

# 预应力混凝土钢管桁架叠合底板受力性能研究

吕 晓<sup>1,2</sup>, 贾广皓<sup>1,2</sup>, 张 鑫<sup>1,2</sup>, 王 顺<sup>3</sup>

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101; 2. 建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 山东 济南 250101;  
3. 山东省医药工业设计院有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:** 为研究预应力混凝土钢管桁架叠合底板受力性能及各个结构要素对预应力混凝土钢管桁架叠合底板整体受力性能的影响, 采用 ABAQUS 有限元软件建立模型并对数据进行分析, 计算得出叠合底板试件的荷载-跨中挠度曲线关系, 并将有限元计算的数据与既有试验数据进行了对比。发现有限元软件计算模拟的荷载-跨中挠度曲线关系变化与试验测得数据基本一致, 在此基础上, 研究了钢管直径、钢管壁厚、底板跨度、预应力筋数量、预应力大小、混凝土强度、砂浆强度等因素对预制板承载力的影响。研究结果表明: 预应力大小、钢管壁厚、预应力筋数量、灌浆料强度、叠合板跨度对叠合板承载力影响较大, 混凝土强度对叠合板承载力影响较小。

**关键词:** 预应力; 钢管桁架; 预制底板; 有限元模型; 参数分析

**中图分类号:** TU378; TU398.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2023)06-0791-10

## Study on mechanical behavior of prestressed concrete steel tube truss composite slab

LÜ Xiao<sup>1,2</sup>, JIA Guanghao<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1,2</sup>, WANG Shun<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;  
2. Key Laboratory of Building Structural Retrofitting and Underground Space Engineering  
(Shandong Jianzhu University), Ministry of Education, Jinan 250101, China;  
3. Shangdong Pharmaceutical Industry Design Institute Co. Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical performance of the composite floor of prestressed concrete-filled steel tube truss and the influence of various structural elements on the overall mechanical performance of the composite floor of prestressed concrete-filled steel tube truss, the model is established by using ABAQUS finite element software, the data are analyzed, the load midspan deflection curve relationship of the composite floor specimen is calculated, and the finite element calculation data is compared with the existing test data. The results show that the variation of load mid span deflection curve calculated and simulated by finite element software is basically consistent with the experimental data. On this basis, the effects of steel pipe diameter, steel pipe wall thickness, base slab span, number of prestressed reinforcements, prestress size, concrete strength and mortar strength on the bearing capacity of precast slab are studied. The results show that the size of prestress, the wall thickness of steel pipe, the number of prestressed tendons, the strength of grouting material and the span of composite slab have a great influence on the bearing capacity of composite slab, and the strength of concrete has a small influence on the bearing capacity of composite slab.

**Key words:** prestress; steel pipe truss; precast base slab; finite element model; parameter analysis

现阶段我国大力推广装配式建筑, 装配式建筑具有生产效率高、绿色环保等特点, 预制混凝土叠合板是装配式建筑的一个重要组成构件, 具有整体性强、抗震性好、施工方便等优良特点,

收稿日期: 2022-10-10 修回日期: 2023-12-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (52038006); 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2021ME190); 山东省高校土木结构防灾减灾协同创新中心基金项目 (XTP201919)

第一作者: 吕 晓(1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事钢-混凝土组合结构抗火及火灾后力学性能等方面研究。E-mail: xiaolv\_seu@126.com

通信作者: 张 鑫(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事既有结构加固改造等方面的研究。E-mail: zhangxin@sdjzu.edu.cn

在装配式建筑中应用较为广泛。

针对叠合板构件的力学性能,众多研究者做了大量的试验,于敬海<sup>[1]</sup>研究了“二阶段受力”对预应力混凝土钢管桁架叠合板整体受力性能的影响。夏立鹏<sup>[2]</sup>通过堆载试验探究了带裂缝的钢筋桁架叠合板裂缝宽度、裂缝发展和应变情况。李静斌<sup>[3]</sup>推导了新型钢筋桁架混凝土叠合板在施工阶段和使用阶段的短期刚度计算公式。于秋波<sup>[4]</sup>展开了桁架钢筋混凝土叠合板预制底板的脱模吊装过程试验。杨超望<sup>[5]</sup>利用有限元软件 ABAQUS 测试有无模板和腹杆钢筋对钢筋桁架叠合板力学性能的影响。完海鹰<sup>[6]</sup>利用有效惯性矩法推导了钢筋桁架叠合底板短期刚度的计算公式。李杰<sup>[7]</sup>提出了无支撑钢筋桁架底板施工阶段的短期刚度的计算方法。郭忠猛<sup>[8]</sup>开展了叠合面抗剪承载力试验研究,确定了腹杆钢筋对叠合板叠合面抗剪起着重要作用。

预制叠合板包括现浇层和下部底板,现阶段我国在进行装配式施工时所用的预制底板大多为钢筋桁架叠合板预制底板,但是钢筋桁架叠合板在吊装、运输、浇筑混凝土的过程中容易开裂。由于预应力施加在底部受拉钢筋上,混凝土底板会出现反拱现象,为了解决这一问题,将钢筋桁架叠合板预制底板中上弦钢筋桁架换成钢管桁架<sup>[9]</sup>,这一措施提升了预制底板的刚度与抗裂性,

有效缓解了因预应力造成的叠合板反拱现象<sup>[10]</sup>,并且减小了底板厚度,提高了预制底板的刚度和承载力。

预应力混凝土钢管桁架叠合底板是由预制混凝土底板发展而来的一种新型预制底板,结合了预应力混凝土与钢管桁架的优势。这种预制底板由预应力筋、混凝土底板与钢管桁架组成,钢管内部填充灌浆料,具有成本低、承重能力强、防火防腐性能好、方便穿插管线、施工方便等特点。施工过程包括预制底板的脱模、运输、堆放、吊装及叠合层混凝土的浇筑,施工时所承受的荷载由混凝土底板与钢管桁架共同承担。当组合截面承受负弯矩时,即上弦钢管受拉,不考虑钢管内灌浆料的贡献;当组合截面承受正弯矩时,灌浆钢管视为轴心受压构件<sup>[11]</sup>。虽然这一预应力叠合板已在工业建筑中投入使用,但在这一领域,预应力钢管桁架叠合板和相应的预制底板还缺乏性能研究与力学分析。

本文以《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010<sup>[12]</sup>、《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231—2016<sup>[13]</sup>、《混凝土叠合结构设计原理与应用》<sup>[14]</sup>为依据,以不同规格的预应力混凝土钢管桁架叠合底板为研究对象,具体试件尺寸如表1所示,结合试验数据、理论分析及有限元数值模拟,探究其力学性能。

表1 预制底板规格

Tab. 1 Specification of prefabricated base slab

预制底板编号	预制底板尺寸/mm	预应力钢丝根数	钢管直径/mm	桁架腹筋间距/mm	底板混凝土强度	底板自重/m <sup>3</sup>	构造钢筋根数
1	3 900×1 000×35	10	28	200	C40	341	12
2	3 900×1 000×35	10	20	200	C40	341	12
3	3 900×1 000×35	16	28	200	C40	341	12
4	5 100×1 000×35	16	28	200	C40	446	16
5	5 100×1 000×35	16	20	200	C40	446	16
6	5 100×1 000×35	20	28	200	C40	446	16
7	5 100×1 000×35	16	20	400	C40	446	16
8	6 300×1 000×35	20	28	200	C50	551	16
9	6 900×1 000×40	27	28	200	C50	690	16
10	6 300×1 000×35	27	28	200	C50	551	16
11	6 900×1 000×40	32	20	200	C50	690	16

## 1 构件试验

### 1.1 试件设计

试验<sup>[15]</sup>所浇筑的预制底板试件均由预应力混凝土底板和钢管桁架构成,预制底板在生产线上一次浇筑完成,混凝土底板采用 C40 混凝土,构造

钢筋采用 HPB300,直径是 6 mm,预应力钢丝采用直径 5 mm 的消除应力螺旋带肋钢丝,底板保护层厚度为 20 mm。叠合底板下部放置滚轮,滚轮和垫板之间放置沙子,垫板下部放置混凝土支墩,在进行试验时,预制底板底部两端采用固定铰支座支撑,底板一端是约束三个方向的位移,另一

端是约束竖向位移,使底板构件在支座上可自由转动,但是不能移动。叠合板加载试验现场如图1所示。

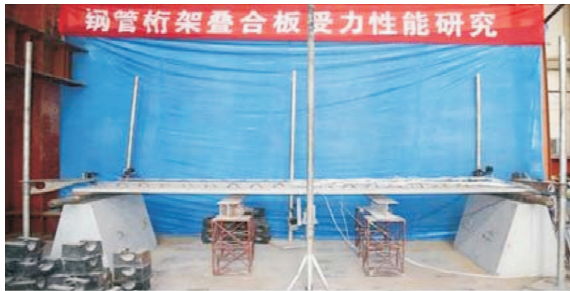


图1 叠合板加载试验现场

Fig. 1 Loading test site of laminated plate

## 1.2 试验加载方案及数据采集

试验根据钢管桁架叠合板的受力特点,采用砝码加载块模拟均布荷载,砝码为20 kg。试验采用沿板跨度方向在两侧对称的方式布置测点,预制底板跨中挠度为跨中两侧对称测点挠度的平均值。在混凝土、钢筋、预应力钢丝、钢管、腹杆、钢筋各个重要位置粘结应变片。对预制底板进行分级加载,待加载砝码放置10 min且数据基本稳定后,进行数据采集,采集数据包括跨中部位钢管上表面、腹杆钢筋、跨中混凝土、预应力钢丝应变变化情况,并记录叠合底板受力破坏状态。

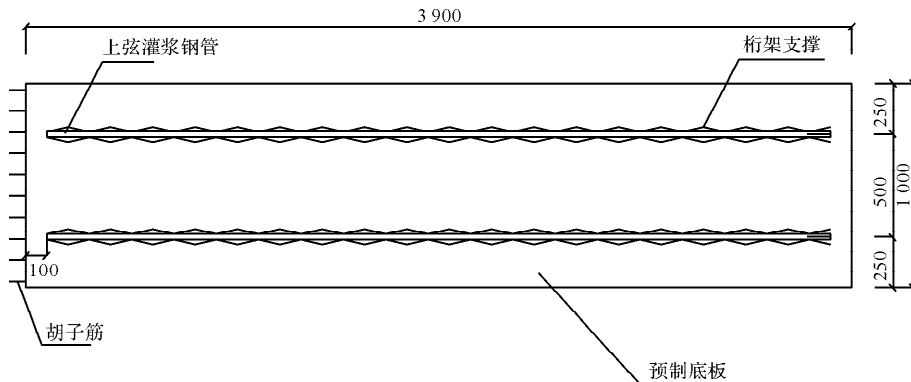


图2 预制底板尺寸与钢管桁架分布

Fig. 2 Size of prefabricated baseplate and distribution of steel pipe truss

预制底板的主要构件有混凝土底板、钢管、预应力钢丝、构造钢筋、垫板、钢管桁架。混凝土与垫板采用实体单元,钢管采用壳单元,预应力钢丝和构造钢筋采用桁架单元,为了避免模型发生刚体位移,钢管下部的桁架支撑采用梁单元。混凝土属性采用混凝土损伤塑性模型,钢材构件采用理想弹塑性曲线模型,屈服条件采用 von-mises 屈服准则<sup>[16]</sup>。泊松比设为0.3,弹性模量按照试验钢构件进行设置。底部消除应力螺旋带肋钢丝 $\Phi^H 5$ ,屈服强度设为1 570 MPa,构造热轧光圆

## 1.3 试验破坏过程

所有叠合底板构件的破坏形态基本一致。加载初期,荷载较小,挠度增加较小,随着荷载增加,混凝土底板下表面首先出现贯通裂缝,继续加载,当底板挠度达到跨度 $L$ 的 $1/50$ 时,底板裂缝开始大量出现,钢管出现受压屈曲现象,试件破坏。

## 2 有限元分析

### 2.1 构件尺寸和材料属性

本文进行有限元数据分析并与既有试验数据进行对比验证再进行理论数据分析。跨度为3 900 mm和5 100 mm的预应力混凝土钢管桁架叠合板预制底板采用的是C40混凝土,跨度为6 300 mm和6 900 mm的预应力混凝土钢管桁架叠合板预制底板采用的是C50混凝土,灌浆料抗压强度为50 MPa,预制底板宽度为1 000 mm,底部预应力钢丝采用消除应力螺旋带肋钢丝 $\Phi^H 5$ ,弹性模量为 $2.05 \times 10^5$  MPa。构造钢筋热轧光圆钢筋 HPB300,弹性模量为 $2.10 \times 10^5$  MPa,直径是6 mm。上弦钢管 Q195 壁厚1 mm,弹性模量为 $2.01 \times 10^5$  MPa,钢管直径为28 mm。腹杆钢筋为直径为6 mm的热轧光圆钢筋 HPB300,弹性模量为 $2.10 \times 10^5$  MPa。预制底板尺寸规格如表1所示,预制底板和桁架分布示意如图2所示。

钢筋屈服强度为300 MPa,截面直径为6 mm。钢管桁架直径为6 mm,屈服强度为300 MPa。上弦钢管屈服强度为195 MPa。垫板设置为刚体,边界约束采用一端铰支座固定,一端可移动铰支座固定。预制底板 ABAQUS 模型如图3所示。

本分析模型通过降温法模拟钢丝的预应力,设置钢丝膨胀系数并且对预应力钢丝施加降温作用,膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5}$ ,钢筋轴力与长度变化量计算关系如公式(1)所示,钢筋长度增量与温度变化量关系如公式(2)所示。

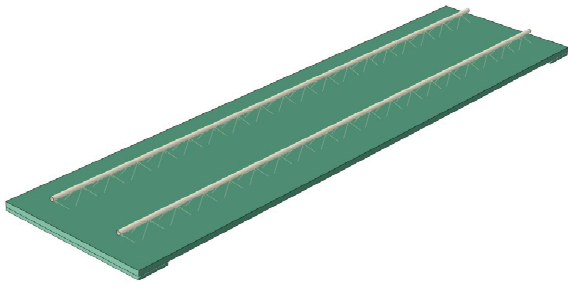


图3 预制底板立体图

Fig. 3 3-D view of prefabricated base slab

$$\Delta L = \frac{N \times L}{E_p \times A_p} \quad (1)$$

$$\Delta T = \frac{\Delta L}{L \times a} \quad (2)$$

式中:  $L$  为原钢丝长度;  $a$  为线膨胀系数;  $E_p$  为预应力钢丝弹性模量;  $A_p$  为预应力钢丝截面面积;  $N$  为预应力钢丝所受轴力大小;  $\Delta L$  为钢筋长度变化;  $\Delta T$  为温度变化量。

预应力钢筋的张拉控制应力  $\sigma_{con}$  应符合公式(3)、公式(4)和公式(5)。

对于消除应力钢丝、钢绞线,有

$$\sigma_{con} \leq 0.75 f_{ptk} \quad (3)$$

对于中强度预应力钢丝,有

$$\sigma_{con} \leq 0.70 f_{ptk} \quad (4)$$

对于预应力螺纹钢筋,有

$$\sigma_{con} \leq 0.85 f_{ptk} \quad (5)$$

式中:  $f_{ptk}$  为预应力钢筋极限强度标准值;  $f_{pyk}$  为预应力螺纹钢筋屈服强度标准值。

通常情况下,消除应力钢丝、钢绞线的张拉控制应力值应大于等于  $0.40 f_{ptk}$ , 预应力螺纹钢筋的张拉控制应力值应大于等于  $0.50 f_{pyk}$  [13]。

## 2.2 构件相互作用

有限元模拟模型板件宽度为 1 000 mm, 钢管桁架设置两排, 腹杆和钢管进行焊接, 砂浆和钢管内壁的相互关系采用绑定连接, 在混凝土预制板下方放置垫板, 垫板长度为 1 000 mm, 宽度 200 mm。垫板与混凝土板采用绑定连接, 整个混凝土预制板的边界条件设置, 采用一边可移动铰支座, 一边固定铰支座, 预应力钢丝与混凝土采用内置连接, 桁架埋置在混凝土中的部分与混凝土楼板采用内置连接, 忽略钢筋与混凝土之间的滑移作用。

## 2.3 构件荷载与网格设置

为了使模拟的计算结果能有更高的精确度, 本文合理地进行混凝土与钢筋网格划分, 网格划分尺寸为 50 mm, 避免了因为网格划分密集造成应力集中、塑性损失严重现象, 从而使得计算收

敛。在局部位置进行网格手动划分以确保能正确反应构件的应力情况。混凝土底板需要分析其厚度方向上拉压应力分布及混凝土损伤情况, 因此在楼板厚度方向对边布种划分 5 层的网格。网格划分如图 4 所示。

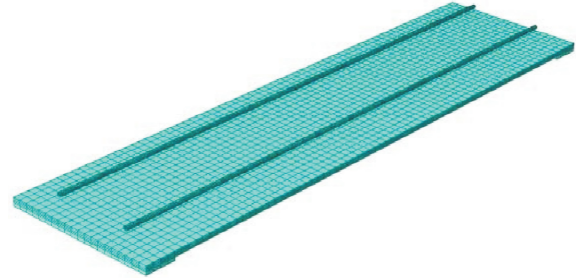


图4 预制底板网格划分

Fig. 4 Mesh generation of prefabricated base slab

## 2.4 变形破坏过程

### 2.4.1 预制底板整体的破坏变形过程

有限元模拟采用均布荷载加载, 如图 5 所示。加载开始时, 预制底板的跨中挠度变化较为缓慢, 钢管和焊接桁架也没有达到屈服, 预制底板及灌浆料损伤不明显, 均布荷载加载达到一定值时, 预制底板跨中挠度急剧增加, 预制底板跨中底部受拉损伤区向两边蔓延, 受压损伤集中在预制底板跨中上表面, 灌浆料的跨中部分也存在受压损伤, 钢管跨中位置出现塑性应变并达到屈服状态, 整个破坏过程中桁架与预应力钢丝未屈服。

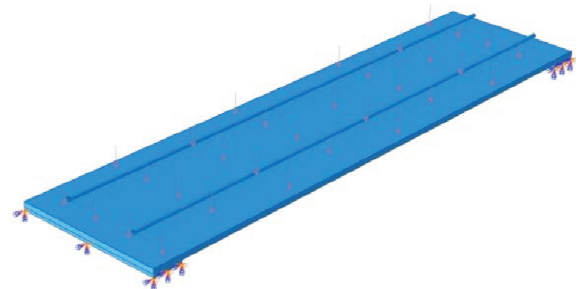


图5 预制底板荷载布置

Fig. 5 Load layout of precast base slab

### 2.4.2 预制底板受力特点及应力分布

随着均布荷载的增加, 混凝土楼板连带钢管桁架会出现弯曲变形, 灌浆钢管承受大量压应力, 钢管桁架主要承担剪力, 变形过程中在钢筋桁架与钢管焊接处会出现应力集中, 如图 6 所示。

整个楼板弯曲变形的过程中, 拉力由下部混凝土底板与预应力钢丝承担, 压力则由上部钢管与内置的灌浆砂浆来进行承担, 剪力由钢管桁架来进行承担, 其中由数据分析可知混凝土底板的承载力相对较弱, 抗拉承载力较低, 随着荷载增加, 混凝土底板会迅速出现刚度退化区并退出工作。



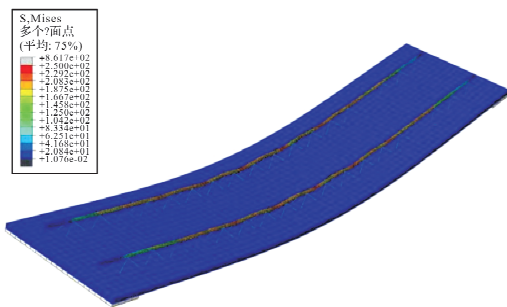


图6 预制底板应力云图

Fig. 6 Stress nephogram of prefabricated base slab

#### 2.4.3 有限元构件损伤

随着荷载的增加,混凝土底部会首先出现拉伸破坏,混凝土预制底板部分的主要破坏形式以受拉损伤为主,因此,混凝土板中下部受拉区最先被破坏,荷载继续增加,跨中挠度达到极限,混凝土底板下部受拉损伤程度达90.75%。相比较而言,混凝土底板受压破坏相对较小,这是由于预制底板所受的压力主要由上部灌浆钢管来承担。混凝土底板上表面受拉损伤较小仅有0.34%,砂浆损伤破坏以受压破坏为主,承担大部分压力。

#### 2.4.4 有限元构件塑性破坏

叠合底板塑性破坏的主要构件是混凝土底板,钢管及其钢管灌浆料,桁架未出现屈服。上部钢管和灌浆料塑性破坏较为严重。钢管塑性破坏主要集中在跨中部位。

#### 2.4.5 预制底板变形破坏模式对比

有限元分析中钢管桁架预制底板的加载方式是均布加载,试验中的加载是利用砝码来模拟均布加载,在有限元分析中,加载初期,预制底板构件处于弹性阶段,预制底板无受压受拉损伤,刚度退化,钢筋,钢管未出现屈服,试验中的加载初期,预制底板未出现明显裂缝,钢管与钢筋未屈服,板件挠度增加不明显,由此可知在加载初期有限元模拟预制底板破坏变形结果与试验基本一致。

进一步加载,随着预制底板上表面均布荷载增大,对应板件跨中底部会首先出现损伤区和刚度退化区,预制底板下表面跨中区域的损伤因子可达0.67,混凝土底板上表面未出现明显受压损伤区域,受压损伤因子较小。这一加载时期,预制底板加载试验中,预制底板跨中位置开始出现贯通裂缝,跨中位置两侧出现少量非贯通裂缝。

均布荷载进一步增加,在有限元计算模型中,跨中区域的钢管与腹杆钢筋的连接处发生应力集中,随后跨中位置的钢管屈服,预制底板下表面受拉损伤区域不断向两侧扩大,预制板上表面出现混凝土受压损伤。在试验中,这一加载阶段,

随着砝码数量的持续增加,各个规格的预制底板开始出现跨中贯通裂缝,裂缝不断增加,钢管受压屈服,预制底板上表面混凝土被压碎,跨中挠度开始明显增加,预制底板破坏。因此综上所述,有限元模拟的预制底板破坏过程与实际试验的破坏过程基本一致。

### 3 有限元计算分析

#### 3.1 数据对比

分别对11个板件的试验和有限元模拟得到的荷载跨中挠度曲线进行对比分析,具体结果如图7~图17所示。

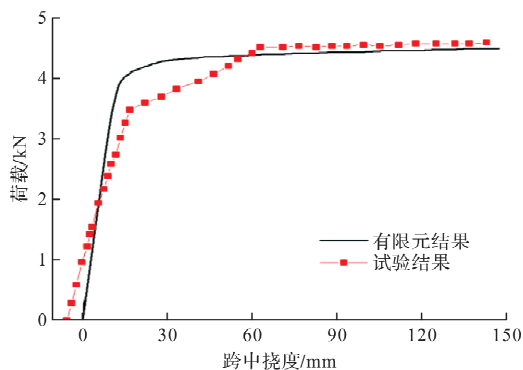


图7 预制底板1荷载-跨中挠度曲线

Fig. 7 Load-mid span deflection of prefabricated base slab 1

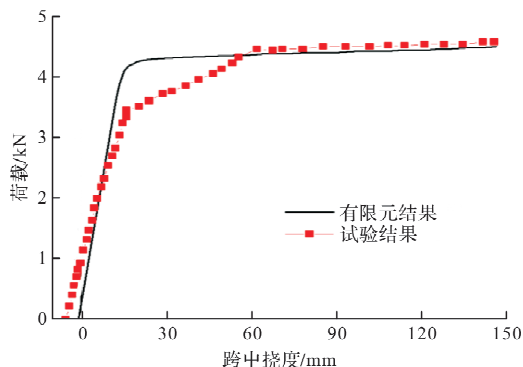


图8 预制底板2荷载-跨中挠度曲线

Fig. 8 Load-mid span deflection of prefabricated base slab 2

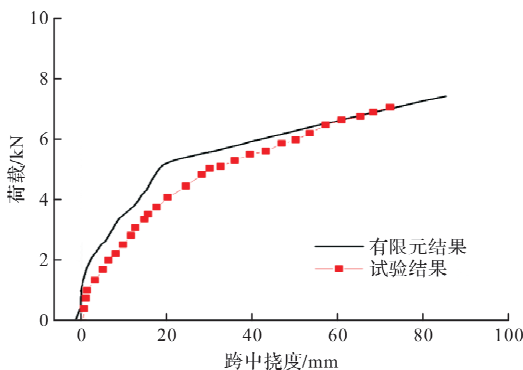


图9 预制底板3的荷载-跨中挠度曲线

Fig. 9 Load-mid span deflection of prefabricated base slab 3

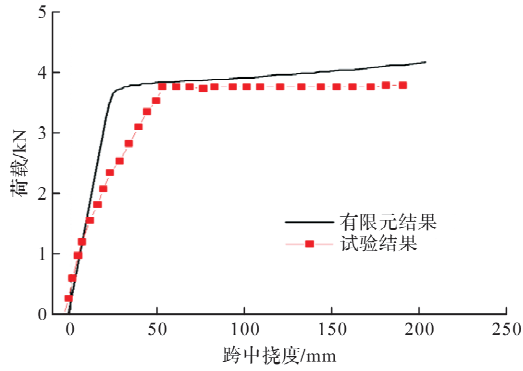


图 10 预制底板 4 的荷载-跨中挠度曲线

Fig. 10 Load-mid span deflection of prefabricated base slab 4

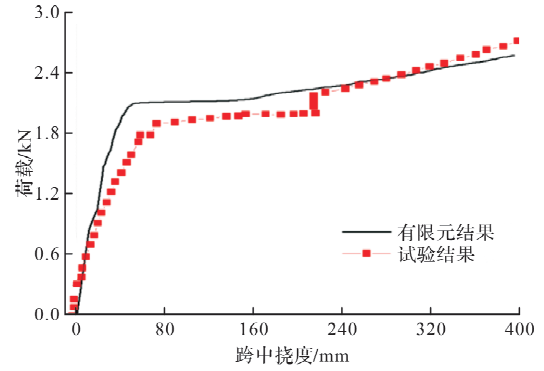


图 14 预制底板 8 的跨中荷载-挠度曲线

Fig. 14 Load-mid span deflection of prefabricated base slab 8

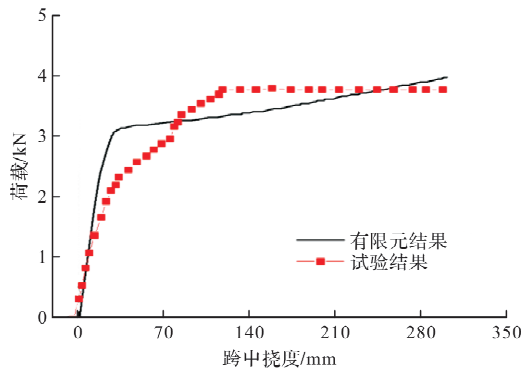


图 11 预制底板 5 的跨中荷载-挠度曲线

Fig. 11 Load-mid span deflection of prefabricated base slab 5

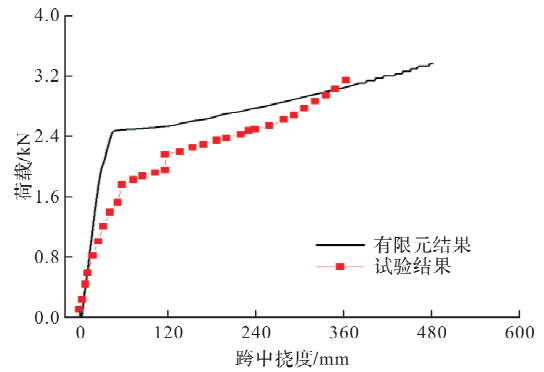


图 15 预制底板 9 的跨中荷载-挠度曲线

Fig. 15 Load-mid span deflection of prefabricated base slab 9

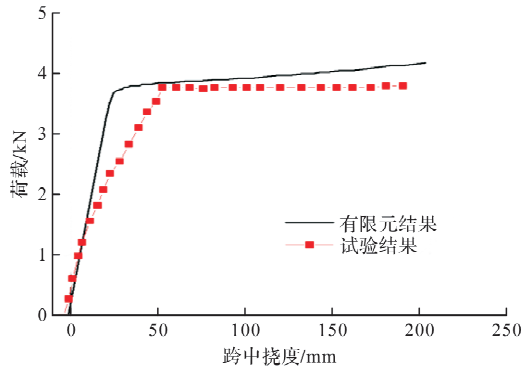


图 12 预制底板 6 的跨中荷载-挠度曲线

Fig. 12 Load-mid span deflection of prefabricated base slab 6

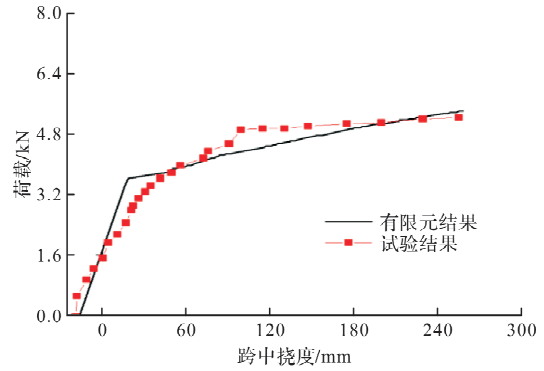


图 16 预制底板 10 的跨中荷载-挠度曲线

Fig. 16 Load-mid span deflection of prefabricated base slab 10

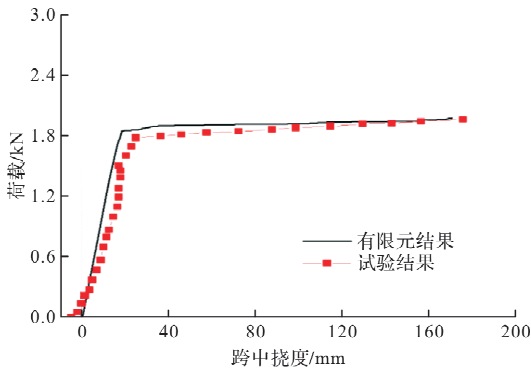


图 13 预制底板 7 的跨中荷载-挠度曲线

Fig. 13 Load-mid span deflection of prefabricated base slab 7

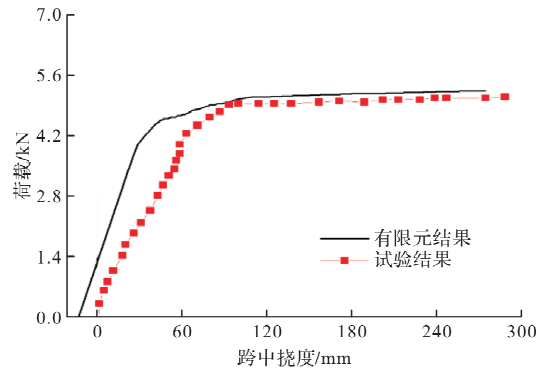


图 17 预制底板 11 的跨中荷载-挠度曲线

Fig. 17 Load-mid span deflection of prefabricated base slab 11

由图7~图17可以看出,加载开始时,荷载随挠度呈线性增长,当荷载达到一定值时,挠度会出现急剧的增加,此时预制底板迅速失去承载能力,这一时刻的荷载值作为预制底板的极限承载力,以此为基础研究结构要素的变化对极限承载力值的影响。

试验中预制底板中的钢丝被施加预应力,因此预制底板在预应力钢丝的收缩下会产生反拱,在有限元分析中,由于对受力钢丝进行降温,导致混凝土随钢丝的收缩而发生反拱,这导致部分曲线图中预制底板初始跨中挠度为负。

有限元计算所得荷载挠度曲线与试验曲线对比,两者吻合较好,误差范围在6%以内。图10、图12有限元计算所得极限承载力值大于试验极限承载力值,这是由于试验过程中存在钢筋与混凝土之间的摩擦滑移作用,且试验现场预应力钢丝在装配张拉过程中会出现预应力损失,而本文有限元分析模拟没有考虑上述要素对预制底板承载力的影响,因此,有限元模拟计算所得极限承载力值比试验值高。

### 3.2 各结构要素对极限荷载的影响

以编号为1的预制底板为有限元计算的基本模型。测试各个结构要素对预制底板承载力的影响,主要研究不同预应力大小、不同钢管壁厚、不同混凝土强度,不同预应力钢丝个数,不同砂浆强度,不同预制底板跨度对预制底板承载力的影响,数据分析采用基本的控制变量手法,只改变所研究的构件要素的大小,其余各构件要素数值不变,观察挠度荷载曲线,分析各个要素对预制底板承载力的影响。

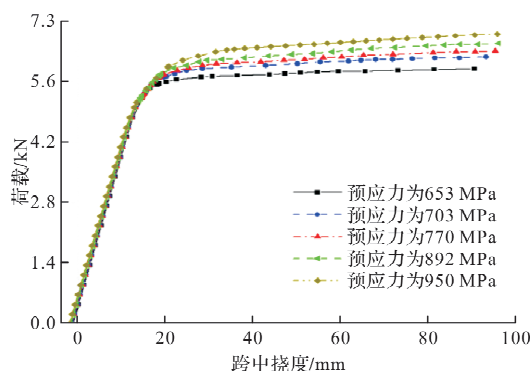


图18 不同预应力下预制底板荷载-跨中挠度曲线

Fig. 18 Curve of prefabricated base slab load-mid span deflection under different prestress

从图18中可知,预应力将会使得预制底板的承载能力得到提升,消除应力钢丝的张拉控制应力值应大于等于 $0.40f_{ptk}$ ,且小于 $0.75f_{ptk}$ ,预应

力钢丝屈服强度为1570 MPa,预应力取值范围是628~1177 MPa。当预应力为653 MPa时,荷载到达5.79 kN便会出现大幅跨中弯曲。预应力为703 MPa时极限荷载为5.95 kN。预应力为770 MPa时,极限荷载为6.045 kN。预应力为892 MPa,极限荷载为6.16 kN。预应力为950 MPa,极限荷载为6.37 kN。设置不同的钢丝预应力,挠度荷载曲线的线性增长阶段基本重合一致,随着预应力大小的增加,预制底板极限承载力也会随之增加。预应力值要控制在 $0.40f_{ptk}$ 和 $0.75f_{ptk}$ 之间,根据具体的需要选择适当的预应力大小。较高的张拉预应力可以提高预制底板承载力和抗裂能力。

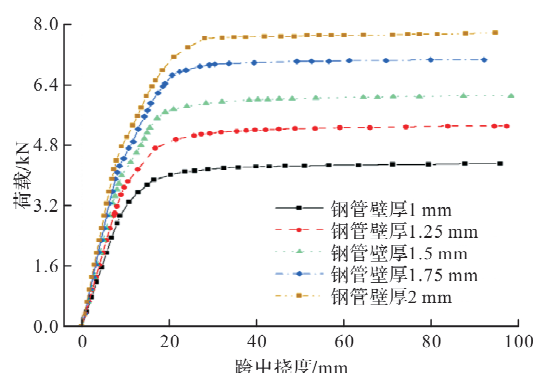


图19 不同钢管壁厚预制底板跨中荷载-挠度曲线

Fig. 19 Curve of prefabricated base slab load-mid span deflection under different prestress

从图19可知,钢管壁厚会影响预制底板的承载力,增加钢管壁厚,预制底板的承载力提升较大。钢管壁越厚,荷载与挠度曲线线性增长阶段斜率越大,极限承载力越大。钢管厚度增长0.25 mm,预制底板集中极限承载力平均增加1 kN左右。钢管可以在壁厚1 mm的基础上增加一定的厚度,但是考虑到建筑构件的经济效益,不宜过多的增加钢管壁厚。

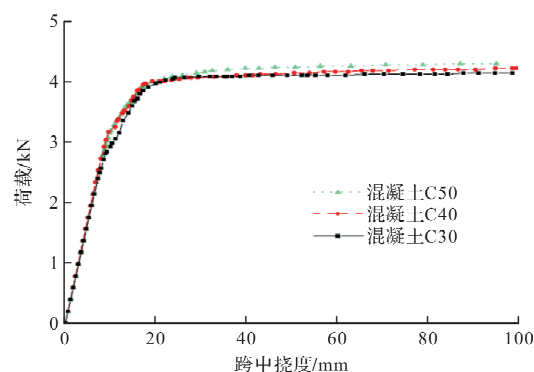


图20 不同混凝土强度预制底板跨中荷载-挠度曲线

Fig. 20 Curve of prefabricated base slab load-mid span deflection under different prestress

从图20可知,在钢管桁架预制底板中,混凝土

土强度对预制底板的承载力影响不大, 改变混凝土强度等级, 预制底板荷载挠度曲线走向基本一致, 所以预制底板施工中, 增加混凝土强度对预制底板极限承载力的提升不明显, 采用过高强度混凝土材料性价比较低. 建议一般情况下可选择 C40 混凝土作为预制底板的材料.

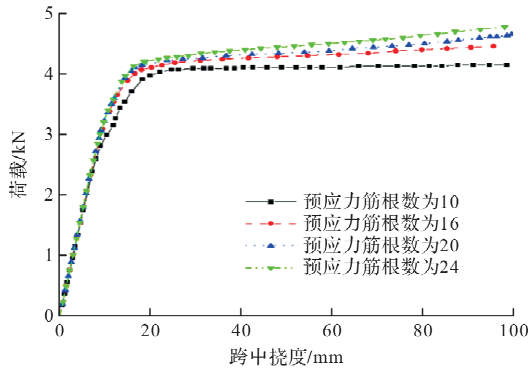


图 21 不同预应力筋个数叠合底板跨中荷载-挠度曲线  
Fig. 21 Curve of prefabricated base slab load-mid span deflection under different prestress

从图 21 可知, 预制底板中预应力钢丝个数对预制底板承载力有一定影响, 但是, 当预应力钢丝到达一定数量时, 预制底板极限承载力将不再增加. 预应力钢丝数量为 10 根时, 承载力为 4.075 kN; 预应力钢丝数量为 16 根, 承载力为 4.19 kN; 预应力钢丝数量为 20 根时, 承载力为 4.25 kN; 预应力钢丝为 24 根时, 极限承载力为 4.3 kN. 由此可知, 随着预应力钢丝数量的增加, 预制底板极限承载力增加幅度逐渐变小, 增加预应力钢丝数量对预制底板承载力的提升幅度逐渐变小. 因此, 在跨度为 3 900 mm 时, 预应力钢丝数量可以设置成 10 个, 随着跨度的逐渐增加, 适当的增加预应力钢丝的数量有利于避免预制底板发生受弯破坏.

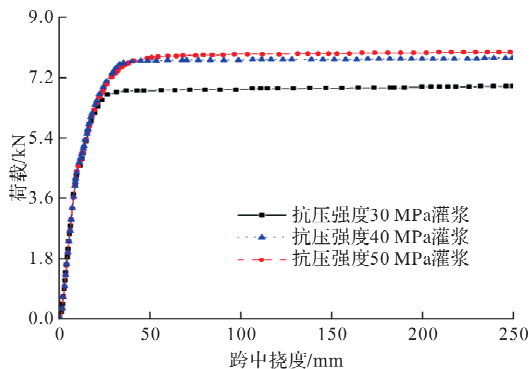


图 22 不同灌浆强度预制底板跨中荷载-挠度曲线  
Fig. 22 Curve of prefabricated base slab load-mid span deflection under different prestress

从图 22 可知, 增加钢管的灌浆料抗压强度可

以有效提升预制底板抗压强度, 在抗压强度达到 50 MPa 后, 预制底板极限承载力到达 7.7 kN, 极限承载力的增长较为缓慢, 在设置灌浆钢管时, 可以采用抗压强度为 40 MPa 或 50 MPa 的砂浆, 性价比较高. 灌浆料有利于增强钢管截面的刚度, 且灌浆料可以抵抗上部压力提高预制底板抗弯承载力, 增大预制底板的极限承载力.

图 23 同跨度预制底板跨中荷载-挠度曲线

Fig. 23 Load-mid span deflection under different prestress

从图 23 可知, 预制底板跨度对其承载力的影响很大, 随着跨度增大, 初始荷载挠度曲线斜率逐渐减小, 极限荷载也会大幅度降低, 对预制底板的施工应注意预制底板跨度不宜过大, 跨度过大会大幅度降低预制底板承载力.

## 4 结论

(1) 通过与试验数据的对比分析, 有限元模拟计算的预制底板荷载-跨中挠度曲线基本与试验得出的图像一致, 验证了有限元模型的正确性. 模型能够较好体现出预制底板的损伤与变形程度;

(2) 由有限元分析可知混凝土强度对预制底板的极限承载力影响较小, 在制备预制底板时, 可以采用 C40 混凝土, 不宜通过提高混凝土强度来增加预制底板抗弯承载力;

(3) 钢管壁厚对预制底板的极限承载力影响较大, 预制底板中的钢管壁越厚, 底板极限承载力越高, 加大钢管壁厚能够减小叠合底板在均布荷载下的弯曲变形, 钢管壁厚可根据实际工程需要设计在 1 mm 到 2 mm 之间, 由于钢材成本较高, 不宜过多增加钢管壁厚以增大钢材用量;

(4) 预制底板中对钢丝施加的预应力越大, 预制底板极限承载力越高, 预应力大小对底板承载力影响较大, 可以增加底板底部受拉钢筋的预应力值来提高预制底板的极限承载力与抗裂能力; 但张拉应力也不宜过大, 张拉应力过大也可能导致钢丝截面面积减小, 从而使预制底板出现脆性破坏, 因此预应力钢丝预应力设计值不得大于  $0.75f_{ptk}$ , 预应力设计值可以采用 0.6 到 0.7 倍的抗拉强度值, 如果跨度较小, 预应力设计值可调整为 0.55 的钢丝抗拉强度值. 最小预应力设计值不得超过  $0.4f_{ptk}$ ;

(5) 预制底板的上弦钢管内的灌浆料强度对预



制底板极限承载力有一定影响。灌浆料强度越大,预制底板极限承载力越高,抵抗变形能力越强;内部灌浆料的抗压强度超过 50 MPa 后,叠合底板极限承载力增加幅度不明显,因此钢管内部可以采用抗压强度为 40~50 MPa 的灌浆砂浆;

(6) 预制底板中的受拉钢丝数量对底板极限承载力有较大影响,预应力钢丝数量越多,预制底板极限承载力越大,抵抗变形的能力越强;具体钢丝布置数量应根据叠合板跨度来进行设置;

(7) 预制底板跨度对预制底板极限承载力影响较大,跨度越大,预制底板极限承载力越小,预制底板变形出现的越早,抗弯性能越差。跨度根据实际工程需要进行设计,底板板跨度可设计为 3 到 6 m,预制底板跨度过大时可提高底板厚度或增加预应力钢丝数量。

## 参考文献 References

- [1] 于敬海,何梦杰,张树辉,等. 二阶段受力作用下预应力混凝土钢管桁架叠合板受力性能试验研究[J]. 建筑结构,2021,51(5):80-85.  
YU Jinghai, HE Mengjie, ZHANG Shuhui, et al. Experimental study on the mechanical behavior of prestressed concrete steel pipe truss composite slabs under the influence of secondary force[J]. Building Structure, 2021, 51(5): 80-85.
- [2] 夏立鹏,周盛光,李敬华,等. 带裂缝钢筋桁架混凝土叠合板力学性能研究[J]. 建筑结构,2021,51(5):86-91,26.  
XIA Lipeng, ZHOU Shengguang, LI Jinghua, et al. Research on mechanical properties of reinforcement truss concrete laminated slab with crack[J]. Building Structure, 2021, 51(5): 86-91, 26.
- [3] 李静斌,于秋波,周玉成. 新型钢筋桁架混凝土叠合板抗弯刚度计算方法研究[J]. 建筑科学,2016,32(9):8-13.  
LI Jingbin, YU Qiubo, ZHOU Yucheng. Research on calculation method for bending stiffness of a new type of steel bar truss concrete superimposed slab[J]. Building Science, 2016, 32(9): 8-13.
- [4] 于秋波,秦孔源,赵琪乐,等. 桁架钢筋混凝土叠合板施工过程试验研究[J]. 结构工程师,2020,36(4):137-144.  
YU Qiubo, QIN Kongyuan, ZHAO Qile, et al. Experimental study on construction process of truss reinforced concrete composite plate[J]. Structural Engineers, 2020, 36(4): 137-144.
- [5] 杨超望. 钢筋桁架混凝土楼板式力学性能影响因素及综合性分析[J]. 结构工程师,2020,36(2):96-101.  
YANG Chaowang. Influence factors and comprehensive analysis of mechanical properties of concrete floor slab reinforced with steel bar truss[J]. Structural Engineers, 2020, 36(2): 96-101.
- [6] 完海鹰,邓啸,冯然. 钢筋桁架混凝土组合楼板在正常使用阶段的短期刚度研究[J]. 建筑结构,2018,48(22):42-50.  
WAN Haiying, DENG Xiao, FENG Ran. Study on short-term stiffness of concrete composite slabs with rebar truss at service ability limit state[J]. Building Structure, 2018, 48(22): 42-50.
- [7] 李杰,郭魏芬,陈以一,等. 无支撑钢筋桁架混凝土叠合板刚度研究[J]. 低温建筑技术,2014,36(6):64-67.  
LI Jie, GUO Weifen, CHEN Yiyi, et al. Study on stiffness of unsupported reinforced truss concrete composite slab[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2014, 36(6): 64-67.
- [8] 郭忠猛,夏立波,陈勇,等. 桁架钢筋混凝土叠合板叠合面抗剪承载力试验研究[J]. 混凝土,2021(10):105-109,114.  
GUO Zhongmeng, XIA Libo, CHEN Yong, et al. Experimental study on shear bearing capacity of combined interface in concrete composite slabs with truss rebars[J]. Concrete, 2021(10): 105-109, 114.
- [9] 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.  
HOU Hetao, LAN Ruhai, FENG Mingyuan, et al. Experimental research on flexural behavior of concrete composite slab with grouted-round-steel tube truss[J]. Industrial Construction, 2017, 47(7): 29-33.
- [10] 郭健,吉成,金如元,等. 预应力混凝土钢管桁架叠合板的研究与应用[J]. 混凝土与水泥制品,2021(3):66-68,75.  
GUO Jian, JI Cheng, JIN Ruyuan, et al. Research and application of prestressed concrete composite slabs with grouted steel pipetrusses[J]. China Concrete and Cement Products, 2021(3): 66-68, 75.
- [11] 吴杨,宋磊,朱兆晴,等. 钢管桁架预应力混凝土叠合板设计方法[J]. 建筑结构,2022,52(1):109-114,126.  
WU Yang, SONG Lei, ZHU Zhaoqing, et al. Design method for prestressed concrete laminated slab with grouted steel-tube trusses[J]. Building Structure, 2022, 52(1): 109-114, 126.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of con-

- crete structures; GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co., Ltd., 2015.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土建筑技术标准(附条文说明): GB/T 51231—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for prefabricated concrete buildings (with article description): GB/T 51231—2016 [S]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co., Ltd., 2017.
- [14] 赵顺波, 张新中. 混凝土叠合结构设计原理与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- ZHAO Shunbo, ZAHNG Xinzong. Design principle and application of concrete composite structure [M]. Beijing: China Water & Water Paver Press, 2001.
- [15] 王顺. 预应力混凝土钢管桁架叠合板受力性能研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- WANG Shun. Study on mechanical behaviors of prestressed concrete composite slab with grouted-round-steel tube truss [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2019.
- [16] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- ZHUANG Zhuo, YOU Xiaochuan, LIAO Jianhui, et al. Finite element analysis and application based on ABAQUS [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [17] 李静斌, 于秋波, 周玉成. 新型钢筋桁架混凝土叠合板抗弯刚度计算方法研究 [J]. 建筑科学, 2016, 32(9): 8-13.
- LI Jingbin, YU Qiubo, ZHOU Yucheng. Research on calculation method for bending stiffness of a new type of steel bar truss concrete superimposed slab [J]. Building Science, 2016, 32(9): 8-13.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Steel structure design standard: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co., Ltd., 2018.
- [19] 周广强, 张鑫, 王顺, 等. 预应力混凝土钢管桁架叠合板施工阶段短期刚度研究 [J]. 建筑结构, 2020, 50(6): 21-24.
- ZHOU Guangqiang, ZHANG Xin, WANG Shun, et al. Study on short-term stiffness of prestressed concrete composite slab with grouted steel pipe trusses during construction [J]. Building Structure, 2020, 50(6): 21-24.
- [20] 山东省建大建筑规划设计研究院. 预应力混凝土钢管桁架叠合板: L18ZG401 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.
- Shandong Jianzhu University Architecture Urban Planning Design Institute. Prestressed concrete steel tube truss laminated plate: L18ZG401 [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2018.

(编辑 吴海西)