图

Fig. 1 Structural details of PFCB-steel-bars truss deck specimen

试验中共设计了8块PFCB-钢筋桁架楼承板试件,为模拟楼承板在施工阶段的受力和变形性能,将试件分两组,分别为均布荷载承压组(D组)和局部集中荷载承压组(L组)。D组试件模拟流动未固结混凝土在楼承板上的均布受力状况,此时混凝土不参与协同受力;L组试件模拟未浇筑混凝土时建筑工人手持作业设备在楼承板上踩踏的局部集中受力状况。

所有试件钢筋桁架的高度均为100 mm。由于700 mm

为一个完整楼承板单元的跨度,其中纤维水泥底板包含两个150 mm边缘和一个400 mm螺孔间距或两个200 mm的螺孔间距,因此试件底板长度为700 mm。纤维水泥底板宽度均为600 mm,厚度均为12 mm,为避免采用单一纤维材料所导致的试验结果的局限性,分别选取了B品牌的木质纤维水泥板与C品牌的木棉纤维水泥板。试件的主要变化参数为螺钉间距、桁架间距以及纤维底模板材料,其详细参数如表1所示。

表1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	加载组	加荷方式	荷载值/(kN·m <sup>-2</sup> )	试件跨度/mm	桁架间距/mm	螺钉间距/mm
DB3-2	D组	均布荷载	10.05	700	200	400
DB2-2	D组	均布荷载	10.05	700	300	400
DC3-2	D组	均布荷载	10.05	700	200	400
DC2-2	D组	均布荷载	10.05	700	300	400
LB3-3	L组	局部荷载	50.00	700	200	200
LB2-3	L组	局部荷载	50.00	700	300	200
LC3-3	L组	局部荷载	50.00	700	200	200
LC2-3	L组	局部荷载	50.00	700	300	200

## 1.2 试件材料性能

参照《纤维水泥制品试验方法》(GB/T 7019—2014)<sup>[18]</sup>,12 mm厚的纤维水泥底板在水中浸泡24 h达到饱水状态(图2a、b),在抗拉试验与三点抗折试验(图2c、d)后分别测得B品牌与C品牌纤维水泥板的抗折强度和弹性模量,如表2所示。

$$R = \frac{3PL}{2be^2} \quad (1)$$

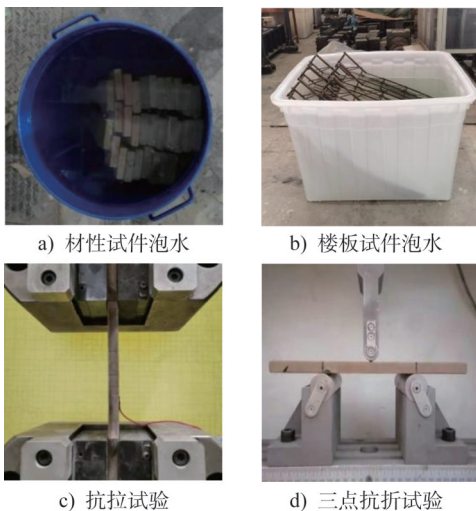


图2 试件泡水及材性试验

Fig. 2 Specimen soaked in water and material property tests

式中: $R$ 为抗折强度,单位为MPa; $P$ 为破坏荷载,单位为N; $L$ 为支距,单位为mm; $b$ 为试件断面宽度,单位为mm; $e$ 为试件断面厚度,单位为mm。

表2 纤维水泥板力学性能

Table 2 Mechanical properties of fiber cement slab

品牌	厚度/mm	方向	$R$ /MPa	弹性模量/GPa	泊松比
B	12	平行纵向	17.17	11.23	0.4
B	12	垂直纵向	14.91	9.23	0.4
C	12	平行纵向	22.32	10.50	0.4
C	12	垂直纵向	13.53	10.47	0.4
B	15	平行纵向	14.62	7.79	0.4
B	15	垂直纵向	12.04	7.60	0.4
C	15	平行纵向	16.05	6.14	0.4
C	15	垂直纵向	11.75	5.64	0.4

当纤维水泥板免拆底模受拉边缘正应力达到抗折强度时即发生折断破坏<sup>[5]</sup>,因此认为纤维水泥板在楼承板中呈脆性破坏特征。同时通过表2结果以及试验现象发现:随着纤维水泥板厚度的增加,其承载力有所提升但抗折强度却有所下降。

## 1.3 加载方案

在进行均布荷载承压试验时,考虑装配式楼承板在

混凝土浇筑过程中的受力情况为:首先底板承担全部荷载,再通过底板与钢筋桁架间的螺钉与连接件,将荷载全部传递至钢筋桁架,再由钢筋桁架将荷载传递至两端支撑上。为使荷载均匀分布于底板上,先在楼板试件上层铺设一层 120 mm 厚的细沙将桁架掩埋,然后在每两榀钢筋桁架之间均布铅块加载。参照 T/CECS 1069—2022<sup>[17]</sup>,取施工阶段荷载效应设计组合值为  $10.05 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 。试验采用分级加载方法,第 1 级用细沙加载  $0.399 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$  将桁架掩埋,之后参照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)<sup>[19]</sup>,采用铅块每级加载  $0.58 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ,共加载 12 级,最大荷载  $P_{\max}$  为  $10.37 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 3)。每级加载完成后,静置 2 min,待挠度变形稳定后采集挠度和应变数据,并逐级施加荷载至最大荷载  $P_{\max}$  后卸载。

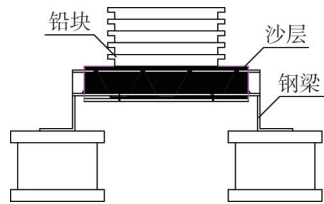


图 3 均布荷载承压试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of compression test under uniformly distributed load

在进行局部集中荷载承压试验时,参照 T/CECS 1069—2022<sup>[17]</sup>,取局部集中荷载为 1 kN。选取尺寸为  $80 \text{ mm}\times 250 \text{ mm}$  的垫片来控制加载面积,以模拟重量为 1 kN 的施工人员单脚踩踏楼承板的工况。通过在垫片上增加铅块的方式来逐级施加局部荷载,共 4 级,每级 0.25 kN,如图 4a) 所示。每级加载完成后,静置 1 min,待挠度变形稳定后采集挠度和应变数据,有特殊变化时观察并记录变化。如图 4b)、c) 中试件 LB3-3、LC3-3(3-3 组) 各有 2 种工况,试件 LB2-3、LC2-3(2-3 组) 各有 4 种工况。

### 1.4 测点布置

均布荷载承压试验中纤维水泥板的挠度与应变测点均位于跨中底部,钢筋桁架的应变测点位于上弦钢筋跨中上部。

局部集中荷载承压试验的挠度与应变测点均位于纤维水泥板底部。如图 5 所示,集中荷载试验时测点 D1~D6 测量试件挠度值,测点 A1~A6 测量试件应变值。

### 1.5 试验过程与现象

均布荷载承压试验过程中,可以观察到相邻两榀桁架中部底板和底板边缘处出现了轻微下挠,钢筋桁架有明显弯曲;局部集中荷载承压试验过程中,底板无明显现象,钢筋桁架出现轻微弯曲。两种试验过程中自攻螺钉

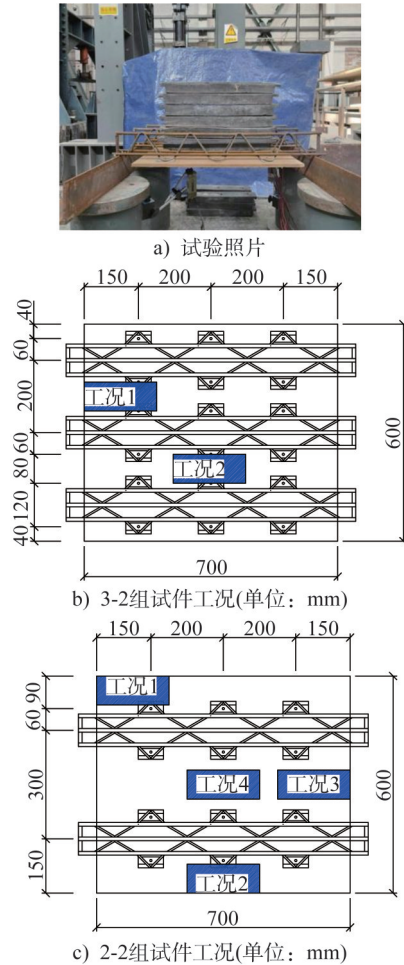


图 4 局部集中荷载承压试验照片及工况

Fig. 4 Compression test photograph and load cases under localized concentrated load

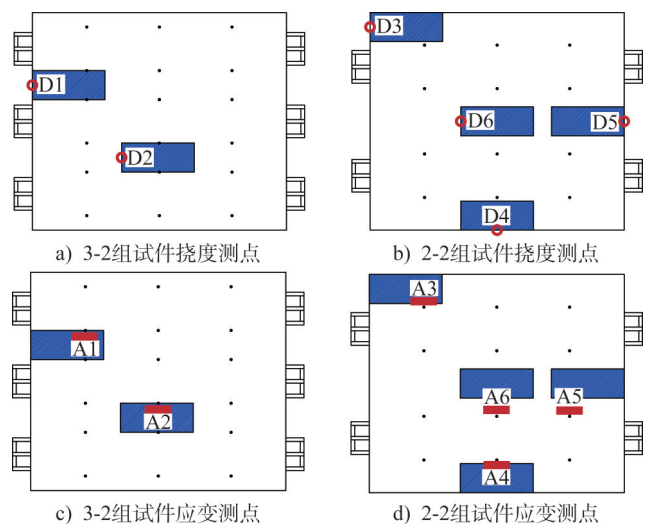


图 5 挠度与应变测点布置

Fig. 5 Arrangement of deflection and strain measuring points

连接良好,纤维水泥底板未出现明显的裂缝与破坏,钢筋桁架与底板均处于弹性阶段,卸载后无残余变形。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 均布荷载承压试验结果分析

参照 T/CECS 1069—2022<sup>[17]</sup>, 混凝土层厚度取 200 mm, 施工荷载取  $1.5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ , 荷载效应组合标准值为:

$$S_1 = S_s + S_c + S_q \quad (2)$$

荷载效应组合设计值为:

$$S_2 = 1.3S_s + 1.5S_c + 1.5S_q \quad (3)$$

式中:  $S_s$  为钢筋桁架楼承板和钢筋自重计算截面上产生的荷载效应标准值;  $S_c$  为混凝土自重计算截面上产生的荷载效应标准值;  $S_q$  为施工阶段可变荷载计算截面上产生的荷载效应标准值。因此, 荷载效应组合标准值  $S_1 = 6.73 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ , 荷载效应组合设计值  $S_2 = 10.05 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

试件的整体变形反映了楼承板的变形能力, 通过布置在楼板下方的位移计进行测量。图 6 为试件各位移测点处的荷载-位移曲线, 表 3 列出了各测点在目标组合荷载下的对应位移。根据 T/CECS 1069—2022<sup>[17]</sup> 要求, 预制板在楼板自重、混凝土自重及施工活荷载作用下的挠度限值为  $\min(L_0/180, 20)$ , 由于  $L_0/180 = 3.89 \text{ mm} < 20 \text{ mm}$ , 故  $\min(L_0/180, 20) = 3.89 \text{ mm}$ 。在荷载效应组合设计值  $S_2$  下, 采用 C 品牌纤维水泥底板的试件 DC2-2 的跨中挠度最大值为  $2.81 \text{ mm} < 3.89 \text{ mm}$ , 试件 DC3-2 的跨中挠度最大值为  $2.13 \text{ mm} < 3.89 \text{ mm}$ , 挠度变形均满足组合楼板规范要求。采用 B 品牌纤维水泥底板的试件 DB2-2 的跨中挠度最大值约为  $3.55 \text{ mm} < 3.89 \text{ mm}$ , 试件 DB3-2 的跨中挠度最大值为  $3.27 \text{ mm} < 3.89 \text{ mm}$ , 挠度变形同样满足规范要求。

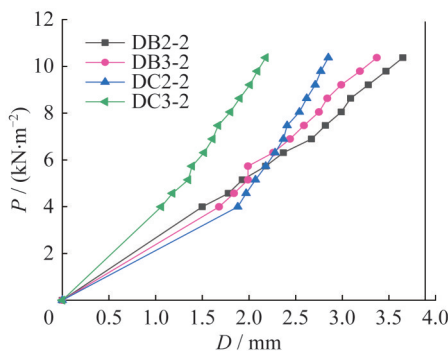


图 6 各试件均布荷载承压试验下荷载-位移曲线  
Fig. 6 Load-displacement curves of all specimens under uniformly distributed load compression test

在  $P_{\max}$  即试验荷载最大值  $10.37 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$  (施工活荷载达到  $1.71 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ) 作用下, 所有试件均未观测到裂缝产生。荷载与挠度基本呈线性关系, 说明试件基本处于弹性阶段。

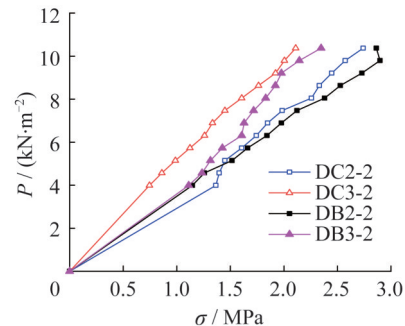
图 7 为纤维水泥底板与钢筋桁架上弦钢筋跨中荷载-应力曲线, 表 4 给出了各试件跨中位置在设计组合荷

表 3 试件跨中位置在目标组合荷载下的对应位移

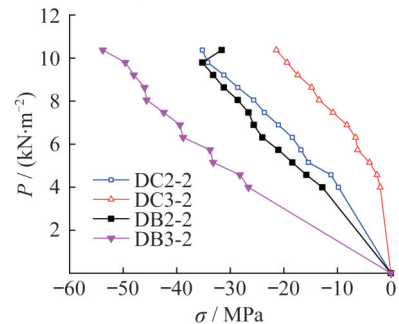
Table 3 Corresponding displacements of mid-span position of specimens with target combined load mm

荷载组合类型	DB2-2	DB3-2	DC2-2	DC3-2
标准组合 $6.73 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$	2.58	2.39	3.34	1.58
设计组合 $10.05 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$	3.55	3.27	2.81	2.13

载下的应力值。可以看出, 试验中纤维水泥板与钢筋桁架均处于弹性阶段, 荷载-应力曲线均呈线性上升趋势, 上弦钢筋上部跨中位置的应力均为负值, 对应测点处于受压状态; 而纤维水泥底板下部跨中位置的应力为正值, 对应测点处于受拉状态。而材性试验所得纤维水泥板抗折强度与 HRB400 抗压强度均远大于试验中  $S_2$  荷载下的应力值, 即在设计组合荷载  $10.05 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$  下, 试件承载力仍有较大的富余。上弦杆虽然压应力较大, 但并未达到失稳状态, 荷载与应力基本呈线性关系, 说明试件基本处于弹性状态。



a) 底板荷载-应力曲线



b) 上弦钢筋荷载-应力曲线

图 7 各试件均布荷载承压试验下荷载-应力曲线  
Fig. 7 Load-stress curves of all specimens under uniformly distributed load compression test

### 2.2 局部集中荷载承压试验结果分析

图 8 为试件各位移测点处的荷载-位移曲线, 表 5 列出了  $1 \text{ kN}$  局部集中荷载下各测点处对应的位移。可以看出, 加载值为  $1 \text{ kN}$  时, 楼承板受力性能表现良好, 荷

表4 设计组合荷载下试件应力值

**Table 4 Stress values of specimens under the design combined loads** MPa

应变测点位置	DB2-2	DB3-2	DC2-2	DC3-2
底板跨中	2.65	2.05	2.97	2.34
上弦钢筋跨中	-34.65	-20.30	-36.10	-51.48

载-位移曲线基本呈线性增长,结构处于弹性工作状态,尚未达到屈服阶段。由表5可知,试件LC3-3的D1测点,以及试件LC2-3的D3、D4、D5测点的最大位移均分别超出挠度限值3.9%、24.2%、82.5%和9.0%,其中试件LC2-3的D4测点的位移最大,达到了7.10 mm。但LB系列试件在各工况下的挠度均未超限,说明B品牌纤维水泥板对集中荷载的承载能力较差。D1测点挠度大于D2

测点挠度;D3、D4测点挠度大于D5、D6测点挠度。

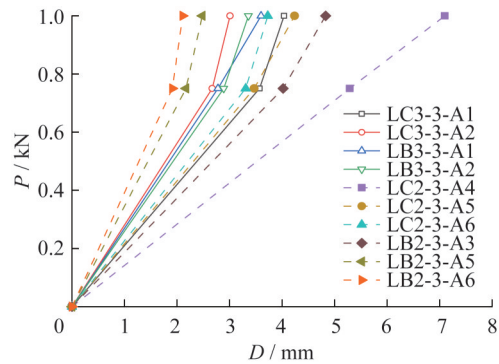


图8 各试件局部集中荷载承压试验下荷载-位移曲线  
Fig. 8 Load-displacement curves of all specimens under uniformly distributed load compression test

表5 测点最大位移

**Table 5 Maximum displacements of measuring points** mm

测点	LC3-3-D1	LC3-3-D2	LB3-3-D1	LB3-3-D2	LC2-3-D4
D	4.04	3.01	3.60	3.36	7.10
测点	LC2-3-D5	LC2-3-D6	LC2-3-D3	LB2-3-D5	LB2-3-D6
D	4.24	3.73	4.83	2.48	2.11

图9为各工况纤维水泥板底部测点的荷载-应变曲线,表6给出了各测点的最大拉(压)应力,可以看出,纤维水泥底板仍处于弹性阶段,荷载-应变曲线均呈线性上升趋势。测点A2、A6应变均为正值,对应位置受拉,而测点A1、A3、A4、A5应变为负值,对应位置受压。试件LB2-3上最大应力位于A6测点,应力值为3.89 MPa,试件LC2-3上最大应力同样位于A6测点,应力值为6.06 MPa,远小于纤维水泥板的边缘抗折应力。在每级加载中,纤维水泥底板与钢筋桁架的变形不明显,所有试件最终均未发生破坏,挠度和应变随荷载的增加基本呈线性增加趋势,表明在1 kN局部集中荷载下结构的稳定性和可靠度满足要求。

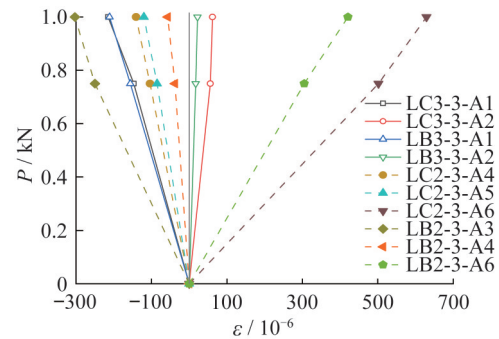


图9 各试件局部集中荷载承压试验下荷载-应变曲线  
Fig. 9 Load-stress curves of all specimens under uniformly distributed load compression test

PFCB-钢筋桁架楼承板在均布设计组合荷载10.05 kN·m<sup>-2</sup>作用下,满足T/CECS 1069—2022<sup>[17]</sup>要求的挠度限值。所测楼板试件在设计组合荷载作用下,挠度和应力均未达到材料极限强度,总体上试验

材料和结构挠度满足相关要求,表现出良好的受力性能。在1 kN局部集中荷载作用下,部分水泥纤维板未达到挠度限制要求,但材料性能表现良好,满足结构要求。

表6 测点最大拉(压)应力

**Table 6 Maximum tensile (compressive) stresses of measuring points** MPa

测点	LC3-3-A1	LC3-3-A2	LB3-3-A1	LB3-3-A2	LC2-3-A4
σ	-2.26	0.65	-1.95	0.20	-1.48
测点	LC2-3-A5	LC2-3-A6	LC2-3-A3	LB2-3-A5	LB2-3-A6
σ	-1.26	6.06	-2.80	-0.52	3.89

### 3 有限元模拟与验证

#### 3.1 有限元模型建立

采用ABAQUS有限元分析软件对各试件进行模拟分析。由于钢筋桁架在施工阶段处于弹性阶段,因此其中的上下弦钢筋、腹杆钢筋采用理想弹塑性模型,纤维水泥板、螺钉与连接件的本构关系采用理想型弹塑性本构模型。

所研究的PFCB-钢筋桁架楼承板共由4部分组成:纤维水泥底板、自攻螺钉、连接件、钢筋桁架。其中纤维水泥底板与自攻螺钉选取Soild单元(C3D8R)模拟,钢筋桁架的腹杆钢筋与端部钢筋采用三维Truss单元(T3D2)模拟,上、下弦钢筋与弯起钢筋采用三维线性Beam单元(B31)模拟。在模型中,采用Mesh模块中的六面体结构化网格划分方式。

纤维水泥底板与连接件之间采用面与面的摩擦接触,同时考虑底板与连接件界面间切线方向和法线方向的关系,将法线方向定义为“硬接触”,切线方向定义为摩擦接触,摩擦系数取0.6<sup>[20]</sup>。自攻螺钉与底板、自攻螺钉与连接件以及连接件与弯起钢筋之间的接触均采用Tie约束<sup>[21]</sup>。

与试验相同,为模拟施工阶段的最不利工况,即施工阶段初期,楼承板上方的混凝土还处于流动状态,此时混凝土对下方楼承板只施加重力作用,而并未一起协同受力。因此,有限元模拟未涉及PFCB-钢筋桁架楼承板与混凝土之间的黏结性能以及不同材料之间的界面相互作用。

为了准确模拟试验中试件的边界条件,同时确保计算的收敛性,如图10所示,在有限元模型中选中与下弦钢筋连接的端部钢筋,约束两侧直线的 $U_y$ 与 $U_z$ ;约束上下弦钢筋端部 $U_{Rx}$ ,这样就达到了试验楼承板两边铰支的效果。

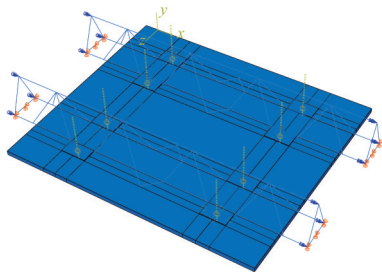


图10 DC2-2有限元模型

Fig. 10 Finite element model of DC2-2

#### 3.2 有限元模型验证与分析

通过ABAQUS有限元软件的计算和分析,可以得到尺寸为700 mm×600 mm楼承板构件的应力云图。选取典型试件DC2-2,其应力云图如图11所示。可以看出,纤维

水泥底板应力较大的位置位于螺孔周边与跨中位置,最大应力点位于螺栓孔周边;挠度较大位置从跨中延伸至底板的角部,而挠度最大位置位于底板跨中的边缘部位,与试验中观察到的现象相同。

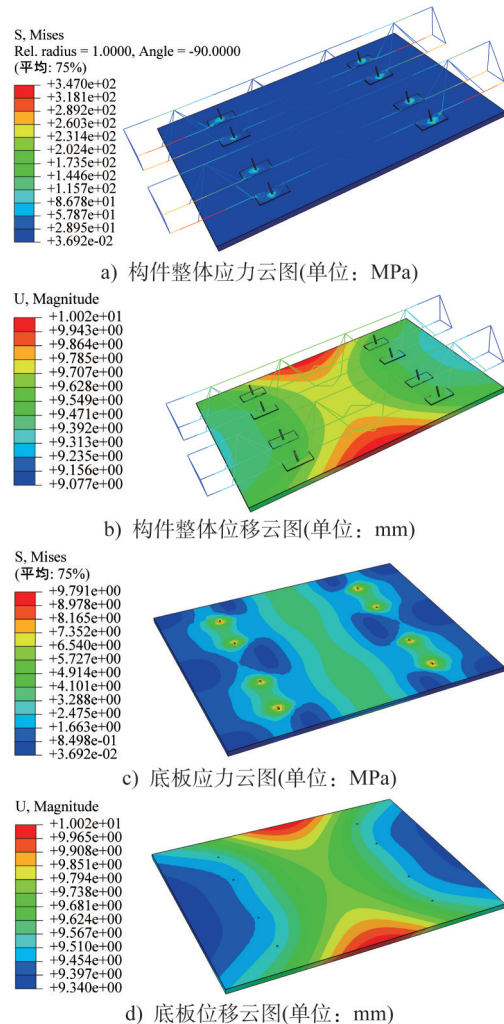


图11 试件DC2-2有限元云图

Fig. 11 Finite element contours of specimen DC2-2

图12a)给出了试件DB2-2底板跨中与上弦钢筋跨中的荷载-应变曲线,可以看出,楼承板底板跨中最大应变在有限元模拟中为 $2.85 \times 10^{-4}$ ,在试验中为 $2.75 \times 10^{-4}$ ;上弦钢筋跨中最大应变在有限元模拟中为 $-2.31 \times 10^{-4}$ ,在试验中为 $-1.86 \times 10^{-4}$ 。图12b)给出了试件DB2-2底板跨中的荷载-位移曲线,可以看出,在有限元模拟中,最大荷载 $P_{max}$ 为 $10.37 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,楼承板底板对应跨中挠度为3.42 mm;在试验中,最大荷载达到了 $10.37 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ,对应跨中挠度为3.69 mm。其中,楼承板底板位移与应变的模拟结果与试验实测数据分别相差-7.32%、3.64%。

综上,有限元计算得到的荷载-位移曲线以及对应的参数特征值均与试验结果吻合较好,说明本文采用的有限元分析方法能够较准确地模拟饱水状态下PFCB-钢

筋桁架楼承板施工阶段的受力性能,可进行后续受力性能的有限元参数分析。

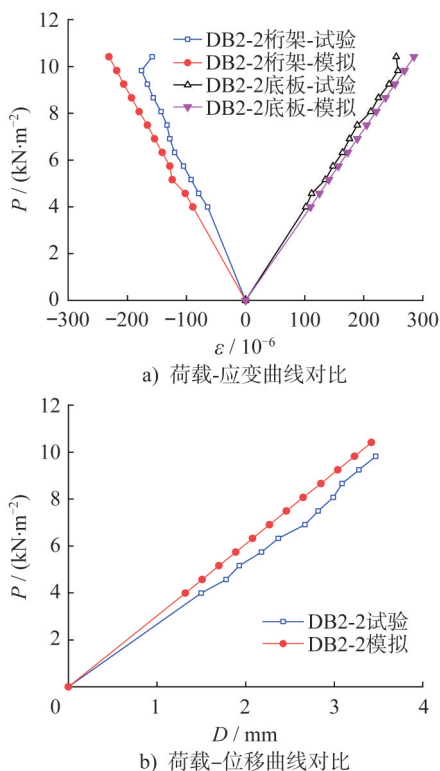


图12 试件DB2-2有限元模拟与试验实测结果对比

Fig. 12 Comparison between finite element simulation and experimental measurement results of specimen DB2-2

当加载至  $11.53 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$  时,底板跨中部位的挠度最大值为  $3.89 \text{ mm}$ ,达到规范所规定的挠度极限,此时施工活荷载为  $2.48 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 。如图13所示,当加载至  $16.75 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$  时,螺孔周围底板应力达到  $14.9 \text{ MPa}$ ,受拉边缘正应力达到抗折强度,发生折断破坏,且由于纤维水泥板属于脆性材料,因此此时底板不再参与受力,楼承板达到承载力极限。

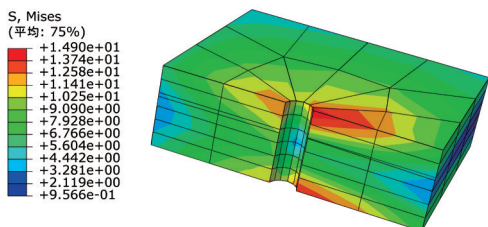


图13 底板与自攻螺钉接触位置剖面应力云图(单位:MPa)

Fig. 13 Contact interface section stress contour of slab and self-tapping screw (unit: MPa)

#### 4 承载力影响因素分析

采用第3节中的ABAQUS有限元建模方法,分析上

弦钢筋直径、下弦钢筋直径、桁架高度、螺钉间距,纤维板底板厚度对饱水状态下PFCB-钢筋桁架楼承板施工阶段承载力的影响。选用  $3600 \text{ mm}$  的板长进行研究,根据 T/CECS 1069—2022<sup>[17]</sup> 中荷载引起的挠度限值为  $\min(L_0/180, 20)$ ,文中取跨中位移  $20 \text{ mm}$  作为PFCB-钢筋桁架楼承板有限元模型的位移限值,楼板局部应力  $14.9 \text{ GPa}$  作为有限元模型的应力限值。

建立基本模型M1(图14),上弦及下弦钢筋均采用HRB400,弹性模量为  $200 \text{ GPa}$ ;预制底板采用纤维水泥压力板,弹性模量为  $10 \text{ GPa}$ ,抗折强度为  $14.9 \text{ GPa}$ ;跨度为  $3600 \text{ mm}$ ,自攻螺钉间距为  $200 \text{ mm}$ ,桁架中心间距为  $300 \text{ mm}$ ,桁架高度为  $100 \text{ mm}$ ,上下弦钢筋直径为  $10 \text{ mm}$ ,板厚为  $12 \text{ mm}$ 。按 T/CECS 1069—2022<sup>[17]</sup> 中给出的边界支撑方式对上下弦钢筋进行绑定,绑定长度分别不小于  $1.6L_a$  和  $1.2L_a$ ,其中  $L_a$  为锚固长度,并对底板与梁搭接边缘施加  $U_y$  方向的约束。

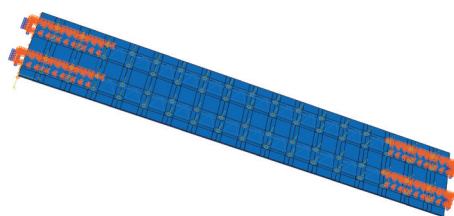


图14 M1有限元模型

Fig. 14 Finite element model of M1

#### 4.1 螺钉间距

在模型M1的基础上保持其他参数不变,将自攻螺钉间距由  $200 \text{ mm}$  变为  $400 \text{ mm}$ ,建立模型M2,分析螺钉间距对楼承板承载力的影响。

图15为模型的跨中荷载-位移曲线,表7给出了螺钉间距对楼承板承载力的影响,可以看出,对于PFCB-钢筋桁架楼承板,桁架与底板的螺钉间距从  $200 \text{ mm}$  增大为  $400 \text{ mm}$  时,最大承载力降低了  $21.1\%$ ,最大挠度增加了  $23\%$ ,且2条曲线斜率变化较大,表明模型达到破坏前,改变水泥纤维板和桁架的自攻螺钉间距对PFCB-钢筋桁架楼承板的承载力及刚度影响较大。

从图16桁架与底板之间变形云图可以看出,达到极限承载力前,部分区域的钢筋桁架与底板变形已不协同,桁架的刚度不能很好地传递至底板上,因此在一定范围内减小螺钉间距可以使钢筋桁架与底板一起协同受力,从而提高楼承板的整体承载力与刚度。为此,建议将自攻螺钉间距控制在  $200 \text{ mm}$  以内。

#### 4.2 桁架尺寸

桁架中心间距与桁架高度是影响楼承板承载力的主要尺寸参数。在模型M1的基础上保持其他参数不变,

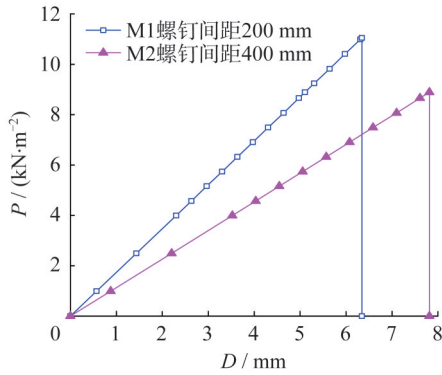


图 15 不同螺钉间距下模型跨中荷载-位移曲线

Fig. 15 Mid-span load-displacement curves of models with different screw spacings

表 7 螺钉间距对承载力的影响

Table 7 Influence of screw spacings on bearing capacity

螺钉间距/ mm	$P_{max}/$ ( $kN \cdot m^{-2}$ )	$D_{max}/$ mm	$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$
200	11.01	6.35	—	—
400	8.69	7.81	-21.1	23.0

注： $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 分别为各模型与模型M1的承载力和最大挠度差异。

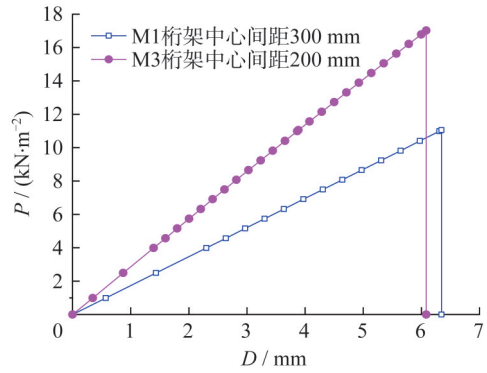


图 17 不同桁架中心间距下模型跨中荷载-位移曲线

Fig. 17 Mid-span load-displacement curves of models with different center spacing of trusses

表 8 桁架中心间距对承载力的影响

Table 8 Influence of center spacing of trusses on bearing capacity

桁架中心 间距/mm	$P_{max}/$ ( $kN \cdot m^{-2}$ )	$D_{max}/$ mm	$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$
300	11.01	6.35	—	—
200	16.99	6.08	54.3	-4.3

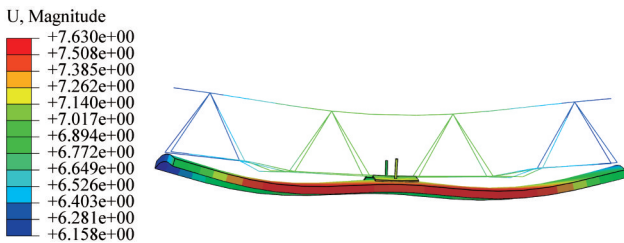


图 16 桁架与底板之间变形云图(单位: mm)

Fig. 16 Displacement contour between truss and slab (unit: mm)

将上部钢筋桁架中心间距由 300 mm 变为 200 mm, 建立模型 M3, 分析桁架中心间距对楼承板承载力的影响。在模型 M1 的基础上保持其他参数不变, 只改变钢筋桁架的高度, 分别建立模型 M4、M5, 分析桁架高度对承载力的影响。

图 17 为不同桁架中心间距模型的跨中荷载-位移曲线, 表 8 给出了桁架中心间距对楼承板承载力的影响。可以看出, 对于 PFCB-钢筋桁架楼承板, 当桁架中心间距从 300 mm 减小为 200 mm 时, 最大承载力提升了 54.3%, 最大挠度减小了 4.3%, 即桁架中心间距减小, 楼承板的承载力明显提高。而且桁架中心间距为 300 mm 的楼承板的荷载-位移曲线斜率相对较小, 说明随着桁架中心间距的减小, 楼承板的承载力与刚度明显增大。

不同桁架高度下模型的跨中荷载-位移曲线如图 18 所示, 表 9 给出了桁架高度对楼承板承载力的影响。可以看出, 对于 PFCB-钢筋桁架楼承板, 桁架高度从 100 mm 减小为 80 mm 时, 最大承载力降低了 11.1%, 最大挠度增加了 3.5%; 桁架高度从 100 mm 增加为 120 mm 时, 最大承载力提升了 6.3%, 最大挠度增加了 0.5%。可见随着钢筋桁架高度的增加, 楼承板的承载力提高。当桁架高度从 100 mm 增加为 120 mm 时, 楼承板的承载力增幅小于桁架高度从 80 mm 增加为 100 mm 时的承载力增幅, 分析认为该现象与钢筋桁架的构造有关, 即腹杆与上下弦钢筋的夹角会影响钢筋桁架的抗弯性能。因此, 在设计钢筋桁架时, 应考虑上下弦钢筋与腹杆的夹角。

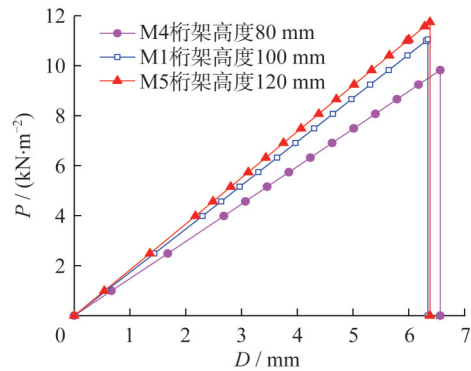


图 18 不同桁架高度下模型跨中荷载-位移曲线

Fig. 18 Mid-span load-displacement curves of models with different truss heights

表9 桁架高度对承载力的影响

Table 9 Influence of truss heights on bearing capacity

桁架高度/ mm	$P_{max}/$ ( $kN \cdot m^{-2}$ )	$D_{max}/$ mm	$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$
80	9.79	6.57	-11.1	3.5
100	11.01	6.35	—	—
120	11.70	6.38	6.3	0.5

### 4.3 钢筋直径

分析上、下弦钢筋直径对楼承板承载力的影响,在模型M1的基础上保持其他参数不变,只改变桁架上弦钢筋的直径,建立模型M6、M7,只改变桁架下弦钢筋的直径,建立模型M8、M9。

不同上弦钢筋直径模型的跨中荷载-位移曲线如图19a)所示,表10给出了上弦钢筋直径对楼承板承载力的影响,对于PFCB-钢筋桁架楼承板,上弦钢筋直径从10 mm减小为8 mm以及从10 mm增加为12 mm时,楼承板的最大承载力并无明显变化。但上弦钢筋直径从10 mm减小为8 mm时,楼承板最大挠度增加了13.7%;上弦钢筋直径从10 mm增加为12 mm时,楼承板最大挠度减小了9%。不同下弦钢筋直径模型的跨中荷载-位移曲线如图19b)所示,表11给出了下弦钢筋直径对楼承板承载力的影响,可以看出,对于PFCB-钢筋桁架楼承板,下弦钢筋直径从10 mm减小为8 mm时,最大承载力降低了20.1%,最大挠度增加了0.5%;钢筋直径从10 mm增加为12 mm时,最大承载力提升了26.3%,最大挠度增加了4.6%。

由此可见,上弦钢筋直径对楼承板最大承载力的影响并不显著,但随着上弦钢筋直径的增加,楼承板的刚度提高。下弦钢筋直径的增加能够有效提高PFCB-钢筋桁架楼承板的最大承载力。这是因为下弦钢筋是主要受力钢筋,钢筋直径的增加有效地提高了下弦钢筋的抗弯承载力。

### 4.4 纤维水泥底板厚度

在模型M1的基础上保持其他参数不变,将纤维水泥底板厚度由12 mm增加为15 mm,建立模型M10,同时改变相应的纤维水泥材料性能参数,分析纤维水泥底板厚度对楼承板承载力的影响。

图20为模型的跨中荷载-位移曲线,表12给出了纤维水泥底板厚度对楼承板承载力的影响。可以看出,对于PFCB-钢筋桁架楼承板,纤维水泥底板厚度由12 mm增加为15 mm时,最大承载力提升了8.4%,最大挠度增加了8.2%,即更换较大厚度的纤维水泥板,楼承板的承载力有一定提高。从图20可以看出,2条曲线的斜率变化非常小,表明在PFCB-钢筋桁架楼承

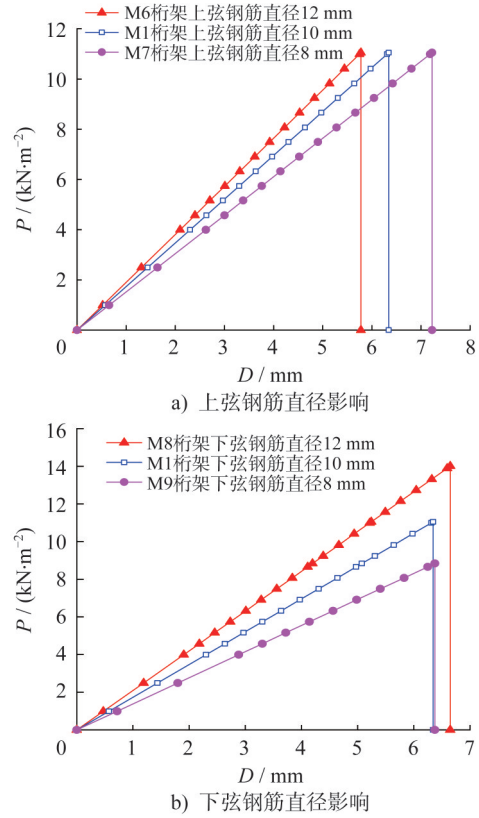


图19 不同上下弦钢筋直径下模型跨中荷载-位移曲线  
Fig. 19 Mid-span load-displacement curves of models with different upper and lower chord bar diameters

表10 上弦钢筋直径对承载力的影响

Table 10 Influence of upper chord bar diameters on bearing capacity

钢筋直径/ mm	$P_{max}/$ ( $kN \cdot m^{-2}$ )	$D_{max}/$ mm	$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$
8	11.00	7.22	0	13.7
10	11.01	6.35	—	—
12	11.12	5.78	1.0	-9.0

表11 下弦钢筋直径对承载力的影响

Table 11 Influence of lower chord bar diameters on bearing capacity

钢筋直径/ mm	$P_{max}/$ ( $kN \cdot m^{-2}$ )	$D_{max}/$ mm	$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$
8	8.80	6.38	-20.1	0.5
10	11.01	6.35	—	—
12	13.91	6.64	26.3	4.6

板破坏前,不同厚度的纤维水泥板对其承载力的影响非常相似。

但从表2可知,纤维水泥板的材性特点为随着厚度

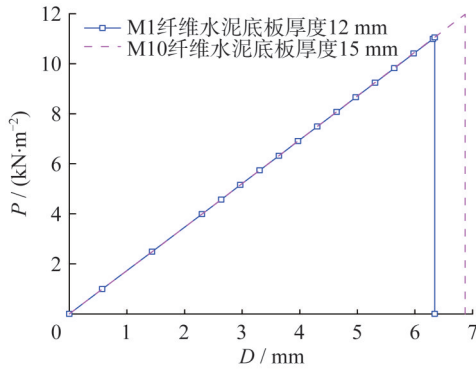


图20 不同纤维水泥底板厚度下模型跨中荷载-位移曲线  
Fig. 20 Mid-span load-displacement curves of models with different fiber cement slab thicknesses

表12 纤维水泥底板厚度对楼承板承载力的影响  
Table 12 Influence of fiber cement slab thicknesses on bearing capacity

底板厚度/ mm	$P_{max}/$ ( $kN \cdot m^{-2}$ )	$D_{max}/$ mm	$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$
12	11.01	6.35	—	—
15	11.94	6.87	8.4	8.2

的增加,虽然承载力有所提升但抗折强度却有所下降,因此在考虑提升PFCB-钢筋桁架楼承板的承载力时,单纯选用较厚纤维水泥底板的提升效果并不显著。

#### 4.5 用钢量影响因素分析

为探究不同承载力因素下,用钢量  $m$  的变化对

PFCB-钢筋桁架楼承板承载力的影响,计算模型M1~M9的用钢量,分析提高每千克用钢量所提升的承载力,提出计算用钢量承载力影响系数公式:

$$K_\delta = \left| \frac{\delta}{\zeta} \right| \quad (4)$$

式中: $\delta$ 为用钢量差值; $\zeta$ 为承载力差值; $K_\delta$ 为用钢量承载力影响系数,单位为  $m \cdot g \cdot N^{-1}$ 。

从图21、表13可以看出,改变螺钉间距与钢筋桁架高度时,每千克用钢量的增加对承载力的提升较大且  $K_\delta > 1.00 m \cdot g \cdot N^{-1}$ 。当螺钉间距由400 mm减小为200 mm时,  $K_\delta$ 为1.65  $m \cdot g \cdot N^{-1}$ ;当桁架高度由80 mm增加为100 mm时,  $K_\delta$ 为2.23  $m \cdot g \cdot N^{-1}$ ;当桁架高度由100 mm增加为120 mm时,  $K_\delta$ 为1.18  $m \cdot g \cdot N^{-1}$ 。

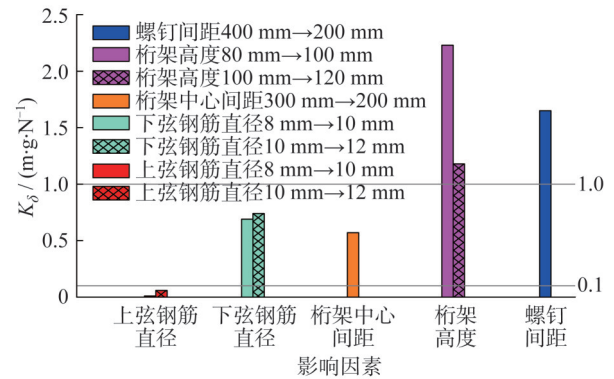


图21 不同因素下每千克用钢量对承载力影响的柱状图  
Fig. 21 Bar chart illustrating the influence of different factors on load-bearing capacity per kilogram of steel consumption

表13 不同因素下用钢量对承载力的影响

Table 13 Influence of steel consumption on load-bearing capacity under various factors

因素	模型编号	$m/kg$	$\delta/kg$	$\zeta/(kN \cdot m^{-2})$	$K_\delta/(m \cdot g \cdot N^{-1})$	影响等级
螺钉间距	M1	22.52	—	—	—	
	M2	21.11	-1.41	-2.32	1.65	
桁架高度	M4	21.97	—	—	—	I ( $K_\delta > 1.00$ )
	M1	22.52	0.55	1.22	2.23	
	M5	23.10	0.58	0.69	1.18	
桁架中心间距	M1	22.52	—	—	—	
	M3	33.01	10.49	5.98	0.57	
	M8	19.31	—	—	—	II ( $0.10 < K_\delta < 1.00$ )
下弦钢筋直径	M1	22.52	3.20	2.21	0.69	
	M9	26.42	3.91	2.90	0.74	
上弦钢筋直径	M6	20.91	—	—	—	
	M1	22.52	1.60	0.01	0.01	III ( $K_\delta < 0.10$ )
	M7	24.47	1.95	0.11	0.06	

改变桁架中心间距与下弦钢筋直径时,每千克用钢量的增加对承载力的提升次之, $0.10 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1} < K_{\phi} < 1.00 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1}$ 。桁架中心间距由 300 mm 减小为 200 mm 时, $K_{\phi}$  为  $0.57 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1}$ ;下弦钢筋直径由 8 mm 增加为 10 mm 时, $K_{\phi}$  为  $0.69 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1}$ ;下弦钢筋直径由 10 mm 增加为 12 mm 时, $K_{\phi}$  为  $0.74 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1}$ 。

改变桁架上弦钢筋直径时,每千克用钢量的增加对承载力的提升较小, $K_{\phi} < 0.10 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1}$ 。上弦钢筋直径由 8 mm 增加为 10 mm 时, $K_{\phi}$  为  $0.01 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1}$ ;上弦钢筋直径由 10 mm 增加为 12 mm 时, $K_{\phi}$  为  $0.06 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1}$ 。

如表 13 所示,将影响 PFCB-钢筋桁架楼承板的因素分为 3 个等级:螺钉间距与桁架高度为 I 级,桁架中心间距与下弦钢筋直径为 II 级,上弦钢筋直径为 III 级。I 级 ( $K_{\phi} > 1.00 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1}$ ) 每千克用钢量对承载力的影响最大;II 级 ( $0.10 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1} < K_{\phi} < 1.00 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1}$ ) 次之;III 级 ( $K_{\phi} < 0.10 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1}$ ) 每千克用钢量对承载力的影响较小。

## 5 结论

(1) PFCB-钢筋桁架楼承板在均布设计组合荷载作用下,满足 T/CECS 1069—2022 要求的挠度限值。所测试件在设计组合荷载作用下的挠度和应力均未达到材料极限强度,表现出良好的受力性能。在局部集中荷载作用下,各部件材料性能表现良好,满足结构要求。

(2) 有限元模拟结果与试验结果较为接近,验证了试件变形及应力值均满足相关规范要求,且各试件在施工阶段均处于弹性工作状态。当发生破坏时,破坏位置位于纤维水泥底板螺孔周围。跨度为 3 600 mm 的有限元模型均能满足标准组合荷载作用下的挠度要求,且最大挠度为 6~8 mm。

(3) 减小水泥纤维板与钢筋桁架的自攻螺钉间距,可以充分利用钢筋桁架的刚度,增强 PFCB-钢筋桁架楼承板的整体受力性能;增大钢筋桁架高度可以提升楼承板的承载力,但应考虑腹杆与上下弦钢筋的夹角;下弦钢筋是主要受力钢筋,增大下弦钢筋直径对楼承板的刚度和承载力都有较大提升;上弦钢筋主要影响楼承板的刚度,对承载力的影响不显著;将纤维水泥底板厚度由 12 mm 增大为 15 mm 对楼承板抗弯性能的影响并不显著。

(4) 提出计算用钢量承载力影响系数  $K_{\phi}$ 。影响结构承载力的主要因素中,螺钉间距与桁架高度的影响最大, $K_{\phi} > 1.00 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1}$ ;桁架中心间距与下弦钢筋直径的影响次之, $0.10 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1} < K_{\phi} < 1.00 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1}$ ;上弦钢筋直径的影响较小, $K_{\phi} < 0.10 \text{ m}\cdot\text{g}\cdot\text{N}^{-1}$ 。建议在优化类似钢筋桁架楼承板结构形式以提升承载力时,优先考虑减小螺钉间距以及增加钢筋桁架高度。

## 参考文献:

- [1] 王腾,王建烁,陈志华,等.装配式预制楼板研究现状与发展趋势[C]//第二十三届全国现代结构工程学术研讨会论文集.兰州:[出版者不详],2023.  
WANG Teng, WANG Jianshuo, CHEN Zhizhua, et al. Research status and development trend of assembled prefabricated floor slab [C]//Proceedings of the 23rd National Symposium on Modern Structural Engineering. Lanzhou:[s.n.],2023.(in Chinese)
- [2] 杨文菲.钢筋桁架楼承板在超高层建筑中的应用[J].建筑技术,2023,54(1):92-95.DOI:10.3969/j.issn.1000-4726.2023.01.023.  
YANG Wenfei.Application of steel truss floor deck in super high-rise buildings [J]. Architecture Technology, 2023, 54(1): 92-95. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4726.2023.01.023. (in Chinese)
- [3] 焦渊.闭口式压型钢板-钢筋桁架组合楼承板体系研究[D].淮南:安徽理工大学,2017.  
JIAO Yuan.Study on the system of composite slab based on flat profile and steel-bars truss[D].Huainan: Anhui University of Science & Technology,2017.(in Chinese)
- [4] 贾斌,吴体,魏明宇,等.新型自承式钢筋桁架楼承板体系施工阶段力学性能研究[J].建筑结构进展,2019,21(2):56-63.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.02.007.  
JIA Bin, WU Ti, WEI Mingyu, et al. The mechanical behavior of a new steel-bar truss slab in construction [J]. Progress in Steel Building Structures, 2019, 21(2): 56-63. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.02.007.(in Chinese)
- [5] 周剑,王欢欢,田春雨,等.免拆底模钢筋桁架楼承板设计方法研究[J].建筑结构,2022,52(增刊1):1450-1458.DOI:10.19701/j.jzjg.22S1449.  
ZHOU Jian, WANG Huanhuan, TIAN Chunyu, et al. Study on design method of steel-bars truss decks with permanent bottom form [J]. Building Structure, 2022, 52(Suppl.1): 1450-1458. DOI: 10.19701/j.jzjg.22S1449. (in Chinese)
- [6] 张翠玉.纤维水泥底板模钢筋桁架楼承板受力性能研究[D].济南:山东建筑大学,2022.  
ZHANG Cuiyu. Study on mechanical performance of fiber-cement board bottom membrane reinforced floor board [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022. (in Chinese)
- [7] 孙彤彤,常卫华,雷强,等.装配式钢筋桁架楼承板力学性能试验及理论研究[J].建筑科学,2022,38(11):105-111.DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2022.11.014.  
SUN Tongtong, CHANG Weihua, LEI Qiang, et al. Experimental and theoretical study on mechanical properties of assembled truss deck [J]. Building Science, 2022, 38(11): 105-111. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2022.11.014. (in Chinese)
- [8] TIAN L M, KOU Y F, HAO J P, et al. Flexural performance of a lightweight composite floor comprising cold-formed steel

- trusses and a composite mortar slab[J].Thin-Walled Structures, 2019, 144:106361.DOI:10.1016/j.tws.2019.106361.
- [9] QI J R, YANG H C.Improvement of a truss-reinforced, half-concrete slab floor system for construction sustainability[J].Sustainability, 2021, 13(7):3731.DOI:10.3390/su13073731.
- [10] DIZDAR Ç, BARAN E, TOPKAYA C. Strength and stiffness of floor trusses fabricated from cold-formed steel lipped channels[J].Engineering Structures, 2019, 181: 437-457.DOI:10.1016/j.engstruct.2018.12.041.
- [11] FLINT G, USMANI A, LAMONT S, et al.Effect of fire on composite long span truss floor systems [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(4): 303-315.DOI: 10.1016/j.jcsr.2005.08.002.
- [12] CHANG J, BUCHANAN A H, MOSS P J. Effect of insulation on the fire behaviour of steel floor trusses[J].Fire and Materials, 2005, 29(4):181-194.DOI:10.1002/fam.874.
- [13] 郝祯. 钢管混凝土柱和钢筋桁架楼承板耐火性能研究[D].北京:北京建筑大学, 2021.  
HAO Zhen. Study on fire resistance of concrete filled steel tubular column and steel-bars truss deck[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021. (in Chinese)
- [14] KANG J G, KIM K, LIM Y M, et al.Modeling of fiber-reinforced cement composites: discrete representation of fiber pullout[J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51(10): 1970-1979.DOI:10.1016/j.ijstr.2014.02.006.
- [15] WEN S H, CHUNG D D L.Model of piezoresistivity in carbon fiber cement[J].Cement and Concrete Research, 2006, 36(10): 1879-1885.DOI:10.1016/j.cemconres.2006.03.029.
- [16] TORRENTS J M, MASON T O, GARBOCZI E J.Impedance spectra of fiber-reinforced cement-based composites: a modeling approach[J].Cement and Concrete Research, 2000, 30(4): 585-592.DOI:10.1016/S0008-8846(00)00211-8.
- [17] 中国工程建设标准化协会. 钢筋桁架楼承板应用技术规程: T/CECS 1069—2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.  
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Application of Steel-Bars Truss Deck: T/CECS 1069—2022[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.(in Chinese)
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纤维水泥制品试验方法: GB/T 7019—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Test Methods for Fiber Cement Products: GB/T 7019—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.(in Chinese)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Test Method of Concrete Structures: GB/T 50152—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.(in Chinese)
- [20] 张宇, 冯子才, 李海旺. 压型钢板组合楼承板承载力的有限元分析[J]. 钢结构, 2002, 17(6): 48-50.  
ZHANG Yu, FENG Zicai, LI Haiwang. Finite element analysis of load bearing capacity of composite slabs with profiled steel sheet[J]. Steel Construction, 2002, 17(6): 48-50.(in Chinese)
- [21] 朱春光. 考虑栓钉影响的闭口型压型钢板组合楼承板纵剪性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
ZHU Chunguang. Longitudinal shear behaviour of flat profile-concrete composite slabs with end studs[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.(in Chinese)