

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



新型双向钢筋桁架叠合板底板受力性能试验研究

杨秀英¹, 魏振宇¹, 王示², 王卫永³

(1. 聊城大学 建筑工程学院, 山东 聊城 252000; 2. 山东建筑大学 土木工程学院, 济南 250101;

3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:装配式建筑中, 钢筋桁架叠合板作为主要受力构件应用广泛, 然而, 其底板在工地安装前经常出现开裂现象, 导致叠合板无法使用。提出一种新型双向钢筋桁架叠合板, 即在传统钢筋桁架叠合板上安装横向附加钢筋支架, 从而提高叠合板的抗弯承载力。为了考察安装的横向钢筋支架对叠合板底板开裂状态和受力特性发挥的作用, 分别对双向钢筋桁架叠合板底板和普通单向钢筋桁架叠合板底板进行静力加载试验, 得到底板的开裂弯矩、裂缝分布及跨中挠度、应变等随荷载的变化规律。研究表明: 在相同荷载作用下, 相比于传统的单向钢筋桁架叠合板, 双向钢筋桁架叠合板底板的开裂弯矩更大, 裂缝发展更缓慢, 跨中挠度、应变均较小, 双向钢筋桁架能显著提高叠合板底板的抗裂性能, 有效控制裂缝的开展。

关键词:双向钢筋桁架; 叠合板; 底板; 裂缝; 静力试验

中图分类号: TU375.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)04-0084-07

Experimental study on the mechanical properties of the baseplate of composite slab with two-way steel truss

YANG Xiuying¹, WEI Zhenyu¹, WANG Shi², WANG Weiyong³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, Shandong, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, P. R. China;

3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: In prefabricated buildings, steel truss composite slabs are widely used as the main force-bearing components. However, the baseplate often cracks before installation on the site, which makes the composite slabs unusable. In this paper, a new type of two-way steel truss composite slab has been proposed, which installs additional transverse steel support on the traditional reinforced truss composite slab, thereby improving the flexural bearing capacity of the composite slab. In order to investigate the effect of the installed transverse steel truss on the cracking state and mechanical characteristics of the composite slab, static loading tests were carried out on the two-way steel truss composite slab baseplate and the ordinary one-way steel truss composite slab floor. The variation rules of the cracking moment, crack distribution, mid span deflection and strain with loads were obtained through the tests. The results show

收稿日期: 2020-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(51878096)

作者简介: 杨秀英(1979-), 女, 副教授, 博士, 主要从事钢结构抗火、装配式建筑关键技术研究, E-mail: yangxiuying@lcu.edu.cn.

Received: 2020-11-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51878096)

Author brief: YANG Xiuying (1979-), associate professor, PhD, main research interests: fire safety of steel structure, key technology of prefabricated building, E-mail: yangxiuying@lcu.edu.cn.

that, under the same load, compared with the traditional one-way steel truss composite slab, the cracking moment of the two-way steel truss composite slab baseplate is larger, the cracks develop more slowly, and the mid-span deflection and strain are smaller. The two-way steel truss can significantly improve the anti-cracking performance of the composite slab baseplate and effectively control the crack development.

Keywords: two-way steel truss; composite slab; baseplate; crack; static test

随着建筑产业化发展,钢筋桁架叠合板作为一种重要的预制构件被广泛应用于装配式建筑工程中。简化工序、降低成本、节约资源是建筑业发展的趋势。学者们针对叠合板的性能开展了一系列相关研究^[1-3],并取得了一定的成果。Nam等^[4]和Hanus等^[5]提出了一种FRP底板-混凝土双向组合板。吴方伯等^[6-8]提出了一种带格构钢筋的预制叠合底板。黄海林等^[9]研究了T形板肋对预制带肋底板混凝土叠合板弯曲疲劳性能的影响。刘香等^[10]研究了预制带肋钢筋桁架叠合板。章雪峰等^[11]对四边不出筋、板侧采用密拼连接的钢筋桁架叠合板进行了加载试验,得到了垂直拼缝方向板带刚度略小于平行拼缝方向板带刚度的结论。汤磊等^[12]通过对钢筋桁架混凝土叠合板和现浇双向板进行对比试验,结合中国规范和相关理论提出了叠合双向板的刚度和挠度计算方法。李杰等^[13]对4块不同形式的钢筋桁架叠合板展开受弯性能试验,结果表明,挠度是板型设计的控制因素。余泳涛等^[14]提出了双向叠合板密拼拼缝的设计建议与构造要求。以上研究成果为探索钢筋混凝土叠合板的力学性能提供了宝贵的试验数据和研究资料,促进了叠合板整体性能的进一步提升,为新型叠合结构的推广提供了一定的理论依据和试验支持。现有研究主要集中在叠合板完成现浇层浇注后的整体受力性能,而针对充当模板的叠合板底板力学性能研究相对较少。

作者通过对大量项目的调研发现,在装配式钢结构和混凝土结构的实际工程应用中,许多宽度较大的叠合楼板在浇筑现浇层之前的安装准备阶段就已经存在开裂现象,甚至导致叠合板报废,无法使用。并且板厚度越小,裂缝越明显。《钢管桁架预应力混凝土叠合板技术规程》(T/CECS 722—2020)规定底板厚度最小可以做到35 mm,而《ZDB预应力混凝土叠合板》(L15GT58)规定底板厚度最小可以做到40 mm。大部分裂缝在叠合板安装之前就已经出现了,例如某两栋30层高层项目的叠合板,在工地安装前的验收中裂缝板多达30%以上。为了解决这一问题,开展了叠合板在浇筑现浇层之前底板

性能的相关研究。叠合板底板在安装之前就出现裂缝,并且板厚度越小裂缝越明显,是由于底板厚度较小、横向受弯刚度不足所致。因此,提出改善措施,对厚度较小的宽板在短跨方向增加附加钢筋支架,形成双向桁架,对这种新型的双向钢筋桁架板开展静载试验并进行分析。笔者针对双向钢筋桁架叠合板底板和普通单向钢筋桁架叠合板底板开展静力加载试验,对比二者的裂缝开展、挠度、应变等性能,分析了双向钢筋桁架对底板开裂状态和力学性能提升所起的作用。

1 试验过程

1.1 试件设计

试验制作了两块不同钢筋桁架形式的叠合板底板,分别设置双向钢筋桁架和传统单向钢筋桁架。其中,第1块板DHB1为双向钢筋桁架底板,即在图集《桁架钢筋混凝土叠合板》(15G366-1)中B90型双向板的基础上增加3个横向附加钢筋支架,形成一种新型双向钢筋桁架叠合板底板;第2块板DHB2即为未增加横向钢筋支架的原B90型叠合板底板,该板作为试验对比板。两块叠合板底板DHB1和DHB2的尺寸均为4 200 mm×2 400 mm×60 mm,混凝土采用C25,保护层厚度15 mm。底板跨度、宽度方向配筋均为HRB400等级 $\phi 8@200$,纵向桁架上弦钢筋为HRB400等级 $\phi 10$,下弦为HRB400等级 $\phi 8$,腹杆为HPB235等级 $\phi 6$,横向附加钢筋支架长度2 300 mm,上弦钢筋为HRB400等级 $\phi 10$,腹杆HPB235等级 $\phi 6$,无下弦杆。双向钢筋桁架叠合板底板DHB1和普通单向钢筋桁架叠合板底板DHB2配筋示意图和照片分别见图1和图2。

试件的面积为10.1 m²,试件DHB1采用钢筋103.5 kg,试件DHB2采用钢筋93.1 kg,钢筋用量仅增加11.2%。按单位面积计算,用钢量仅增加1 kg/m²。

试验时实测混凝土试块(100 mm×100 mm×100 mm)和钢筋抗拉强度见表1、表2。从表中可以看出,混凝土强度达到了C25的设计标准值,钢筋也均达到了相应等级的屈服强度和极限强度。

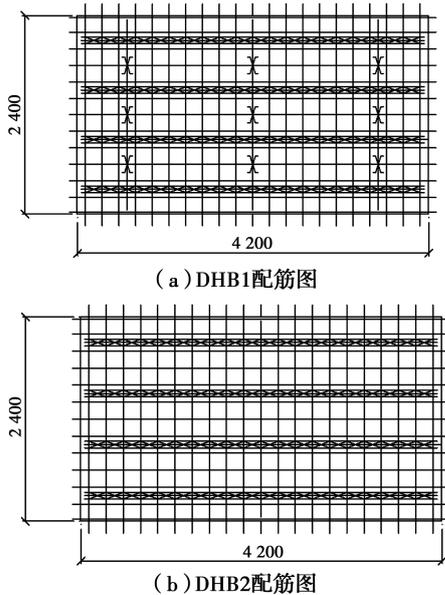


图 1 试件配筋示意图

Fig. 1 Enforcement arrangement of the specimen

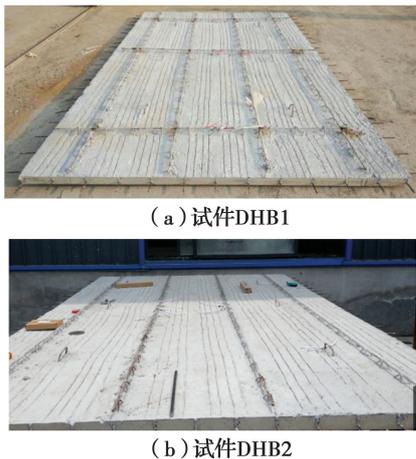


图 2 叠合板底板试件照片

Fig. 2 Photo of bottom composite slab

表 1 混凝土实测强度

Table 1 Concrete measured strength

试件编号	养护时间/d	混凝土强度/MPa
DHB1	25	27.5
DHB2	26	28

表 2 钢筋力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel bars

钢筋	直径/mm	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa	伸长率%
上弦筋	10	450	595	27
下弦筋	8	420	545	28
腹杆	6	320	430	28

1.2 测点布置及加载方案

由于裂缝多发生于叠合板底板安装之前,此时板底还没有钢架木方的支撑,对于 4 200 mm×2 400 mm 的宽板,工程中均采用 6 点支撑,该支撑状态下,板呈现出双向板的受力特征。为模拟叠合板底板的真实受力状态,试验中同样设置了 6 点支撑,每个支撑点放置 1 个木垫块,垫块尺寸为 200 mm×100 mm×100 mm,垫块与板长边(或短边)边缘的距离为 200 mm,中间垫块沿板长边方向间距 1 900 mm,垫块位置如图 3 所示。

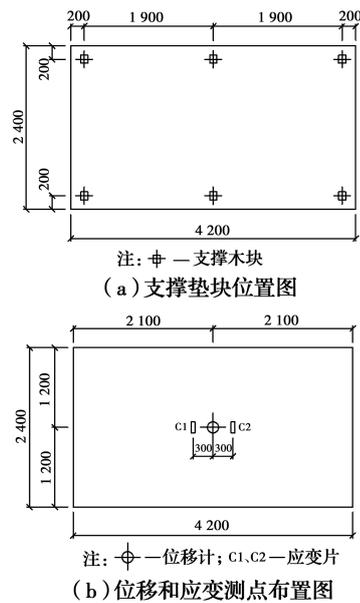


图 3 垫块及仪器布置图

Fig. 3 Arrangement of displacement meter and strain gauges

试验中采用差动式位移传感器测量了板的跨中挠度值,位移计布置在板底跨中位置。采用应变片测量了板底部的应变值,应变片布置位置见图 3。

试验采用均布加载方式,用沙袋施加荷载(图 4 所示),每级荷载设置为 0.12 kN/m²,沿板面均匀施加,以模拟板上均布荷载,每级荷载持荷 5 min,采用裂缝综合测试仪(图 5 所示)观察并标记板底裂缝开展情况。荷载逐级施加,以板达到正常使用极限状态作为试件的对比状态。依据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[15]对构件挠度限值以及最大裂缝宽度的规定,出现下述两个条件之一,即认为板达到正常使用极限状态:1)跨中挠度达到 9 mm; 2)最大裂缝宽度达到 0.2 mm。

2 试验结果与分析

2.1 裂缝开展及裂缝形式

叠合板底板 DHB1、DHB2 的裂缝开展情况如



图 4 试件加载和支撑照片

Fig. 4 Specimen loading and supporting block

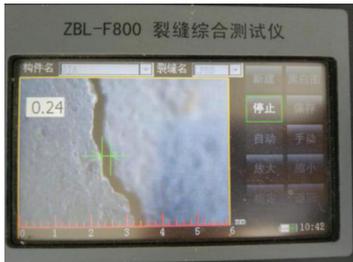


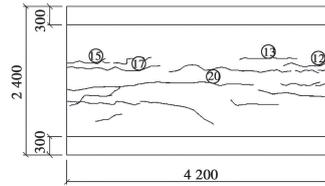
图 5 裂缝综合测试仪

Fig. 5 Fracture comprehensive tester

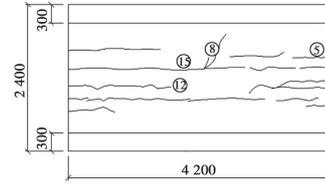
图 6 所示。对于 DHB1,当加载到 12 级荷载(1.44 kN/m^2)时,板底开始出现微小裂缝;加载至 13 级荷载(1.56 kN/m^2)时出现裂缝⑬,长度约 300 mm,宽度 0.05 mm;当加载至 15 级荷载(1.8 kN/m^2)时,板的左右两侧短边均出现裂缝⑮,长度约 200 mm,宽度 0.11 mm;加载至 17 级荷载(2.04 kN/m^2)时,跨中左右两侧出现长裂缝⑰,长度约 1 100 mm;当加载至 20 级荷载(2.4 kN/m^2)时,板底跨中出现 0.2 mm 裂缝⑳,认为已经达到了正常使用极限状态。

对于 DHB2,当加载到 5 级荷载(0.6 kN/m^2)时,板底开始出现微小裂缝;加载至 8 级荷载(0.96 kN/m^2)时,板底开始出现裂缝⑧,裂缝长度 1 600 mm,宽度 0.11 mm;当加载到 12 级荷载(1.44 kN/m^2)时,底板左侧边缘产生的裂缝与跨中裂缝连通,形成通常裂缝⑫;当加载到 15 级荷载(1.8 kN/m^2)时,板底跨中出现 0.2 mm 裂缝⑮,认为已经达到了正常使用极限状态。

两种叠合板底板的裂缝在纵向有相似的发展规律,由试验结果可知,DHB1 出现微小裂缝时对应的荷载值明显高于 DHB2,裂缝的开展速度也比 DHB2 要缓慢很多。板底跨中出现 0.2 mm 裂缝即板达到正常使用极限状态时,DHB1 的荷载为 2.4 kN/m^2 ,DHB2 的荷载为 1.8 kN/m^2 ,DHB1 比 DHB2 提高了 33%左右。可见,双向钢筋桁架对控制叠合板底板裂缝的开展所起的作用非常显著。



(a) DHB1 裂缝示意图



(b) DHB2 裂缝示意图



(c) DHB1 裂缝照片



(d) DHB2 裂缝照片

图 6 底板裂缝

Fig. 6 The cracks of bottom slab

2.2 荷载-挠度曲线

图 7 给出了 DHB1 和 DHB2 的荷载-挠度曲线。通过曲线可以看出,两种叠合板底板跨中挠度的发展趋势相近,加载初期荷载较小,挠度也较小,随着荷载的进一步增大,DHB1 的荷载-挠度曲线发展较为平缓,而 DHB2 曲线相对较陡,当荷载达到 2 kN/m^2 时,试件 DHB1 和 DHB2 的挠度值分别为 3.5 mm 和 8.0 mm,增加横向钢筋支架后,挠度降低了 56%。说明双向钢筋桁架叠合板底板的刚度与普通单向钢筋桁架叠合板相比有了显著提高。在钢筋成本增加 11% 的条件下,试件的刚度提升了 56%,效果显而易见。

2.3 荷载-应变曲线

试件 DHB1 和 DHB2 的板底各有两组应变片 C1、C2,分别读取应变片的数据,并将应变随荷载的变化对比曲线绘于图 8。从图中可以看出,无论是 C1 位置还是 C2 位置,在相同荷载作用下,DHB1 产生的应变明显小于 DHB2。当荷载达到 2 kN/m^2 时,试件 DHB1 的应变值比试件 DHB2 的应变值降

低 50%左右。可见,增加横向附加钢筋支架而形成的双向钢筋桁架可以明显提高底板的刚度和整体性,减小板的应变,延缓底板的变形。

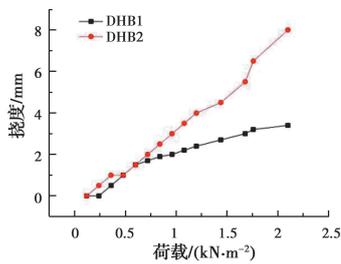
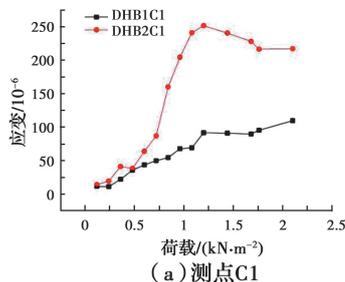
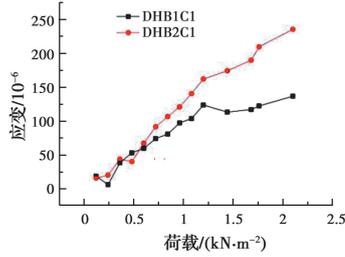


图 7 荷载-挠度曲线

Fig. 7 The load-deflection curves



(a) 测点C1



(b) 测点C2

图 8 试件的荷载-应变曲线

Fig. 8 The load-strain curves of the specimens

增加的附加钢筋支架不仅可以提高荷载作用下底板的抗裂能力,同时也能对因混凝土收缩及温度变化等原因产生的变形裂缝起到有效的控制作用。

3 理论分析和计算

双向钢筋桁架对叠合板底板力学性能的有利作用也可以通过理论分析进行说明,分别计算双向钢筋桁架底板 DHB1 和单向钢筋桁架底板 DHB2 的开裂弯矩,并与试验结果进行对比。

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的规定,结合过镇海等^[16]的研究,钢筋混凝土受弯构件的开裂弯矩通过式(1)、式(2)计算。

$$M_{cr} = \gamma f_{tk} W_0 \quad (1)$$

$$W_0 = \frac{I_0}{h - x_0} \quad (2)$$

式中: M_{cr} 为受弯构件开裂弯矩计算值; γ 为混凝土构件截面抵抗矩塑性影响系数; W_0 为试验板的换算截面受拉边缘的截面抵抗矩; x_0 为混凝土受压区高度。

底板内的钢筋,按钢筋与混凝土弹性模量比 $n(n=E_s/E_0)$ 换算成等效面积 nA_s 后,将钢筋混凝土板看作均质弹性材料,计算换算截面面积 A_0 、受压区高度 x_0 、换算截面惯性矩 I_0 和受拉边缘的截面抵抗矩 W_0 等。

由于裂缝开展大多为纵向,因此,对控制裂缝开展起主要作用的为附加钢筋支架,计算时主要考虑附加钢筋支架的贡献。对于 DHB2,把板内钢筋按弹性模量比换算成等效面积 nA_s ,将底板看做均匀弹性材料代入以上公式进行计算。对于 DHB1,由于增加了附加钢筋支架,除了按照 DHB2 的方法把钢筋换算成等效面积 nA_s 外,同时,还要把钢筋支架换算成等效面积 nA_s' , A_s' 为附加支架上弦钢筋截面面积。然后按照换算截面进行开裂弯矩的计算,并将开裂弯矩的计算值 $M_{cr,c}$ 和试验值 $M_{cr,t}$ 进行对比,结果见表 3,其中,开裂弯矩试验值取跨中最大弯矩。由表 3 可以看出,开裂弯矩计算值与试验值比较接近,与普通的单向钢筋桁架相比,双向钢筋桁架叠合板底板开裂弯矩无论是计算值还是试验值均有大幅度提高。

表 3 开裂弯矩对比表

Table 3 Cracking moment comparison table

试件编号	计算值	试验值	相对误差
	$M_{cr,c}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_{cr,t}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	差/%
DHB1	6.84	6.60	3.0
DHB2	4.75	4.76	0.2

通过以上对比试验和理论计算可以得到,在相同的均布荷载作用下,双向钢筋桁架叠合板底板的开裂弯矩、跨中挠度、板底应变等性能指标均优于普通单向叠合板底板。在单向钢筋桁架板上增加 3 个横向附加钢筋支架,桁架与支架之间通过焊接相连,近似形成刚性连接,从而形成纵横钢筋桁架网。桁架网与底板共同工作,大幅度提高了钢筋桁架与底板的整体刚度,进而减小叠合板底板的挠度和应变,提高叠合板底板的开裂弯矩。

根据试验和分析结果,把新型双向钢筋桁架应用于实际工程项目中,经过对施工过程的跟踪调查

统计,板底基本没有出现裂缝,效果良好,结论得到了实际工程验证。图9为实际工程项目应用中新型双向钢筋桁架叠合板底板的制作过程。



图9 工程应用照片

Fig. 9 Photos in engineering application

4 结论

通过对两种不同形式钢筋桁架叠合板底板的对比试验和分析,得到如下结论:

1) 钢筋桁架叠合板底板通过增设横向附加钢筋支架,使得钢筋桁架形成纵横交叉网格,与底板混凝土共同工作,可以显著提高叠合板底板的整体刚度。

2) 在相同均布荷载作用下,双向钢筋桁架叠合板底板开裂弯矩、挠度变化、板底应变及裂缝开展均优于单向钢筋桁架板,针对试验情况,新型双向钢筋桁架叠合板底板比普通单向钢筋桁架叠合板底板的正常使用极限荷载提高了33%左右。

3) 试验表明,宽度较大的叠合板底板,采用双向钢筋桁架可以有效地控制裂缝的开展。

本文的横向附加钢筋支架是针对试验采用的板型而布置的,当底板尺寸、材料强度、支承方式等条件变化时,要根据具体情况进行有效性和经济性的综合评判,从而进行支架间距的调整,这一问题将在今后的工作中进一步深入研究。

参考文献:

[1] KOSTECKI T, SPEARING A J S. Influence of backfill on coal pillar strength and floor bearing capacity in weak floor conditions in the Illinois Basin [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 76: 55-67.

[2] LEE B, TRCKA M, HENSEN J L M. Embodied energy of building materials and green building rating systems: A case study for industrial halls [J]. Sustainable Cities and Society, 2011, 1(2): 67-71.

[3] SLATNICK S, RIDING K A, FOLLIARD K J, et al.

Evaluation of autogenous deformation of concrete at early ages [J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(1): 21-28.

- [4] NAM J H, YOON S J, MOON H D, et al. Development of FRP-concrete composite bridge deck in Korea - state-of-the-art review [J]. Key Engineering Materials, 2006, 326/327/328: 1705-1708.
- [5] HANUS J P, BANK L C, OLIVA M G. Combined loading of a bridge deck reinforced with a structural FRP stay-in-place form [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(4): 1605-1619.
- [6] 吴方伯, 付伟, 文俊, 等. 新型叠合板拼缝构造静载试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(4): 1-10.
- WU F B, FU W, WEN J, et al. Static load experiment of new type of laminated plate joint structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(4): 1-10. (in Chinese)
- [7] 吴方伯, 黄海林, 陈伟, 等. 预制带肋薄板混凝土叠合板件受力性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(4): 7-12, 19.
- WU F B, HUANG H L, CHEN W, et al. Experimental analysis on the mechanical properties of concrete composite slabs with precast prestressed rectangular rib panels [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(4): 7-12, 19. (in Chinese)
- [8] 吴方伯, 邓利斌, 刘彪, 等. 四边简支单向预应力双向配筋混凝土叠合楼板试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(5): 6-11.
- WU F B, DENG L B, LIU B, et al. Experimental study on four-sides simply supported single-direction-prestress double-direction-tendon concrete composite floorslab [J]. Building Structure, 2014, 44(5): 6-11. (in Chinese)
- [9] 黄海林, 祝明桥, 曾垂军, 等. T形板肋对预制带肋底板混凝土叠合板弯曲疲劳性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(2): 11-20.
- HUANG H L, ZHU M Q, ZENG C J, et al. Influence of T-type rib on flexural fatigue behavior of concrete composite slab with precast prestressed ribbed panel [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(2): 11-20. (in Chinese)
- [10] 刘香, 倪东阳, 李娟. 预制带肋钢筋桁架叠合板的试验与有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(1): 42-52.

- LIU X, NI D Y, LI J. Experimental study and finite element analysis of prefabricated ribbed steel truss laminated slabs [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2018, 34(1): 42-52. (in Chinese)
- [11] 章雪峰, 郑曙光, 单玉川, 等. 四边不出筋密拼连接叠合双向板足尺试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(15): 83-87.
- ZHANG X F, ZHENG S G, SHAN Y C, et al. Experimental study on full-scale steel bar truss superimposed two-way slabs without extending reinforcement on all sides and connected without gap [J]. Building Structure, 2019, 49(15): 83-87. (in Chinese)
- [12] 汤磊, 郭正兴, 丁桂平. 新型钢筋桁架混凝土叠合双向板结构性能试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(11): 49-53.
- TANG L, GUO Z X, DING G P. Structural performance test research on the new steel bar truss concrete superimposed two-way slab [J]. Industrial Construction, 2013, 43(11): 49-53. (in Chinese)
- [13] 李杰, 黄鹏飞, 陈以一, 等. 无支撑钢筋桁架混凝土叠合板受力性能试验研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(4): 132-139.
- LI J, HUANG P F, CHEN Y Y, et al. Experimental research on mechanical properties of self-sustaining steel bar truss and concrete superposed slab [J]. Structural Engineers, 2013, 29(4): 132-139. (in Chinese)
- [14] 余泳涛, 赵勇, 高志强. 单缝密拼钢筋混凝土叠合板受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(4): 29-37.
- YU Y T, ZHAO Y, GAO Z Q. Experimental research on flexural behavior of reinforced concrete composite slab connected without gap [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4): 29-37. (in Chinese)
- [15] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Build Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- GUO Z H, SHI X D. Reinforced concrete theory and analyse [S]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)