

DOI: 10.7672/sgjs2026070158

钢筋桁架叠合板底板受力性能试验研究*

余传波

(中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 为研究钢筋桁架叠合板底板的受力性能,设计制作了足尺试件并进行静力加载试验,分析了试件的变形性能。在试验研究基础上,采用 ABAQUS 建立叠合板底板的有限元模型,揭示了钢筋和混凝土的应力分布规律,进行了钢筋直径、钢筋桁架个数、混凝土强度等参数扩展分析。结果表明,均布荷载作用下,叠合板底板的跨中挠度随荷载的增大而增加,并在荷载施加完成后随持荷天数的增加而增加;钢筋桁架及附近的混凝土底板为主要受力部件,前者承受压力,后者承受拉力;随着钢筋直径的增加,叠合板底板的跨中挠度显著减小;当钢筋桁架数量 ≤ 4 个时,随着钢筋桁架数量增加,叠合板底板的跨中挠度明显减小,但当钢筋桁架数量 >4 个,跨中挠度不再显著减小;增加混凝土强度对减小叠合板底板的跨中挠度效果不明显。

[关键词] 叠合板;钢筋桁架;挠度;试验;有限元分析

[中图分类号] TU375.2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0158-05

Experimental Study on Mechanical Performance of Base Plate for Rebar Truss Composite Slab

YU Chuanbo

(China Railway First Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: In order to study the mechanical performance of base plate for reinforcement truss composite slab, a full scale specimen was designed and fabricated, and the static loading test was carried out. The deformation behavior of specimen were analyzed. Based on the test, the finite element model of base plate for laminated slab was established by using ABAQUS. Stress distribution law of reinforcements and concrete was revealed, and parameter extension analysis, including reinforcement diameter, number of reinforcement truss and concrete strength, was implemented. Results showed that the deflection in the mid-span of base plate for laminated slab under uniform load increased with the load increasing, and after loading, the deflection increased with load holding time increasing. The reinforcement truss and its adjacent concrete bottom plate were the main mechanical part, by which the compression force and tension force were born respectively. As the reinforcement diameter increased, the deflection in the mid-span of base plate for laminated slab decreased significantly. When the number of reinforcement truss was no more than 4, the deflection in the mid-span of base plate for laminated slab decreased obviously, but when the number of reinforcement truss was more than 4, the deflection no longer decreased significantly. As the concrete strength increasing, there was no obvious effect on the deflection in the mid-span of base plate for laminated slab.

Keywords: laminated slab; reinforcement truss; deflection; tests; finite element analysis

0 引言

钢筋桁架混凝土叠合板采用钢筋桁架与混凝土叠合的形式,具有轻质、高强、耐久等优点^[1]。在

施工技术方面,传统楼板需现场支模并大量浇筑混凝土,工期长、施工难度大,而钢筋桁架混凝土叠合板采用工厂预制和现场拼装的方式,混凝土浇筑量少,减少了现场作业和人力投入,缩短了施工周期,提高了施工效率。

目前,已有学者对钢筋桁架混凝土叠合板的弯

* 中铁一局集团有限公司科技计划(JA2024B207)

[作者简介] 余传波,高级工程师,E-mail:757359610@qq.com

[收稿日期] 2025-09-30

曲性能、剪切性能等进行了深入研究,并取得了一定成果^[2-3]。研究表明,叠合板的预制部分(简称为“叠合板底板”)由混凝土和钢筋桁架共同受力,可以有效提高板的抗弯刚度^[4],在施工时避免大量使用脚手架和模板支撑,具有施工速度快、造价低的优势;待后浇完成,桁架腹杆钢筋又可以为楼板的抗剪提供有利作用,减少叠合面的滑移^[5]。因此,钢筋桁架混凝土叠合板在工程应用中优势显著。

然而,目前针对叠合板底板受力性能的研究尚不充分,模板支撑布置仍是一大难题。因此,本文对叠合板底板开展静力加载试验,分析叠合板底板的变形性能,并建立有限元模型进行叠合板底板的受力机理分析,明确不同设计参数的影响规律。

1 试验概况

1.1 试件设计

本次试验制作了足尺钢筋桁架混凝土叠合板底板,平面尺寸为 2 420mm×2 400mm,厚 60mm,如图 1 所示。混凝土强度等级为 C30,钢筋均采用 $\phi 10$ 的 HRB400 钢筋,其中板底钢筋间距 200mm。支座采用双边简支构造,两边支撑长度均为 50mm,板净跨为 2 320mm。

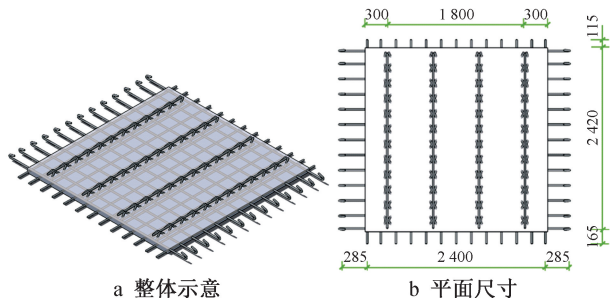


图 1 叠合板底板

Fig. 1 Base plate of laminated slab

1.2 加载及测量方案

叠合板底板自重为 8.35kN,根据 GB 50666—2011《混凝土结构工程施工规范》,取叠合板底板附加面荷载值为 $2\text{kN}/\text{m}^2$ 。

根据 GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》,采用均布荷载法进行加载。荷载分 6 级施加,每级施加的荷载按规范进行计算,并换算成对应数量的混凝土标准试块(150mm×150mm×150mm,重 8kg)均匀放置于叠合板底板上。每级加载的荷载值和对应试块的数量如表 1 所示,由于前 2 级施加的荷载计算结果为负值,因此前 2 级只承担底板自重,施加的荷载值和试块数量均为 0。加载方式如图 2 所示,叠合板底板两端放置于由混凝土

土试块支撑的水平钢梁上,在板底布置 3 个百分表,具体位置如图 3 所示,百分表 a, b 布置在跨度 2.42m 的边中点(支座处),表 c 布置在跨度 2.4m 的边中点(跨中处)。

表 1 不同加载级别施加的荷载值

Table 1 The applied load of test blocks corresponding to different loading level

加载级别	荷载百分比/%	荷载/kN	试块数量/个
1	20	0	0
2	40	0	0
3	60	3.3	42
4	80	7.2	91
5	90	9.2	115
6	100	11.1	140



图 2 均布荷载加载方式

Fig. 2 Loading method of uniform load

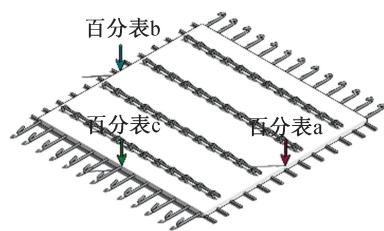


图 3 百分表布置

Fig. 3 Arrangement of dial indicator

每级荷载施加完成后,持荷 5~10min,待叠合板底板变形基本稳定后,记录变形数值。6 级加载全部完成后,记录 5d 内每天的底板变形数值。

$$F_{\text{附加}} = (f_c + f_{\text{附加}}) \cdot \alpha - f_c \quad (1)$$

式中: $F_{\text{附加}}$ 为所需施加的荷载值(kN); f_c 为叠合板底板自重(kN); $f_{\text{附加}}$ 为按叠合板底板附加面荷载值确定的附加荷载值(kN); α 为对应不同加载级别的荷载百分比,按表 1 取值。

2 试验结果分析

根据百分表测得的数据,减去自重产生的挠度(9.6mm),得到叠合板底板的跨中挠度,变化趋势如图 4 所示。支座处的挠度几乎相等且数值均较

小,可认为支座处无竖向位移;跨中处挠度随荷载的增大而增大;待荷载全部加载完成后,挠度值随持荷天数增加呈线性增长。根据 CECS 273—2010《组合楼板设计与施工规范》,预制板在标准组合下挠度限值取 20mm 和板净跨的 1/180 中的较小值,故本文试件的挠度限值为 13mm,而在施工荷载(2kN/m²)和自重作用下,其挠度达到 14.07mm,超出了规范规定的限值,因此在施工过程中需架设模板支撑,保证施工安全。

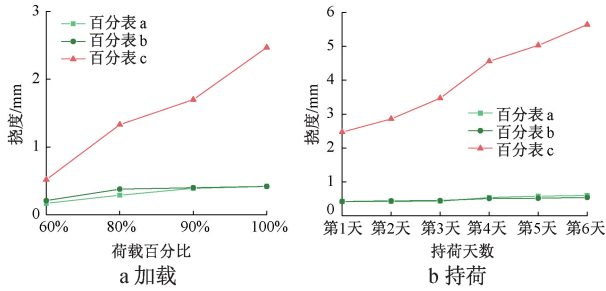


图 4 叠合板底板的挠度变化趋势

Fig. 4 Changing trend of deflection of base plate of composite slab

3 有限元分析

3.1 有限元模型建立

采用 ABAQUS 软件对叠合板底板的受力性能进行扩展分析,根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》,采用 CDP(混凝土塑性损伤)本构模型。混凝土采用 C3D8R 单元,纵向受力筋、水平分布筋和桁架钢筋均采用 beam 单元,使用双折线的弹塑性本构关系,并在混凝土表面对钢筋进行拆分^[6-7],拆分后内部钢筋使用 Embedded 命令内嵌于混凝土。叠合板底板的边界采用铰支座。有限元模型如图 5 所示。为确保计算精度,钢筋单元网格大小设为 10mm,混凝土网格为 50mm。

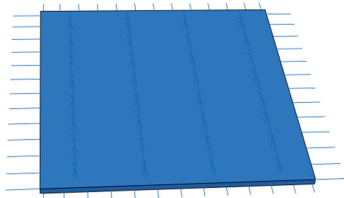


图 5 叠合板底板有限元模型

Fig. 5 Finite element model of base plate of laminated slab

3.2 受力性能分析

加载时叠合板底板钢筋和混凝土的应力云图变化规律如图 6,7 所示。

由图 6,7 可知,随着附加均布荷载的施加,叠合板底板跨中的桁架上弦钢筋承受压力,桁架钢筋附

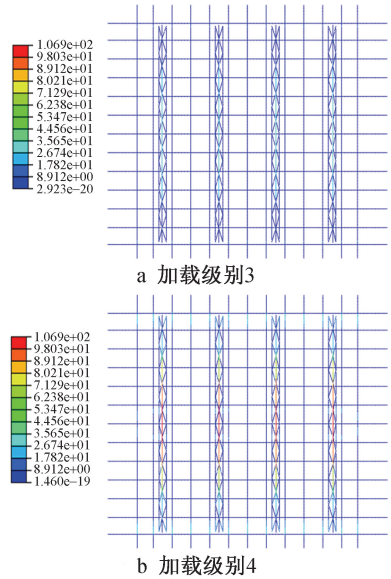


图 6 钢筋应力云图(单位:MPa)

Fig. 6 Stress cloud map of steel bars(unit:MPa)

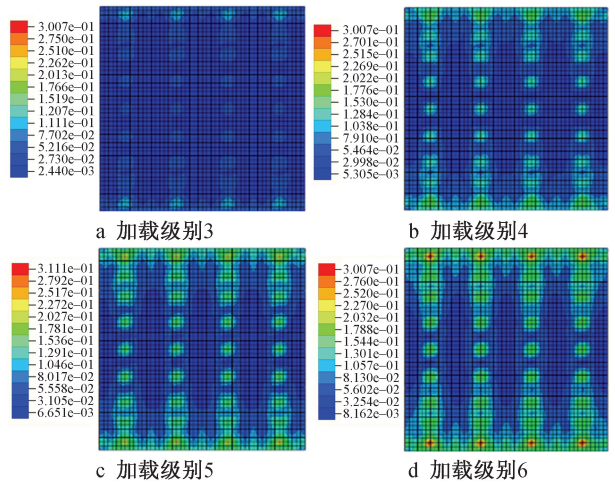


图 7 混凝土应力云图(单位:MPa)

Fig. 7 Stress cloud map of concrete(unit:MPa)

近的混凝土板受拉,应力呈点状分布(位于下弦杆钢筋与混凝土板交点),这是由于桁架钢筋的存在使得该截面的腹杆钢筋其中 1 个分力方向垂直于板面,并导致此处混凝土出现应力集中现象;随着荷载增加,跨中的上弦钢筋应力随之增加,且混凝土板的点状应力面积不断增大;支座处由于没有桁架钢筋,开始加载时,混凝土板中和轴以上受压、以下受拉,随着荷载不断增大,纵向钢筋开始参与受力。

加载结束时,桁架上弦钢筋应力最大,支座纵向受力筋次之;混凝土板在支座处应力最大,桁架钢筋位置附近次之,这是由于支座处缺少桁架钢筋,导致此处刚度发生突变。由此可知,叠合板底板的荷载由桁架钢筋及其附近混凝土承担,其余位置几乎不参与受力。

3.3 参数分析

探究不同钢筋直径、钢筋桁架个数和混凝土强度对叠合板底板受力性能的影响。参数分析时,仍施加试验中的附加均布活荷载 2kN/m^2 ,并为了方便进行不同位置处挠度值的对比,将叠合板底板沿跨度分为6份,如图8所示。

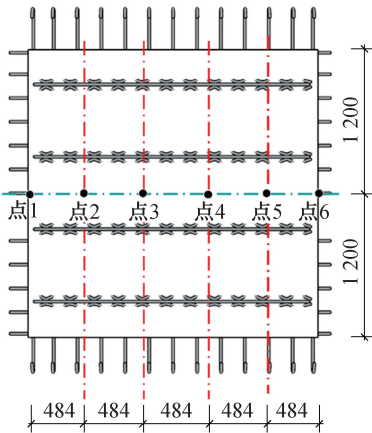


图8 叠合板底板选取点

Fig. 8 Selected points for composite slab base plate

3.3.1 钢筋直径

选取直径6,8,10,12,14mm的钢筋(包括纵向受力筋、水平分布筋和桁架钢筋)建立5个不同的叠合板底板模型,得到沿跨度的挠度,如图9所示。不同直径的钢筋对叠合板底板挠度有较大影响,钢筋直径 $<10\text{mm}$ 时,挠度增长幅度较大, $>10\text{mm}$ 时涨幅较小;当钢筋直径为12mm时,跨中处挠度为3.42mm,此时叠合板底板挠度满足规范限值要求,因此施工时可以通过增大钢筋直径减小叠合板底板的挠度。

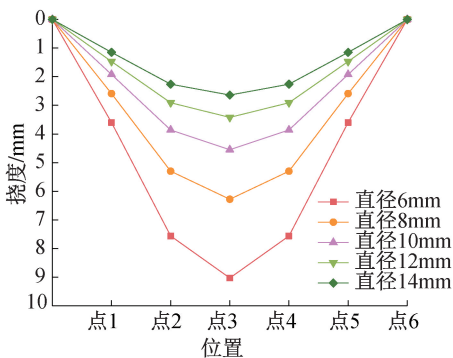


图9 不同钢筋直径的叠合板底板的挠度变化规律

Fig. 9 Changing trend of deflection of base plate for composite slab with different diameter of reinforcements

3.3.2 钢筋桁架个数

选取0,2,3,4,5个钢筋桁架在板宽范围内均匀布置,建立不同的叠合板底板模型进行分析,得到

沿跨度的挠度,如图10所示。钢筋桁架在限制叠合板底板的挠度方面作用显著,无钢筋桁架的叠合板底板挠度曲线呈现“几”字形,跨中附近挠度增幅明显,有钢筋桁架的叠合板底板曲线呈抛物线状,挠度增长较为平缓;当钢筋桁架少于4个时,挠度基本呈均匀增长,而4个与5个钢筋桁架的叠合板底板之间差距较小,但挠度依然超过规范限值,所以该试件布置4个钢筋桁架最为经济有效。

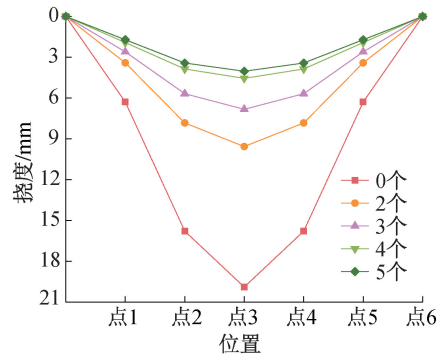


图10 不同钢筋桁架个数的叠合板底板的挠度变化规律

Fig. 10 Changing trend of deflection of base plate for composite slab with different number of reinforcement truss

无钢筋桁架的混凝土板应力集中分布于板跨中和板支座处,而钢筋桁架的存在改变了混凝土的应力分布,使应力集中于钢筋桁架附近处的混凝土。

2,3,4,5个钢筋桁架的最大应力均在上弦钢筋处,分别为159.6,128.9,106.9,87.8MPa,同时对比混凝土的应力大小说明增加桁架钢筋的个数可以有效降低上弦钢筋的最大应力大小,延缓钢筋屈服时间,扩大混凝土的受力区域,提高结构的承载力。

3.3.3 混凝土强度

选取强度等级为C20,C25,C30,C35和C40的混凝土,建立不同的叠合板底板模型进行分析,得到沿跨度的挠度,如图11所示。不同混凝土强度等级的叠合板底板之间板挠度差别很小,因此提高混凝土的强度等级来减小施工阶段叠合板底板的挠度并不可取。

4 结语

1)对足尺叠合板底板进行了静力加载试验,试件跨中处的挠度随荷载的增大而增大,待荷载全部施加完成后,跨中处的挠度随持荷天数呈线性增加,并在第6天时超过了规范规定的挠度限值。因此,采用该叠合板底板施工时需要架设模板支撑。

2)采用ABAQUS软件建立了叠合板底板的有限元模型,计算结果与试验结果吻合较好,表明本文方法能够较好地模拟叠合板底板的受力性能。

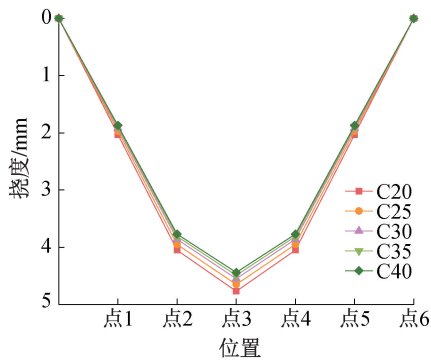


图 11 不同混凝土强度等级的叠合板底板的挠度变化规律

Fig. 11 Changing trend of deflection of base plate for composite slab with different concrete strength

叠合板底板在均布荷载作用下,桁架上弦钢筋受压、混凝土板受拉,底板混凝土应力呈点状分布;全部荷载几乎由桁架钢筋及其附近的混凝土承担。

3)增加钢筋直径为减小叠合板底板跨中挠度的有效措施;增加钢筋桁架个数也能够减小叠合板底板的跨中挠度,但多于4个后效果不明显,且挠度无法减小至规范限值以内;增加混凝土强度对改善叠合板底板的变形性能效果较差。

参考文献:

[1] 徐柳. 房屋建筑装配式混凝土结构的经济效能探讨[J]. 混凝土, 2018(5): 115-117, 122.
XU L. Discussion on economic efficiency of precast concrete structure of housing construction [J]. Concrete, 2018(5): 115-117, 122.

(上接第 146 页)

[24] 张跃明,李威,林天干,等. 地聚合物软土强度影响因素试验研究[J]. 公路, 2016, 61(11): 198-204.
ZHANG Y M, LI W, LIN T G, et al. Experimental study on influencing factors of geopolymers soft soil strength [J]. Highway, 2016, 61(11): 198-204.

[25] 刘旭,张默,邵龙潭. 地质聚合物加固含硫软土的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 136-142.
LIU X, ZHANG M, SHAO L T. Experimental study on sulfate rich-soil stabilization with geopolymer [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2018, 16(4): 136-142.

[26] 杨望星,陈柯宇,俞焯炜,等. 粉煤灰基地聚合物替代水泥加固软土的试验研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2022, 47(3): 433-440.
YANG W X, CHEN K Y, YU Y W, et al. Experimental study on replacing cement reinforced soft soil with fly ash-based geopolymer [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (natural sciences edition), 2022, 47(3): 433-440.

[2] 皮正波,魏奇科,兰涌森,等. 配置钢筋桁架的钢筋混凝土叠合板的剪弯性能研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(6): 51-57.
PI Z B, WEI Q K, LAN Y S, et al. Research on shear and bending properties of composite reinforced concrete slabs with reinforced trusses [J]. Industrial construction, 2020, 50(6): 51-57.

[3] 张弛,朱杰江. 钢筋桁架混凝土双向叠合板的力学性能分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(5): 75-79.
ZHANG C, ZHU J J. Mechanical behavior analysis of reinforced truss concrete two-way composite slabs [J]. China concrete and cement products, 2020(5): 75-79.

[4] 刘伟,刘文慧. 钢筋桁架-混凝土楼板的力学性能研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2017, 34(5): 13-16.
LIU W, LIU W H. Steel bar truss-wheat straw concrete floor the development trend of research [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2017, 34(5): 13-16.

[5] 刘洋,李志武,杨思忠,等. 装配式建筑叠合楼板研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(1): 61-68.
LIU Y, LI Z W, YANG S Z, et al. Development progress on composite slabs for prefabricated buildings [J]. China concrete and cement products, 2019(1): 61-68.

[6] 高新宇. 钢筋桁架混凝土叠合板预制底板力学性能的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
GAO X Y. Research on mechanical properties of the steel bar truss concrete and superimposed precast slab [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.

[7] 杨旭杰,彭修宁,柯晓军,等. 钢管桁架倒T形叠合板施工阶段短期刚度研究[J]. 混凝土, 2023(6): 159-162.
YANG X J, PENG X N, KE X J, et al. Study on short-term stiffness of steel tube truss inverted T-shaped composite slab during construction stage [J]. Concrete, 2023(6): 159-162.

[27] 陈瑞敏,简文彬,张小芳,等. CSFG-FR 协同作用改良淤泥固土性能试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1020-1030.
CHEN R M, JIAN W B, ZHANG X F, et al. Experimental study on performance of sludge stabilized by CSFG-FR synergy [J]. Rock and soil mechanics, 2022, 43(4): 1020-1030.

[28] 姚钧天,杨建宇,杨伟军,等. 工业固废协同固化红砂岩土试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(7): 2730-2740.
YAO J T, YANG J Y, YANG W J, et al. Synergistic solidification of red sandstone soil by industrial solid waste [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2025, 44(7): 2730-2740.

[29] 张顶飞,刘涛,郝琪,等. 固废基地质聚合物固化沿海软土的力学机理与劣化性能研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(6): 1582-1596.
ZHANG D F, LIU T, HAO Q, et al. Investigation of mechanical mechanisms and deterioration properties of geological polymers from solid waste for stabilizing coastal soft soils [J]. Journal of basic science and engineering, 2024, 32(6): 1582-1596.