

引用格式:黄狄昉,屈洋广,黄厚军,等.上承式模块化预制楼板支撑体系分析及施工技术研究[J].工业建筑,2026,56(3):195-203. HUANG Difang, QU Yangguang, HUANG Houjun, et al. Analysis and Construction Technology of a Novel Modular Top-Supporting System for Prefabricated Floor Slabs[J]. Industrial Construction, 2026, 56(3): 195-203 (in Chinese). DOI:10. 3724/j. gyjzG24040716

上承式模块化预制楼板支撑体系分析及施工技术研究^{*}

黄狄昉¹ 屈洋广² 黄厚军^{1,3} 韩小雷^{2,4} 汤序霖¹ 叶嘉彬¹

(1. 广州机施建设集团有限公司, 广州 510000; 2. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510641; 3. 广州市建筑集团有限公司, 广州 510030; 4. 华南理工大学, 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室, 广州 510640)

摘 要 提出一种新型上承式模块化预制楼板支撑桁架体系, 该体系由模块化桁架标准件组装而成, 通过在预制楼板上预埋螺栓件, 将组装好的桁架支撑安装于板面对应位置, 无需搭设底部支撑。通过有限元参数化建模, 分析研究施工阶段桁架支撑的内力分布情况、楼板跨中挠度及楼板损伤情况, 从承载能力、刚度、用钢量和施工便利性的角度, 给出了上承式桁架支撑体系的合理构造形式和最优杆件型号, 并提出配套施工技术流程。研究表明: 该体系受力合理, 结构安全可靠, 且安装拆卸简单, 用钢量少, 可以有效减少工期, 降低成本, 在实际工程中具有推广价值。

关键词 上承式桁架支撑体系; 模块化; 预制楼板; 有限元分析; 施工工艺

Analysis and Construction Technology of a Novel Modular Top-Supporting System for Prefabricated Floor Slabs

HUANG Difang¹ QU Yangguang² HUANG Houjun^{1,3} HAN Xiaolei^{2,4} TANG Xulin¹ YE Jiabin¹

(1. Guangzhou Jishi Construction Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. Guangzhou Construction Group Co., Ltd., Guangzhou 510030, China; 4. State Key Laboratory of Subtropical Building Science (South China University of Technology), Guangzhou 510640, China)

Abstract: A novel top-supporting modular truss system for prefabricated concrete slabs is proposed in this paper. This system can be assembled using standard modular truss units. By embedding bolts in the prefabricated floor slabs, the assembled truss support system can be installed at the corresponding positions on the slabs without the need for bottom supports. A parametric analysis using a finite element model was conducted to investigate the internal force distribution of the truss supports, the mid-span deflection of the slabs, and the damage during the construction stage. From the perspective of bearing capacity, stiffness, steel consumption, and construction convenience, reasonable structural forms and optimal component types were determined for the top-supporting truss system, and a supporting construction technical process was proposed. Research shows that the system is structurally reasonable, safe and reliable, easy to install and dismantle, and consumes less steel, which effectively reduces construction time and costs. Thus, this supporting system holds significant promotion value for practical engineering projects.

Keywords: top-supporting truss system; modular; prefabricated slab; finite element analysis; construction technology

^{*}广州市建筑集团有限公司科技计划项目([2022]-KJ013; [2022]-KJ025; [2023]-KJ052; [2023]-KJ056; [2023]-KJ001; [2023]-KJ029; [2023]-KJ027; [2024]-KJ019; [2024]-KJ025; [2024]-KJ095); 国家自然科学基金项目(52378515)。

第一作者: 黄狄昉, 高级工程师, 主要从事施工技术研究, 智能建造工作, rickyhuang8@outlook.com。

通信作者: 屈洋广, 博士研究生, 主要从事装配式模块化体系研究, ygygyg@sina.com。

收稿日期: 2024-04-07

0 引言

随着社会经济的快速发展和人口结构的变化,劳动力资源逐渐减少,劳动力成本不断上升,传统的建筑施工模式面临着严峻的挑战。国家双碳政策倡导绿色发展,推动着建筑行业向生态友好型、节能减排的方向转变。在这样的背景下,装配式建筑作为一种高效、节能、环保的建筑模式,成为了建筑业发展的必然趋势。其中,预制叠合板的使用量大,应用范围广,且其制作工艺成熟,能有效提高建筑装配率,因此被广泛用于装配式建筑中。

叠合楼板作为一种集预制和现浇优点于一身的楼板体系,其安装过程涉及运输、吊装、板面管线敷设及钢筋绑扎,叠合层混凝土浇筑养护,底部支撑拆除等环节^[1]。每个独立的叠合板通过分离式或整体式的方式连接^[2],相邻两板通过预留抗剪件或附加钢筋连接、混凝土后浇带连接形成整体,从而保证了楼板的完整性和连续性。许多学者对于叠合楼板施工过程中存在的问题展开了研究:唐华雄等^[3]指出传统叠合板与模板接缝位置处存在着混凝土漏浆的问题;王少奎等^[4]指出在楼板浇筑作业时,楼层板由于强度不足,产生过大的应力及挠度,应设置足够多层数的支撑结构来分担上部荷载;杨信强等^[5]指出当对相邻两块叠合楼板相应的接缝部位进行支承时,极易导致叠合板下部边缘翘起,难以保证预制构件四角标高一致,导致相邻构件发生错台,对后续施工造成严重不良影响。然而,目前相关研究主要关注叠合板在正常使用阶段(第二受力阶段)的受力特性^[6],缺乏对施工阶段叠合板与支撑体系受力性能的研究^[7]。

目前,国内叠合楼板施工现场尚存在如图1所示的诸多问题,如搭设支撑材料用量大、时间长、层高较高时还会出现高支模的情况。与现浇楼板相比,从安全性、经济性和施工效率上都无法体现装配式建筑的优势。因此,预制楼板支撑体系的功能和成本问题亟待解决。

1 上承式模块化预制楼板支撑结构设计

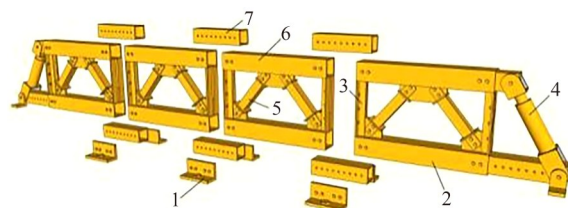
新型上承式模块化预制楼板支撑结构如图2所示,该支撑结构由标准件(图3)与连接件组成,配合配套的新型预制楼板,拼装完成后直接安装于预制楼板板面,与传统楼板板底支撑脚手架体系相比,具有刚度大,便于检查、拆装,为下层腾出工作面,节省桁架钢筋的特点。



(a) 板跨小、接缝多 (b) 梁板钢筋冲突 (c) 板底支模量大

图1 传统叠合楼盖施工难点

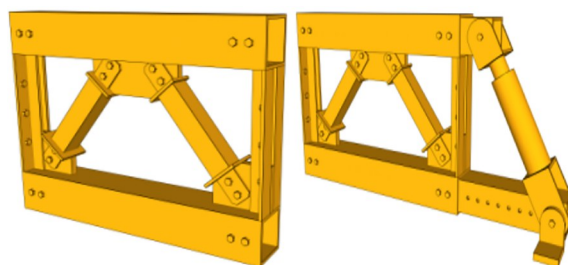
Fig. 1 Current challenges in construction of traditional prefabricated slabs



1—连接角钢;2—下弦杆(方钢管);3—竖杆(角钢);4—可调斜杆(螺杆);5—斜杆(方钢管);6—上弦杆(方钢管);7—连接件。

图2 上承式桁架支撑组合示意

Fig. 2 Schematic diagram of the top-supporting truss frame assembly



(a) 中间标准件

(b) 端部标准件

图3 中间和端部的标准件构造

Fig. 3 Detail of standard components

1.1 新型密拼预制楼板

新型密拼预制楼板如图4所示,此预制楼板无需设置桁架钢筋及胡子筋,板面均匀排布多个垫块,每个垫块上均有预埋螺孔,以实现与支撑结构的连接。此外,沿板边设置了条形钢筋槽,通过附加钢筋加强与周边结构的连接。

1.2 上承式支撑结构与楼板的连接

上承式支撑架安装如图5所示,组装完成的上承式支撑桁架与楼板通过连接角钢和楼板垫块螺栓连接,数量可变的标准节及长度可调的端部斜杆使支撑桁架适用于不同模数跨度的预制楼板,达到装配式标准化施工的要求。图6为桁架支撑与垫块连接剖面大样:预埋钢板与预埋螺孔焊接,

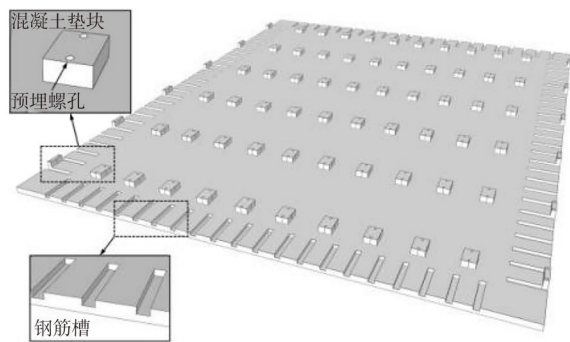


图4 新型密拼预制楼板
Fig. 4 Novel prefabricated slab

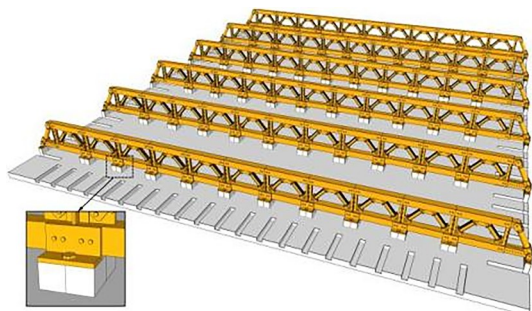


图5 上承式支撑架安装
Fig. 5 Installation of the top-supporting truss frame

两块尺寸为 $L50 \times 70 \times 15$ 的连接角钢通过螺栓与桁架支撑固定,每个混凝土垫块通过2个连接角钢与桁架支撑以螺栓连接。桁架与楼板在竖向荷载下共同变形,显著增大了预制楼板的面外刚度。图7为桁架支撑与预制楼板和预制梁连接大样:预制楼板与桁架支撑首先通过螺栓连接后(图6),吊装并支承于架设好的预制梁上,支撑长度为预制梁保护层厚度。本技术采用密拼预制楼板,楼板四周设置条形钢筋槽,施工中,楼板与楼板密拼且钢筋槽对准后,在钢筋槽内放置附加钢筋,然后绑扎板面钢筋,再通过浇筑叠合层混凝土使附加钢筋锚固。

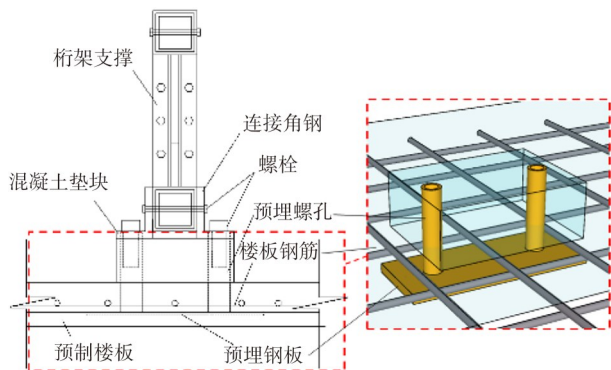


图6 桁架支撑与垫块连接剖面大样
Fig. 6 Sectional drawing of the truss support and pad connections

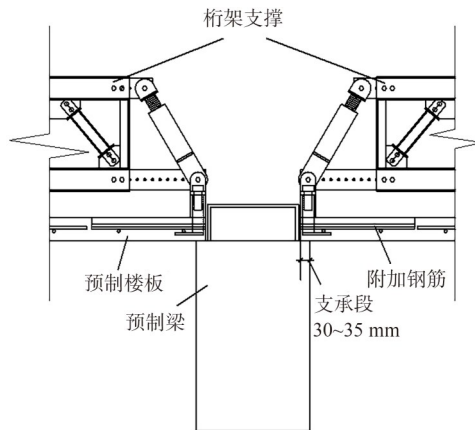


图7 桁架支撑与预制楼板和预制梁连接大样
Fig. 7 Sectional drawing of the connection between the truss support and the slabs and beams

2 关键参数敏感性分析与尺寸优化

2.1 数值模型建立

为适应不同尺寸规模的预制楼板体系,对上承式支撑结构尺寸参数进行优化。本节主要通过有限元参数化建模,研究实际工程应用条件下的上承式桁架合理构造形式与最优杆件尺寸。

分析选用通用有限元分析软件ABAQUS,建立叠合楼板支撑模型,如图8所示。桁架支撑采用桁架单元(T3D2)进行模拟。采用八结点六面体减缩积分单元(C3D8R)模拟混凝土,采用二结点桁架单元(T3D2)模拟钢筋。考虑自重及施工荷载,根据GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[8]中的规定,屋面活荷载取为 2.5 kN/m^2 ,恒荷载取为 2 kN/m^2 ,并考虑了荷载组合效应。混凝土选用塑性损伤模型(CDP)^[9],混凝土应力-应变关系采用GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》^[10]附录C的本构关系,钢筋采用理想弹塑性模型。模型中的钢筋采用嵌固(Embedded)的方式与混凝土连接,不考虑混凝土与钢筋之间的黏结滑移。为模拟预制楼板支承于预制梁的工况,支座条件采用两边简支。

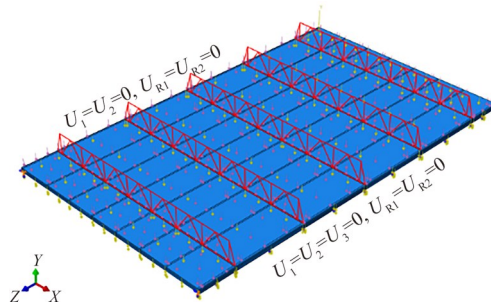


图8 上承式预制楼板支撑体系模型
Fig. 8 FEM model of the top-supporting truss frame system

2.2 模型合理性验证

Li等^[11]对一块尺寸为2000 mm×600 mm×100 mm的简支钢筋混凝土板构件进行两点加载,试验加载情况及配筋信息如图9所示,并得到了楼板跨中挠度-荷载曲线,如图10黑色线所示。

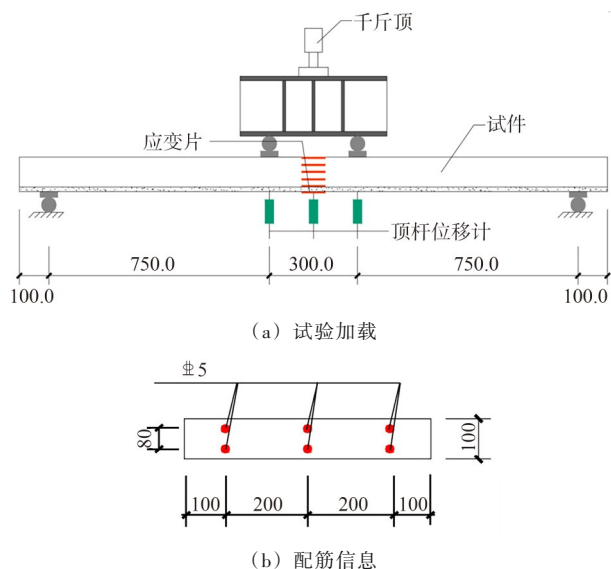


图9 UR100试件加载装置及配筋情况^[11] mm
Fig. 9 Loading device and reinforcement details of UR100

为了验证本文建模方式的合理性,采用本文的建模方式对文献[11]中的UR100试件进行建模,并按相同的边界条件和荷载水平对模型进行计算,提取跨中荷载-挠度曲线,如图10红色线所示,结果表明,试验及有限元峰值承载力相差10%左右,两者荷载-挠度曲线发展规律基本吻合,证明本文建模方式的合理性。

同样地,对文献[12]中XJB试件进行建模,其试验加载和截面配筋信息如图11所示,模拟结果如图10所示,同样证明了本文建模方式的合理性。

2.3 计算模型与参数

通过建立一批上承式预制楼板支撑体系模型作为分析算例,对桁架杆件截面尺寸、桁架标准件几何尺寸及桁架受荷宽度进行参数化分析,旨在确定同时兼顾安全性与经济性的杆件尺寸参数。本模型中预制底板混凝土强度等级为C30,钢筋型号为HRB400,直径为8 mm,间距为200 mm。

模型统一以长×宽×厚为5000 mm×3000 mm×60 mm的预制楼板为研究对象,设置以下参数用于楼板支撑桁架体系分析。

1)桁架杆件尺寸:上下弦杆及斜腹杆采用方钢截

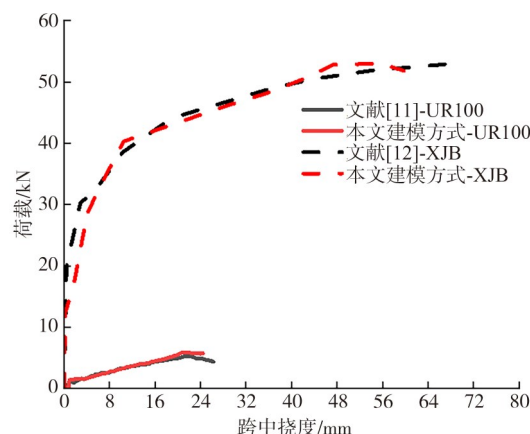


图10 有限元计算结果与试验计算结果对比
Fig. 10 Comparison between finite element and experimental results

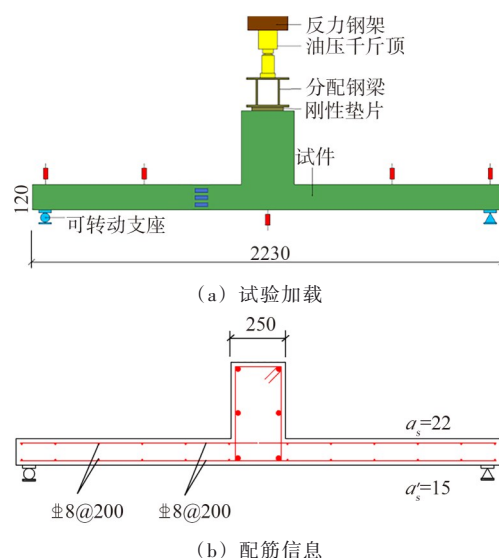


图11 XJB试件加载装置及配筋情况^[12] mm
Fig. 11 Loading device and reinforcement details of XJB

面,□20×20×1、□20×20×2、□30×30×1.5、□30×30×3、□40×40×3、□50×50×3.5、□60×60×4;竖腹杆采用角钢截面, L20×20×3、L20×20×4、L25×25×4、L30×30×4。

2)桁架受荷宽度:设计1~6榀钢桁架支撑,对应桁架受荷宽度分别为5000,2500,1667,1250,1000,834 mm。

3)桁架标准件尺寸:分别设计2~8跨桁架支撑,对应中间标准件长度为1400,800,650,550,450,400,350 mm。

2.4 桁架杆件截面尺寸对楼板挠度及应力的影响

通过分析不同桁架杆件截面尺寸的变化对此新型支撑体系楼板挠度及楼板损伤的影响,提出杆件截面尺寸的合理取值建议。

2.4.1 不同上下桁架截面尺寸计算结果对比

桁架杆件采用 Q355 钢材。上下弦杆取方钢截面 $\square 20 \times 20 \times 1$ 、 $\square 20 \times 20 \times 2$ 、 $\square 30 \times 30 \times 1.5$ 、 $\square 30 \times 30 \times 3$ 、 $\square 40 \times 40 \times 3$ 、 $\square 50 \times 50 \times 3.5$ 、 $\square 60 \times 60 \times 4$ ，分别对应的截面面积为 76, 144, 171, 324, 444, 651, 896 mm²，并在其中线性插值。

图 12 为模型桁架应力矢量图，可以看出在楼板竖向荷载作用下，斜杆应力分布呈现由中间向两边逐渐增大的趋势，最大应力出现在 1/4 跨处；在同一标准节中，靠近跨中位置的斜杆受拉，远离跨中位置斜杆受压。各榀桁架支撑的上弦杆受压，下弦杆受拉，上、下弦杆所受应力大小由跨中向支座逐渐减小。桁架竖杆应力沿跨度方向变化不明显，最大应力出现在两端位置。

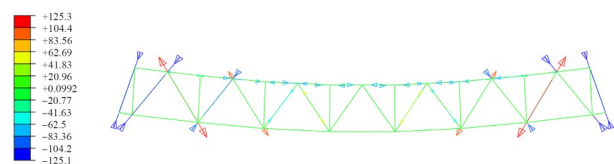


图 12 模型桁架应力矢量图 MPa
Fig. 12 Stress vectors of the truss model

图 13 为跨中挠度随上下弦杆截面尺寸变化的曲线，Data1~Data3 为三组竖杆和斜杆不同的模型，Data2 与 Data1 相比，斜杆截面面积扩大了 125%，Data3 与 Data2 相比，竖杆截面面积扩大了 27%。控制各组竖杆与斜杆截面尺寸不变的情况下，仅改变上下弦杆截面面积得到跨中挠度的变化曲线。可以看出各组曲线都有相同的规律：上下弦杆截面面积的增加能有效限制板跨中变形的发展，跨中挠度随截面面积增加呈二次曲线下降的趋势，当截面面积小于 200 mm² 时，减小截面面积会引起较大的跨中挠度发展，当截面面积大于 200 mm² 时，挠度发展趋于平缓，继续增加截面面积后跨中挠度变化不明显，将导致经济性下降。故上下桁架杆件推荐选取 $\square 30 \times 30 \times 3$ 的方钢截面。

2.4.2 不同斜杆桁架截面尺寸计算结果对比

建立 Data5、Data6 两组保持上下弦杆和竖杆截面不变，仅改变斜杆截面面积的模型，Data5 斜杆面积为 144 mm²，竖杆面积为 576 mm²。Data6 与 Data5 相比，上下弦杆截面面积扩大了 18.7%，竖杆截面面积缩小了 23%。斜杆取方钢截面 $\square 20 \times 20 \times 1$ 、 $\square 20 \times 20 \times 2$ 、 $\square 30 \times 30 \times 1.5$ 、 $\square 30 \times 30 \times 3$ 、 $\square 40 \times 40 \times 3$ ，分别对应于 76, 144, 171, 324, 444 mm² 的截面面积。图 14

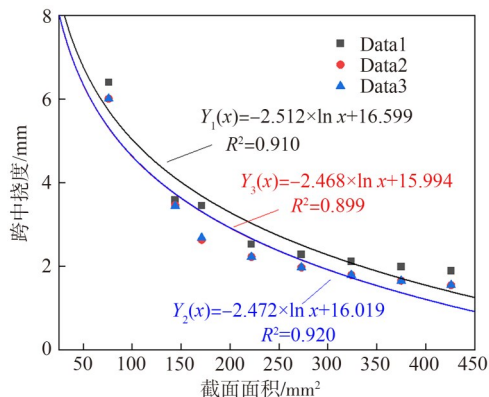


图 13 跨中挠度随上下弦杆截面尺寸变化
Fig. 13 Variations of mid-span deflection with cross-section dimensions of top and bottom chord members

给出了 Data4~6 三组模型跨中挠度随斜杆截面尺寸变化的曲线。可知，跨中挠度与斜杆面积的曲线可视作负相关关系，斜杆截面面积的增大将导致跨中挠度的减小，因此本文推荐选取 $\square 20 \times 20 \times 2$ 作为斜杆杆件。

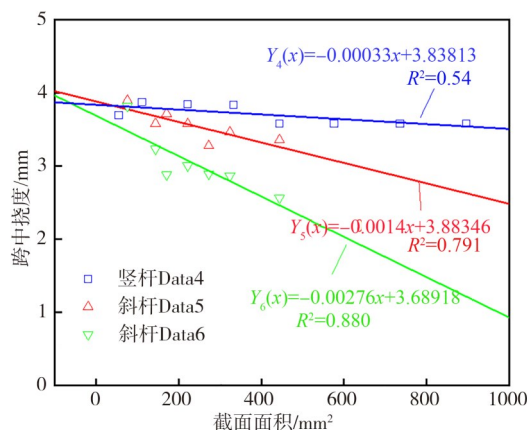


图 14 跨中挠度随斜腹杆和竖腹杆截面尺寸变化
Fig. 14 Variations of mid-span deflection with cross-section dimensions of diagonal and vertical web members

2.4.3 不同竖杆桁架截面尺寸计算结果对比

建立 Data4 一组保持上下弦杆和斜杆截面不变，仅改变竖杆截面面积的模型。取竖杆截面为 $\angle 20 \times 20 \times 3$ 、 $\angle 20 \times 20 \times 4$ 、 $\angle 25 \times 25 \times 4$ 、 $\angle 30 \times 30 \times 4$ ，分别对应于 444, 576, 736, 896 mm² 的截面面积。对于竖杆截面面积小于 444 mm² 的模型没有常用截面规格，因此采用线性插值。结果如图 14 蓝线所示，与图 10 竖杆应力变化沿跨度方向变化不明显描述一致，竖杆截面变化对于楼板跨中挠度的影响不大，增大竖杆角钢截面对减小跨中挠度贡献不大，在工程设计中应该减小竖杆截面面积，以节约钢材。故

本文推荐选取 L20×20×3 作为竖杆杆件。

2.5 桁架支撑宏观参数对楼板竖向变形的影响

本节主要介绍桁架支撑标准件尺寸及桁架受荷宽度对楼板竖向变形的影响,具体模型设计参数如表 1 所示。其中,G1~G6 及 G10 为改变标准件几何尺寸模型,G7~G12 为改变桁架受荷宽度模型,G13 为不加桁架支撑模型,可见 G13 跨中挠度达到 767.8 mm,远超 GB/T 50010—2010^[10]对楼盖构件挠度的限值 $l_0/200$ (l_0 为楼板跨度)=15 mm,可见预制楼板自身面外刚度不足,施工过程中必须施加支撑以减少挠度。

表 1 各算例计算参数					
Table 1 Design parameters of models					
算例	标准件数量/个	标准件尺寸/mm	榀数/mm	受荷宽度/mm	跨中挠度/mm
G1	8	300×350	3	1667	2.96
G2	6	300×450	3	1667	2.95
G3	5	300×550	3	1667	2.79
G4	4	300×650	3	1667	3.28
G5	3	300×800	3	1667	3.69
G6	2	300×1400	3	1667	6.94
G7	7	300×400	6	834	1.43
G8	7	300×400	5	1000	1.67
G9	7	300×400	4	1250	2.02
G10	7	300×400	3	1667	2.62
G11	7	300×400	2	2500	5.34
G12	7	300×400	1	5000	16.03
G13	7				767.80

2.5.1 桁架标准件几何尺寸

考虑到工人在板面施工的便利性,标准件高度统一选取 300 mm。对于特定的楼板宽度,改变标准件长度,标准件数量也随之变化。对不同标准件数量的模型进行加载,杆件应力如图 15 所示,可见,随着支撑标准件长度增大,标准件数量减少,抗弯刚度随之减小,跨中挠度增大。图 16 为跨中挠度和桁架应力随桁架标准件长度和个数变化曲线,且随着标准件数量的减少,桁架最大应力逐渐增大。当数量小于 5 个时,跨中挠度和桁架应力快速增加,变化率超过 15%;当数量不小于 5 个时,应力变化及跨中挠度变化不超过 6%,此时对应的标准件长度为 550 mm。因此本文建议上承式桁架标准件长度为 550 mm。

2.5.2 桁架受荷宽度

取相同结构的桁架支撑模型,建立不同桁架间距的模型进行加载,得到不同桁架受荷宽度的楼板

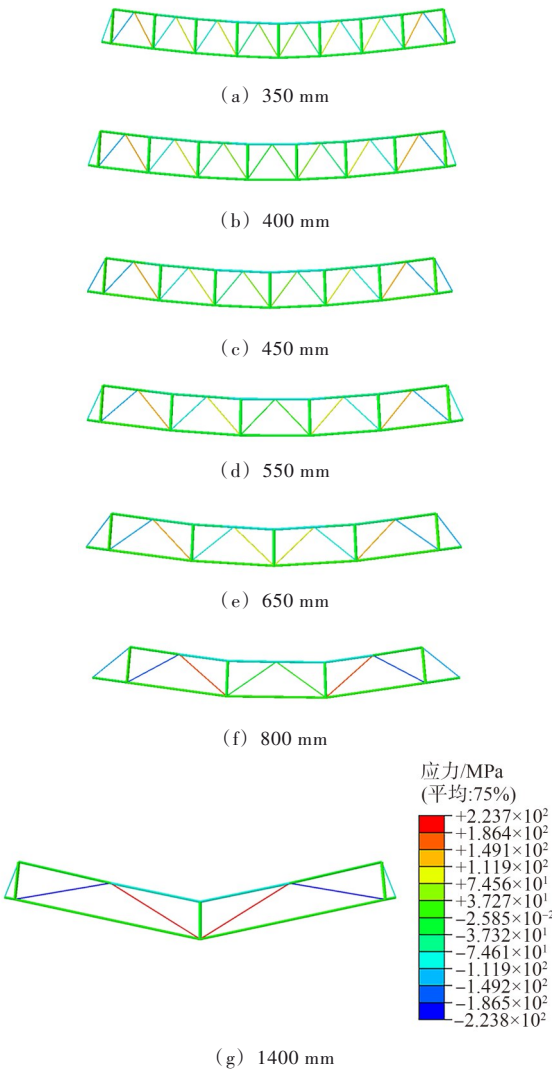


图 15 变标准件尺寸下支撑桁架杆件应力
Fig. 15 Stress diagrams of support truss members under variable standard component dimensions

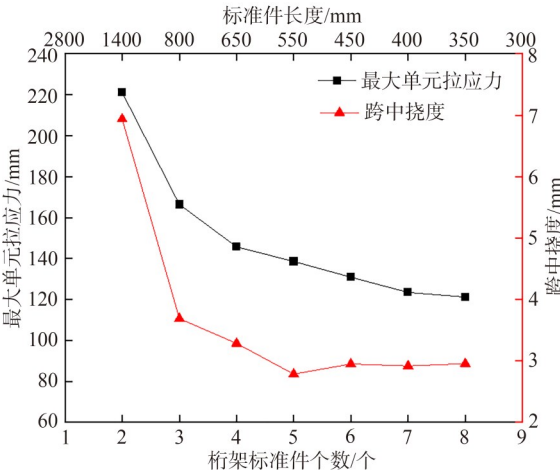


图 16 跨中挠度和桁架应力随桁架标准件长度及个数变化
Fig. 16 Variations of mid-span deflection and internal stress of the truss with standard unit length

应力分布云图和挠度变形,如图 17 所示。

随着榀数的增加,各榀桁架分配到的受荷面积减小,观察图 17 各榀桁架应力云图发现,在均布荷载下,各榀桁架支撑与楼板共同变形。同一模型各榀桁架相同位置处杆件应力大小差距在 1.54 MPa 之内,可认为每榀桁架在竖向荷载下承受各自板带范围内的荷载基本一致。因此可以通过受荷宽度表征每榀桁架所受荷载。

图 17(a)~(f) 分别列举了不同桁架受荷宽度下的楼板应力分布云图和板底损伤云图。可知,随着桁架受荷宽度增大,楼板损伤逐渐增大。当桁架榀数不大于 3 榀时,即桁架受荷宽度大于 1667 mm 时,板边受拉损伤达到 0.7486,楼板开裂严重^[13],说明支撑数量不足。当布置 3 榀以上桁架时,即桁架受荷宽度小于 1667 mm 时,板底受拉损伤小于 0.1,板底受拉处于弹性阶段,此时板底未开裂,楼板保持完好。

图 18 为楼板跨中挠度曲线。由桁架单元内力随桁架受荷宽度的变化,可以看出:随着每榀桁架受荷宽度逐渐增加,桁架单元最大应力和楼板跨中挠度增大;随着受荷宽度减小,跨中挠度、桁架单元应力呈先下降后平稳趋势,当桁架平均受荷宽度小于

1600 mm 时,继续增加桁架数量对减小跨中挠度和桁架内力的效果不明显。因此,从经济性角度出发,建议每榀桁架受荷宽度取 1200~1600 mm。

3 上承式支撑叠合楼盖施工技术

3.1 上承式支撑架施工流程

1) 步骤 1: 根据预制板的跨度选择合适的中间标准件个数与两端的端部标准件拼接成完整的一榀支撑架,单元间通过螺栓与带螺孔的连接方钢管进行连接,如图 2、3 所示。

2) 步骤 2: 通过调节端部单元的可调节螺杆使支撑架与预制板两端的垫块对上,通过螺栓将支撑架下弦杆各支座的连接角钢与预制板上的带预埋螺栓套筒的垫块进行连接,将各榀支撑架安装在预制板上,如图 5、6 所示。

3) 步骤 3: 支撑架与预制板可靠连接,为预制板提供了充足的面外刚度,可作为预制板吊装的分配架。将吊索穿过支撑架的合适位置,采用塔吊或汽车吊将预制板吊装至施工楼面的预定位置。预制板各边缘端部支承在已吊装就位的预制梁的两侧保护层处,支承宽度约 30~35 mm,如图 7

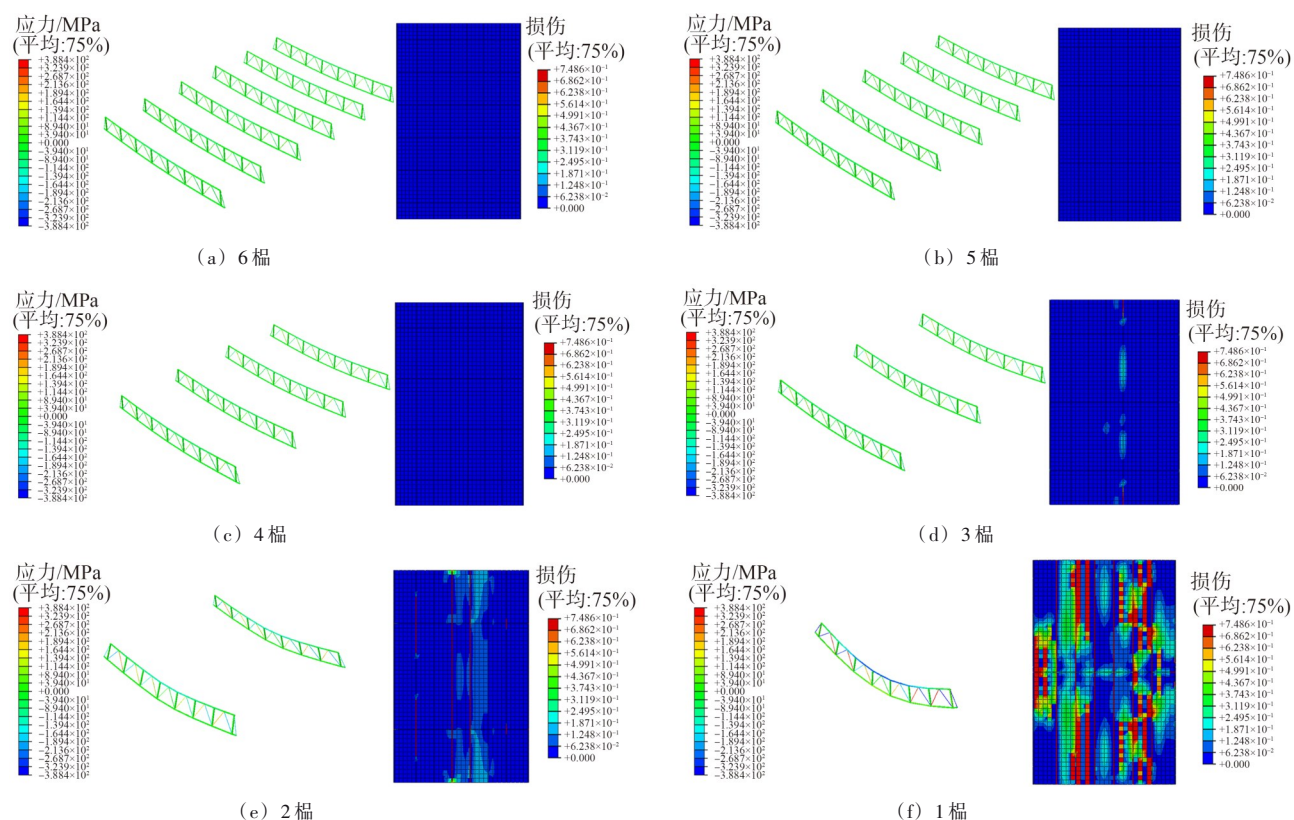
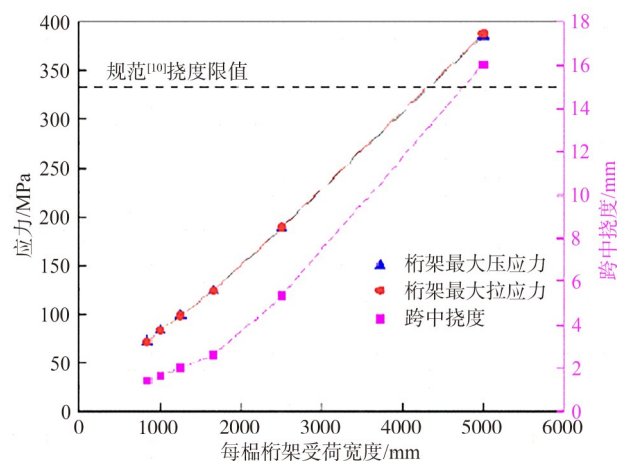


图 17 变榀数支撑下桁架应力云图及板底损伤

Fig. 17 Stress contour plots and slab bottom damage of the truss with variable numbers of supporting frames



注:图中每榀桁架受荷宽度为楼板长边尺寸/桁架支撑榀数。

图 18 跨中挠度和桁架单元应力随受荷宽度变化

Fig. 18 Variations of mid-span deflection and truss stress with the loading width

所示。

4)步骤4:楼面各块预制板吊装就位后,进行楼板预埋水电管线的铺设与板面钢筋的施工,预制板的垫块厚度约 60 mm,因此支撑架下方有约 70 mm 的空间提供水电管线敷设及板面钢筋施工,这显著大于传统钢筋桁架预制板的施工空间。与此同时,在预制板边缘的凹槽放置附加钢筋,如图 19 所示。

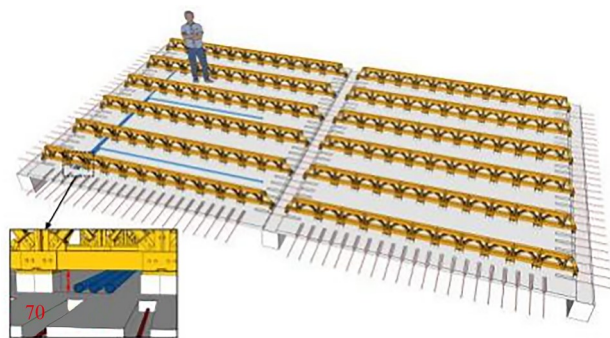


图 19 上承式桁架支撑与垫块安装示意 mm

Fig. 19 Installation schematic of the top-supporting truss and pads

5)步骤5:预埋管线及板面钢筋施工完成后,进行叠合层混凝土的浇筑,叠合层混凝土厚度为 60 mm,与垫块厚度同高。因此叠合层混凝土浇筑至与垫块齐平的高度即可,如图 20 所示。

6)步骤6:待叠合层混凝土达到预定强度后即可拆除支架。工人站在楼面将支撑架各支座的螺栓松开即可拆除支撑架,拆除后通过塔吊或汽车吊将整榀支撑架吊运至地面,也可将支撑架分解成各单元构件后通过人、货梯运回地面。螺栓孔在楼面

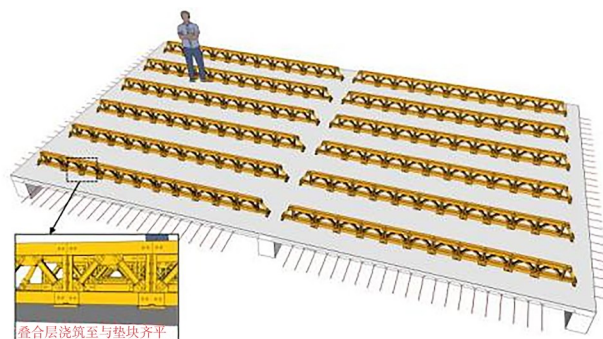


图 20 预制楼板板面浇筑后效果

Fig. 20 Schematic diagram of prefabricated slabs after casting

基层处理中用微膨胀砂浆进行填补。

3.2 上承式支撑架施工工法优点

1)上承式支撑架在板面进行施工,无需大面积的板底脚手架支撑,在层高较高的工业厂房中可避免出现高支模的情况,且相比传统支模体系,安、拆更方便,使用更安全,材料用量更少。

2)上承式支撑体系传力路径清晰可靠,支撑架直接锚固在预制楼板上,为楼板提供充足的面外刚度,且可作为预制楼板吊装时的分配梁。混凝土垫块可作为叠合楼板的抗剪键,加强叠合层与预制楼板的连接。

3)支撑桁架与叠合楼板通过 60 mm 高的垫块锚固连接,相比传统桁架钢筋预制板,为板面管道敷设及钢筋绑扎作业提供更充足的空间。

4)上承式支撑体系的模数化设计原则更契合建筑工业化和标准化的需求,可实现批量化和规模化生产。

以一个层高 5 m,一块长 5 m、宽 3 m 的叠合楼板施工现场举例说明其经济性。本文提出的上承式支撑桁架体系用钢量通过本文推荐值进行计算得到(为 3.36 kg/m²),板底支模的盘扣式脚手架每平方米用钢量^[14]为 27.64~64.55 kg/m²,且随着层高增加,用钢量增加。可以看出,上承式桁架支撑能大大降低用钢量,降低成本,且用钢量不随层高的增加而增加。表 2 为从生产、运输、安装、施工质量、安全性、经济性等方面对两种体系进行比较,结果表明上承式叠合板支撑体系较传统支撑体系更为优越。

4 结 论

本文提出了一种新型上承式模块化预制楼板支撑体系,通过数值模拟,对桁架体系叠合楼板进行

表 2 性能指标对比
Table 2 Comparison of performance indicators

项目	传统叠合板+板底支撑	密拼叠合板+上承式支撑
生产便利性	楼板四面出筋,模具开孔损耗大,模台利用率低	楼板不出筋,模台效率高
运输吊装便利性	单位面积自重大,桁架钢筋叠放易损坏	单位面积自重小,无桁架钢筋,直接叠放
安装便利性	板间设置后浇带,模板用量大,板底支模量大;与梁接触处安装麻烦;桁架钢筋阻碍管线铺设	密拼安装,无模板,无下部支撑,为下层工序提供工作面;水电管线敷设方便
施工质量	容易出现错台现象	板跨大,拼缝少,板底平整
施工安全性	模板支撑拆除工作位于板底,常为高处作业,危险性较大	支撑安、拆工作位于板面,安全性高
经济性	桁架钢筋用钢量大,高支模架体用钢量大,成本高,且随层高增加而增大	无需桁架筋,支撑可拆除重复利用,节省工期,节省支模措施费,用钢量不随层高变化而变化

参数敏感性分析,确定了支撑结构参数的合理取值,并提出一种适用于本体系的施工方法,得到以下结论:

1)上下弦杆为主要受力构件;斜杆尺寸的增大也能降低跨中挠度的发展,竖杆截面的变化对跨中挠度影响不大。因此综合考虑安全性、经济性和施工便利性,建议上下桁架杆件选取□30×30×3的方钢;斜杆选取□20×20×2的方钢;竖杆选取 L20×20×3的角钢。

2)桁架标准件长度过长将导致支撑刚度下降,因此建议桁架标准件长度取 500 mm。楼板跨中挠度随桁架受荷宽度增大而增大,建议每榀桁架受荷宽度为 1200~1600 mm。

3)采用上承式模块化支撑+新型密拼预制楼板的叠合楼盖体系施工操作简便、传力安全可靠,与传统底部支撑体系相比,在生产、运输、安装、施工质量、安全性、经济性等方面更为优越。

参 考 文 献

[1] 陈汐. 装配式混凝土叠合板施工工艺分析 [J]. 四川水泥, 2023 (10):138-140.
[2] 刘洋洋,郑春伟. 装配式叠合楼板施工质量控制 [J]. 建筑施工, 2018, 40 (10):1753-1755.
[3] 唐华雄,陈新旭. 装配式建筑叠合板与铝模结合处施工技术研

究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023 (28):177-179.
[4] 王少奎,黎东海,薛彪. 多层楼板现浇混凝土结构多层支撑体系研究 [C]//2021 年全国工程建设行业施工技术交流会论文集. 北京:2021.
[5] 杨信强,褚金栋. 叠合楼板后浇带模板安装方法对比分析与改进措施 [J]. 建筑施工, 2021, 43 (9):1814-1816.
[6] 王瑞璇. 装配式新型钢筋桁架混凝土叠合板受力性能研究 [D]. 西安:西安工业大学, 2023.
[7] 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.
[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
[9] 聂建国,王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究 [J]. 工程力学, 2013, 30 (4):59-67.
[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准: GB/T 50010—2010, [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2024.
[11] LI T, DENG M, ZHANG Y, et al. Study on flexural behavior of BFRCM-autoclaved aerated concrete composite slabs: effects of slab and strengthening thickness [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76:107382.
[12] 屈洋广,徐采薇,徐其功. 新型装配式全预制板-梁节点受力性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (24):54-61.
[13] 郭明. 混凝土塑性损伤模型损伤因子研究及其应用 [J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28 (3):128-132.
[14] 项广政. 承插型盘扣式脚手架搭设方案对材料用量的影响 [J]. 建筑施工, 2023, 45 (1):75-78.