

引用本文:吴方伯,李 博,文 俊,等. 新型带可拆桁架肋叠合双向楼盖试验[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(2):27-34.

WU Fang-bo, LI Bo, WEN Jun, et al. Experimental on New Type of Two-way Composite Floor Slab with Recycling Truss Ribs[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(2): 27-34.

DOI:10.19815/j.jace.2019.02040

新型带可拆桁架肋叠合双向楼盖试验

吴方伯¹, 李 博¹, 文 俊¹, 秦 浩², 周绪红^{1,2}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044)

摘要:为了研究新型带可拆桁架肋叠合双向楼盖的力学性能,进行了2块不同配筋形式新型叠合双向板和1块现浇双向板的静载试验,对新型叠合双向板的施工阶段进行了模拟加载试验,在未设支撑的情况下,测试了预制板在施工荷载作用下的挠度,并对比分析了试件在使用阶段的裂缝分布、破坏形态、刚度变化、挠曲变形、开裂荷载、受弯承载力、整体工作受力性能等基本力学性能。结果表明:预制板在施工阶段的挠度限值满足规范要求,桁架肋在新型叠合双向板的施工阶段起支撑作用,承担施工荷载,在施工过程中可不另设支撑;新型叠合双向板与现浇双向板的裂缝分布、破坏形态、承载能力基本相同,开裂荷载较现浇双向板提前;与现浇双向板相比,新型叠合双向板中叠合层和预埋件在一定程度上削弱了楼板的整体性,但影响不大;在配筋面积基本相同的情况下,预制板内采用细钢筋可以提高叠合双向板的抗裂性能;在使用阶段,自然粗糙面的构造措施能够较好地保证叠合面的抗剪能力,在弹性受力阶段预制板和后浇层能够协同工作,具有良好的整体性。

关键词:叠合楼盖;力学性能;静载试验;挠度;施工阶段;使用阶段

中图分类号:TU973.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)02-0027-08

Experimental on New Type of Two-way Composite Floor Slab with Recycling Truss Ribs

WU Fang-bo¹, LI Bo¹, WEN Jun¹, QIN Hao², ZHOU Xu-hong^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to study the mechanical property of new type of two way composite floor with recycling truss ribs, the static load tests of two new composite bidirectional plates with different reinforcements and one cast-in-place bidirectional plate were carried out. The simulated loading test was carried out for the new type of composite bidirectional slab in the construction stage. The deflection of prefabricated slab under construction load was tested without support. The basic mechanical properties such as crack distribution, failure mode, stiffness change, deflection, cracking load, bending capacity and overall working performance were compared and analyzed. The results show that the deflection limit of prefabricated slab in construction stage meets the requirements of specifications. The truss ribs play a supporting role in the construction stage of the new composite bidirectional slab, and the truss ribs bear the construction load. The crack

收稿日期:2019-07-03

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0701308)

作者简介:吴方伯(1954-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,E-mail:wfbprof@163.com。

distribution, failure mode and bearing capacity of the new composite bidirectional slab and the cast-in-place bidirectional slab are basically the same, and the cracking load is earlier than that of the cast-in-place bidirectional slab. Compared with the cast-in-place bidirectional slab, the existence of laminated layer and embedded parts in the new composite bidirectional slab weakens the integrity of the slab to some extent, but the influence is relatively small. In the case that the area of reinforcement is basically the same, the use of fine reinforcement in the prefabricated plate can improve the anti-cracking performance of the composite bi-directional plate. In the use stage, the structure measures of the natural rough surface can ensure the shear resistance of the composite surface. In the elastic stress stage, the precast plate and the post-cast layer can work together and have good integrity.

Key words: composite floor slab; mechanical property; static load test; deflection; construction phase; use phase

0 引 言

叠合楼盖是一种先进的楼盖形式,符合国家建筑产业化发展趋势^[1]。近年来,国内外学者^[2-11]对叠合结构进行了大量研究。王晓峰^[12]进行了 9 m×12 m 大跨单向预应力双向叠合楼板的均布荷载试验,得到了叠合楼板与现浇双向板的破坏形态和承载力基本一致。刘汉朝等^[13]进行了倒“T”形底板混凝土叠合板的静载试验,得出叠合面具有足够的黏结抗剪能力,能够保证叠合板的整体受力工作性能。沈春祥^[14]进行了 4 块预应力预制双矩肋薄板叠合成的矩形叠合板静载试验,研究了其荷载-挠度曲线的变化规律、裂缝分布与发展特征、钢筋与混凝土的应变变化规律,揭示了叠合板的双向受力效应。刘铁等^[15]设计并制作了 4 块钢筋桁架叠合板,通过静载试验研究了这种楼板系统在施工阶段和正常使用阶段的刚度和极限承载力,验证了施工阶段叠合板的理论计算模型。陈赛国^[16]进行了 4 m×4 m 四边简支足尺矩形肋预制带肋底板混凝土叠合楼板的均布荷载破坏试验。

针对传统叠合楼盖预制板刚度小、施工复杂、易出现错台现象等缺点,在现有研究成果基础上,发明了一种带可拆桁架肋叠合整体双向楼盖^[17],它由预制薄板(图 1)与后浇混凝土叠合而成。

该新型楼盖具有以下显著结构特点:①该叠合整体楼盖预制底板上设有桁架肋,提高了底板刚度,改善了预制底板在运输和吊装时的抗裂性能和安全性能;②预制底板上设有桁架肋,可承受施工荷载,施工中可不另设支撑,同时桁架肋可拆除、可循环利用,经济环保;③该楼盖可实现双向配筋,整体性能较好;④该叠合整体楼盖无拼缝、错台现象,板底粉

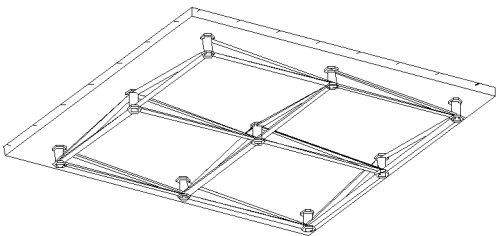


图 1 预制薄板示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Prefabricated Panel

刷层无需刷厚,节约施工成本。

本文以此新型叠合双向板为基础,研究了其施工阶段受力情况,对比分析了其与现浇双向板的裂缝分布、破坏形态、承载能力等,以获得对该新型楼盖基本力学性能的了解,为该新型楼盖的理论分析及推广应用提供试验依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

1.1.1 试件编号及尺寸

设计了 1 块现浇双向板和 2 块不同配筋的新型叠合双向板。试件编号及尺寸见表 1。试件编号中,XJB 表示现浇板,叠合双向板编号 DHB-8-23-3(7)含义如下:DHB 表示叠合板,8 表示纵筋直径 8 mm,23 表示方形板边长 2 300 mm,3(7)表示预制层厚 30 mm(叠合层厚 70 mm)。

表 1 试件编号及尺寸

Tab. 1 Number and Dimension of Specimen

试件编号	试件尺寸	配筋面积/mm ²
XJB	2 300 mm×2 300 mm×100 mm	251
DHB-8-23-3(7)	2 300 mm×2 300 mm×100 mm	251
DHB-6-23-3(7)	2 300 mm×2 300 mm×100 mm	283

1.1.2 桁架肋设计

采用长为 770 mm 的角钢与预埋件连接形成桁架肋,角钢尺寸为 30 mm×30 mm×3 mm,角钢与预埋件用螺栓连接。预埋件尺寸、角钢尺寸及桁架如图 2~4 所示。

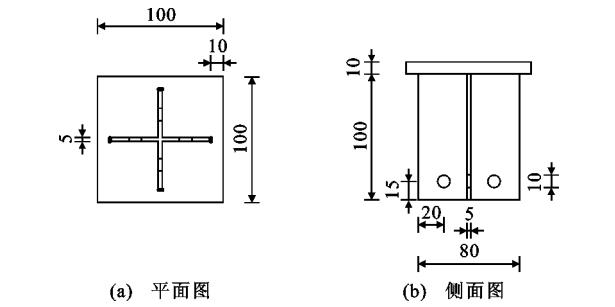


图 2 预埋件尺寸(单位:mm)
Fig. 2 Dimensions of Embedded Part (Unit:mm)

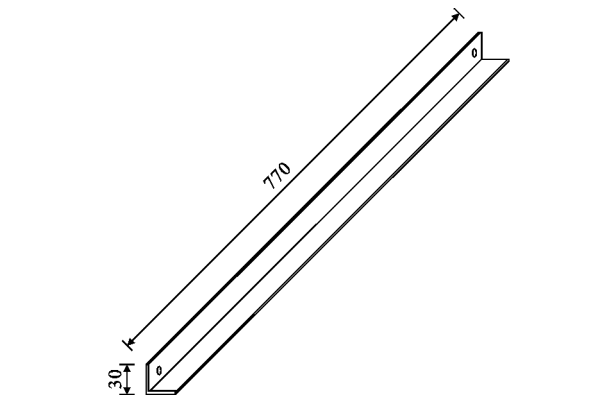


图 3 角钢尺寸(单位:mm)
Fig. 3 Dimension of Angle Steel (Unit:mm)



图 4 桁架肋
Fig. 4 Truss Rib

1.1.3 试件配筋及材料强度

图 5 为各试件的平面图。预制层和叠合层均采用 C30 混凝土,混凝土试块(150 mm×150 mm×150 mm)实测抗压强度如表 2 所示,钢筋抗拉强度如表 3 所示。

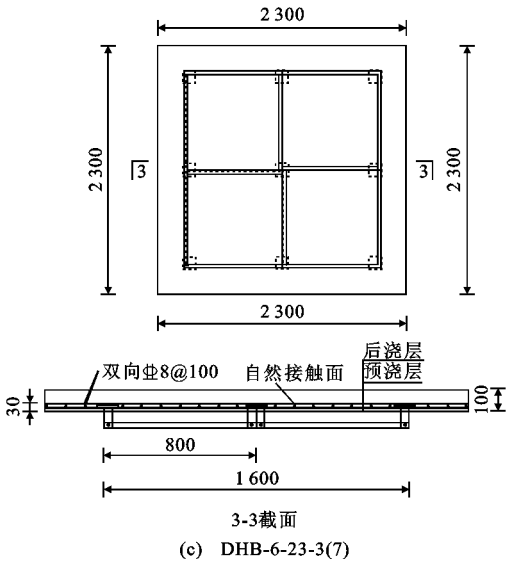
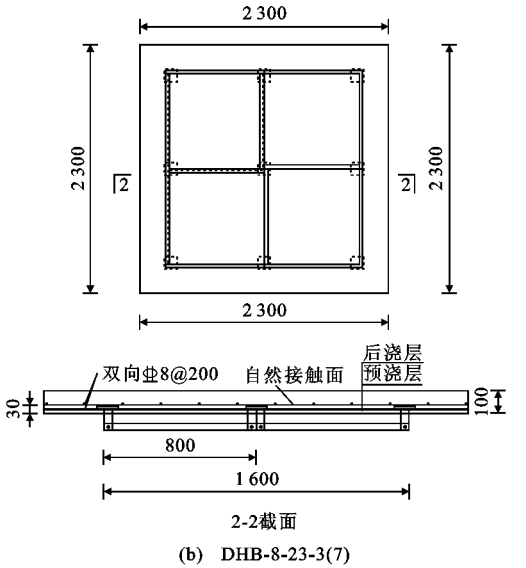
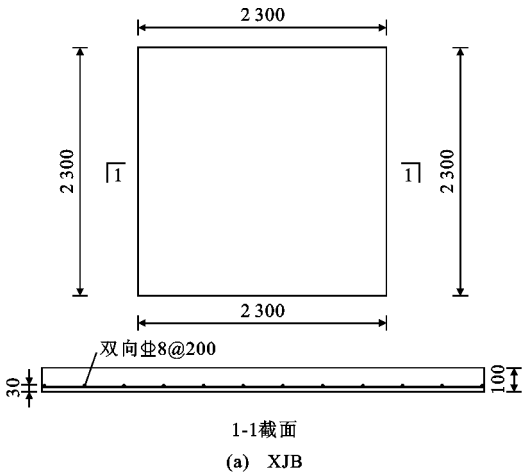


图 5 试件平面图与截面图(单位:mm)
Fig. 5 Plane and Profile of Specimen (Unit:mm)

1.2 测点布置

1.2.1 应变测点布置

纵向钢筋应变片的布置主要考虑理论上的最不

表 2 混凝土试块实测抗压强度

Tab. 2 Measured Compressive Strength of Concrete Block		
试件编号	养护天数/d	混凝土抗压强度/MPa
XJB	35	31.6
DHB-8-23-3(7)	35(预制层)	31.6
	33(叠合层)	36.6
DHB-6-23-3(7)	35(预制层)	31.6
	33(叠合层)	36.6

表 3 钢筋抗拉强度

Tab. 3 Tensile Strength of Reinforcement Bar				
钢筋直径/ mm	钢筋类型	屈服强度/ MPa	极限抗拉强度/ MPa	延伸率/%
6	HRB400	412	540	23
8	HRB400	433	622	30

利位置,所以将应变片布置在纵筋的跨中位置和楼盖对角位置,具体布置见图 6。

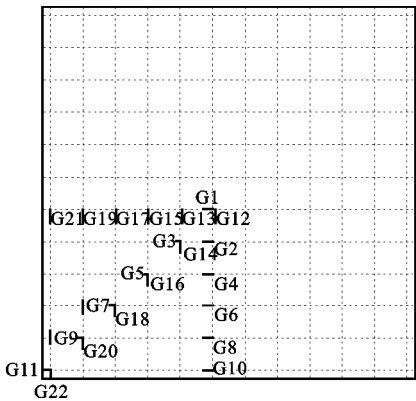


图 6 应变片布置

Fig. 6 Arrangement of Strain Gauges

1. 2. 2 挠度测点布置

试件搁置在由 4 个钢柱支撑的水平钢梁上,楼盖的施工阶段采用砝码堆载,使用阶段采用二级分配梁在肋梁交点位置进行四点集中加载,各分配梁均采用简支支撑,在每个集中荷载加载点布置 1 块 250 mm×250 mm×20 mm 的刚性垫块。加载装置现场如图 7 所示。

2 试验结果

2. 1 施工阶段

对板 DHB-8-23-3(7)进行施工阶段模拟加载,待预制板制作 7 d 后吊至支架上自然养护 28 d。加载时未设支撑,测量预制板在后浇层自重与施工活荷载情况下能否满足要求。为模拟均布荷载,采用砝码在板面进行堆积加载,每块砝码质量为 25 kg,尺寸为 245 mm×125 mm×125 mm。计算施工荷

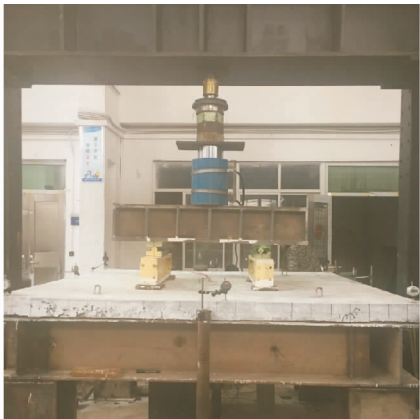


图 7 加载装置现场

Fig. 7 Field of Loading Device

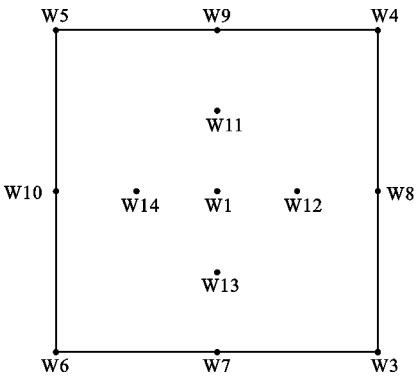


图 8 挠度测点布置

Fig. 8 Arrangement of Measurement Points for Deflection

载为 5.67 kPa,试验正式加载分为 10 级,每一级加 10 个砝码,加载增量值为 2.5 kN。试验按《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—2012)^[18]的规定进行加载,加载示意图如图 9 所示。

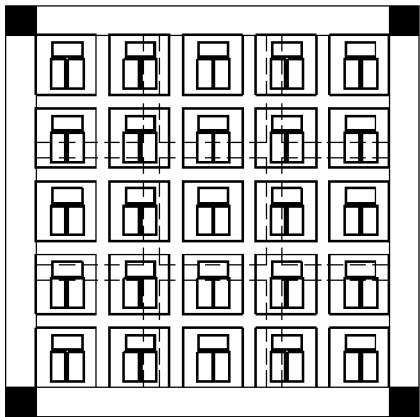


图 9 加载示意图

Fig. 9 Loading Diagram

当加载至第 8 级(4.54 kPa)时预制板跨中出现微裂缝,裂缝宽度为 0.05 mm,跨中挠度为 3.51

mm;加载至第 10 级(5.67 kPa)时跨中出现 1 条贯穿裂缝,最大裂缝宽度为 0.2 mm,跨中挠度为 6.08 mm。预制板的荷载-跨中挠度曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,跨中竖向位移与荷载基本呈线性关系,而且卸载后跨中裂缝闭合,说明楼板还处于弹性工作阶段。试验测得预制板的初始挠度为 4 mm,根据规范《组合楼板设计与施工规范》(CECS 273:2010)^[19],预制板在施工阶段的挠度限制为 $\min\{L_0/180,20\}=11.7\text{ mm}>10.08\text{ mm}$,故可知预制板在未设支撑情况下可以承受施工荷载,满足规范要求。

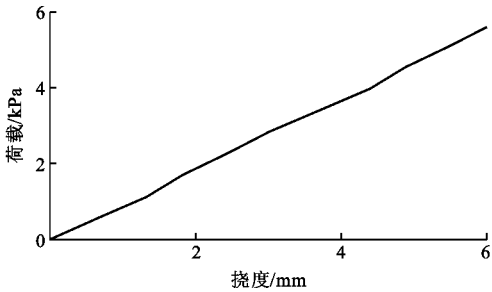


图 10 预制板荷载-跨中挠度曲线

Fig. 10 Load-deflection Curve of Precast Slab Midspan

2.2 使用阶段

2.2.1 试验过程及现象

本次静力加载试验采用二级分配梁进行四点集中加载,为将施加在楼盖上的集中荷载转换为均布荷载,根据《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—2012)第 5.2 节的相关规定进行等效转换。

XJB 试验过程中,在预加载和正式加载前期的挠度应变均较小,板面未出现裂缝,楼盖处于弹性工作阶段。加载至 14.57 kPa 时,楼盖的四角出现斜裂缝,长度约 30 mm,裂缝指向刚性垫板处,将此级荷载定为楼盖的开裂荷载。加载至 32.5 kPa 时,此级荷载为按弹性理论计算的极限荷载,此时板底没有出现新裂缝,裂缝的分布形式为 4 个集中加载点处的口字形裂缝,加上每个集中加载点处指向板角的斜裂缝,楼盖的侧面有多条竖向微裂缝,最大裂缝宽度为 1.2 mm,跨中挠度为 34.06 mm。加载至 37.40 kPa 时,出现明显的混凝土压碎声响,楼盖底部裂缝已密布,最大裂缝宽度为 1.8 mm,跨中挠度为 39.88 mm,出于安全考虑停止加载。最终裂缝分布如图 11 所示。

以试件 DHB-8-23-3(7)为例说明叠合双向板试验现象。加载初期,挠度和应变值都不大。加载至 12.86 kPa 时,预埋件处出现裂缝,指向楼板的 4 个

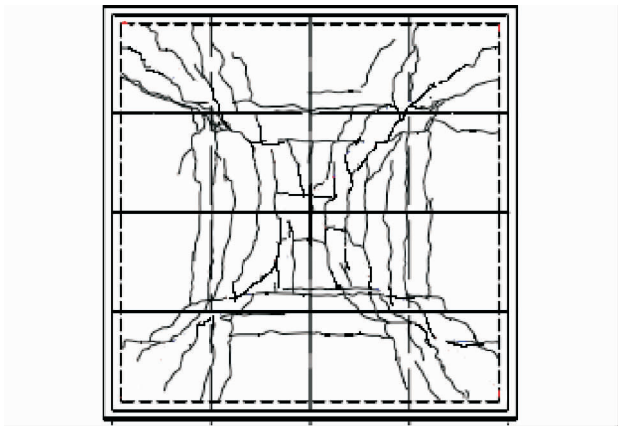


图 11 XJB 裂缝分布示意图

Fig. 11 Crack Distribution Diagram of XJB

角,此时跨中挠度为 5.86 mm,此级荷载定为叠合板的开裂荷载。加载至 31.9 kPa 时,此级荷载为按弹性理论计算的极限荷载,主裂缝宽度已经达到 1.6 mm,裂缝分布形态趋于稳定,具体分布与 XJB 相似,跨中挠度为 36.4 mm。加载至 35.38 kPa 时,加载时出现混凝土破碎声音,与此同时主裂缝进一步变宽达 2.3 mm,跨中挠度达到 44.30 mm,停止加载。加载完成后板底角部裂缝如图 12 所示。叠合双向板在加载过程中没有出现叠合面横向裂缝,说明了叠合面采用自然粗糙的构造措施就可以保证抗剪能力。

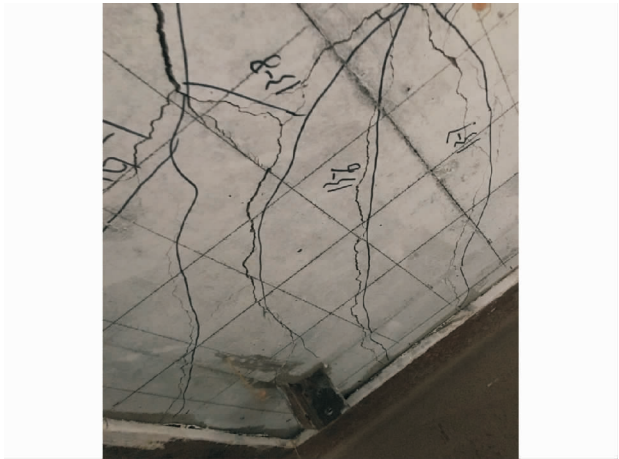


图 12 加载完成后板底角部裂缝

Fig. 12 Cracks at Bottom Corner of Plate After Loading

2.2.2 钢筋应变曲线

参照图 6 中应变片测点布置,选取 G1 测点为代表。图 13 为 3 块试件跨中钢筋 G1 测点应变曲线比较图。由图 13 可以看出,在荷载较小时,3 块板跨中钢筋的应变很小,钢筋应变随荷载的增长呈线性增长趋势。随着荷载增大,当楼盖底部出现裂缝时,受拉区的混凝土大面积退出工作,从而钢筋承

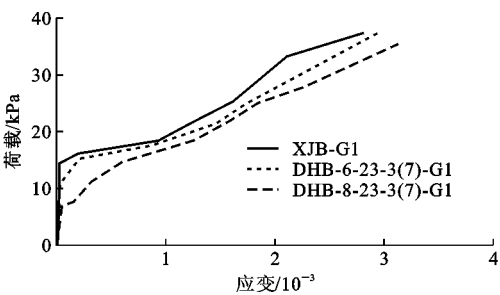


图 13 跨中钢筋应变曲线

Fig. 13 Strain Curves of Mid-span Steel Bar

担的拉力急剧增加,应变也随之增大。由图 13 还可知,跨中钢筋进入屈服阶段的荷载有比较大的差异,即开裂荷载差异较大。结合试验数据,XJB 的开裂荷载为 14.57 kPa,DHB-6-23-3(7)的开裂荷载为 13.68 kPa,较 XJB 小 6.1%;DHB-8-23-3(7)的开裂荷载为 12.86 kPa,较 XJB 小 11.7%。可知现浇板的抗裂性能要优于叠合板,主要原因是预制板内存在 9 个预埋件,并且预埋件的一部分从板底伸出,从而在板底混凝土与预埋件相交处形成薄弱环节,故在加载时更容易出现裂缝。DHB-8-23-3(7)的开裂荷载较 DHB-6-23-3(7)小 6.1%,说明了预制板采用细钢筋能提高叠合楼盖的抗裂性能。

2.2.3 荷载-挠度曲线

参照图 8 中挠度测点布置,选取同一方向 3 个测点作为代表,这里选取 W1,W11,W13 测点。3 块楼盖的荷载-挠度曲线如图 14~16 所示。可以看出:当板上施加的均布荷载小于开裂荷载时,挠度与荷载基本呈线性关系,随后板底出现明显的裂缝,抗弯刚度下降;加载至屈服荷载时,荷载-挠度曲线出现明显的拐点。此后,板的刚度变化不大,并未出现明显的屈服段。对称于中心 W1 的 2 个测点 W11 和 W13 的挠度曲线比较接近,说明板对称位置上的挠度基本相同,表明试验板 2 个方向的变形是比较协调的。

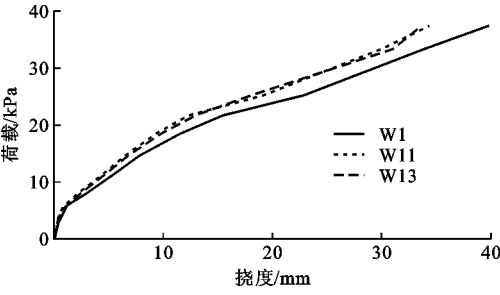


图 14 XJB 测点挠度

Fig. 14 Deflection of Measuring Points in XJB

3 块试件的跨中荷载-挠度曲线如图 17 所示,

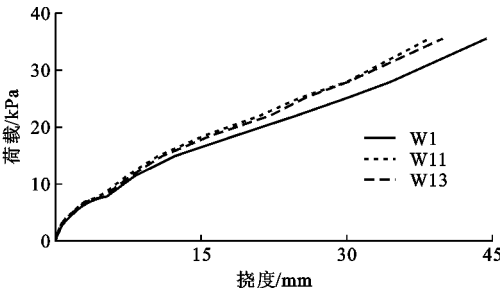


图 15 DHB-6-23-3(7)测点挠度

Fig. 15 Deflection of Measuring Points in DHB-6-23-3(7)

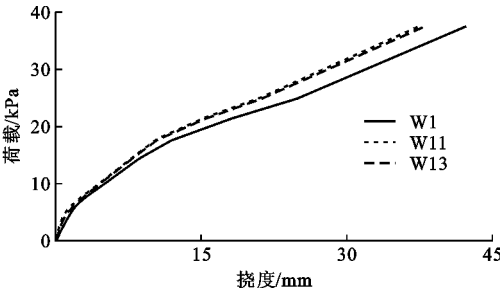


图 16 DHB-8-23-3(7)测点挠度

Fig. 16 Deflection of Measuring Points in DHB-8-23-3(7)

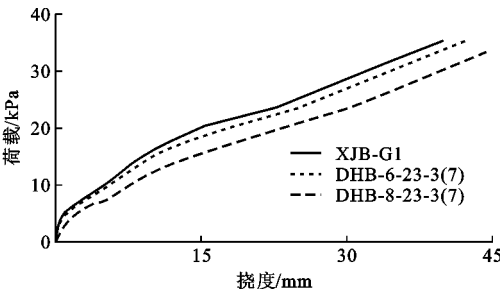


图 17 试件跨中挠度比较

Fig. 17 Mid-span Deflection Comparison of Specimens

可以看出,XJB 和 DHB-6-23-3(7)的抗弯刚度比较接近,大于 DHB-8-23-3(7)的抗弯刚度。

2.3 试验结果整理

将 3 块板的开裂荷载、跨中挠度、最终荷载下的最大裂缝宽度及其限值整理于表 4。挠度限制根据《组合楼板设计与施工规范》(CECS 273:2010)和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[20]确定。

3 结 语

(1)施工阶段,在未设支撑的情况下,新型叠合楼盖预制板在施工荷载作用下的挠度均满足《组合楼板设计与施工规范》(CECS 273:2010)的要求。

(2)使用阶段,新型叠合双向楼盖与现浇双向板的裂缝分布、破坏形态、承载能力基本相同,均满足

表 4 试验结果汇总

Tab.4 Summary of Test Results

试件编号	开裂荷载状态			挠度限值/ mm	最终荷载状态		
	荷载/kPa	挠度	裂缝宽度/mm		荷载/kPa	挠度	裂缝宽度/mm
XJB	14.57	7.91 mm	0.05	10.5	37.70	39.88 mm	1.8
		L/265				L/52	
DHB-8-23-3(7)	12.86	12.12 mm	0.10	10.5	35.38	44.18 mm	2.3
		L/173				L/48	
DHB-6-23-3(7)	13.68	9.51 mm	0.05	10.5	37.40	42.30 mm	2.0
		L/221				L/50	

注:叠合板施工阶段的挠度限值取 20 mm 和 $L/180$ (L 为板跨)的较大值,使用阶段取 $L/50$;以上挠度均包括了初始挠度;以上荷载为试验时等效的板面均布荷载;叠合层自重为 1.5 kPa。

正常使用和承载力极限状态要求。

(3)预制板内的预埋件一定程度上削弱了预制板的整体性,但影响不大。

(4)在配筋面积接近的情况下,预制板内采用细钢筋可提高叠合双向板的抗裂性能。

(5)自然粗糙面的构造措施可以保证叠合面的抗剪能力。

参考文献:

References:

[1] 周绪红,邓利斌,吴方伯,等. 预制混凝土叠合楼板耐火性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2015,36(12):82-90.

ZHOU Xu-hong, DENG Li-bin, WU Fang-bo, et al. Experimental Research and FEA on Fire Resistance Performance of Precast Concrete Composite Slabs[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12): 82-90.

[2] ROBERTS-WOLLMANN C L, GUIROLA M, EAST-ERLING W S. Strength and Performance of Fiber-reinforced Concrete Composite Slabs [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(3): 520-528.

[3] HASSAN A, KAWAKAMI M. Steel-free Composite Slabs Made of Reactive Powder Materials and Fiber-reinforced Concrete[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5): 709-718.

[4] LUKASZEWSKA E, FRAGIACOMO M, JOHNS-SON H. Laboratory Tests and Numerical Analyses of Prefabricated Timber-concrete Composite Floors[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(1): 46-55.

[5] SEBASTIAN W M, MCCONNE R E. Nonlinear FE Analysis of Steel-concrete Composite Structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(6): 662-674.

[6] BOUGUERRA K, AHMED E A, EL-GAMAL S,

et al. Testing of Full-scale Concrete Bridge Deck Slabs Reinforced with Fiber-reinforced Polymer (FRP) Bars[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(10): 3956-3965.

[7] CARVELLI V, PISANI M A, POGGI C. Fatigue Behaviour of Concrete Bridge Deck Slabs Reinforced with GFRP Bars[J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41(7): 560-567.

[8] THANOON W A, YARDIM Y, JAAFAR M S, et al. Development of Interlocking Mechanism for Shear Transfer in Composite Floor[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12): 2604-2611.

[9] YARDIM Y, WALEED A M T, JAAFAR M S, et al. AAC-concrete Light Weight Precast Composite Floor Slab[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 405-410.

[10] 徐天爽,徐有邻. 双向叠合板拼缝传力性能的试验研究[J]. 建筑科学, 2003, 19(6): 11-14, 38.

XU Tian-shuang, XU You-lin. An Experimental Study on Transmission Properties of Joints Between Superposed Slabs[J]. Building Science, 2003, 19(6): 11-14, 38.

[11] 杨建水,韩菊红,王筱敏. 四边简支钢筋混凝土叠合板受剪性能探讨[J]. 郑州大学学报, 2002, 23(3): 98-100.

YANG Jian-shui, HAN Ju-hong, WANG Xiao-min. Investigation Into Shear Properties of Reinforced Concrete Superposed Slabs Simply Supported on Four Sides[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2002, 23(3): 98-100.

[12] 王晓锋. 单向预应力双向叠合板楼盖试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2003.

WANG Xiao-feng. Experimental Study of Two-way Superposed Slab Floor with Prestress in One Way [D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2003.

- [13] 刘汉朝,蒋青青.倒“T”形叠合简支板的试验研究[J].中南大学学报:自然科学版,2004,35(1):147-150.
LIU Han-chao,JIANG Qing-qing. Experiment of Inverted “T” Simply Supported Composite Slab[J]. Journal of Central South University: Science and Technology,2004,35(1):147-150.
- [14] 沈春祥.预应力混凝土双向叠合板实验研究[D].天津:天津大学,2005.
SHEN Chun-xiang. Experimental Study of a Two-way Prestressed Laminated Concrete Slab[D]. Tianjin: Tianjin University,2005.
- [15] 刘 轶,童根树,李文斌,等.钢筋桁架叠合板性能试验和设计方法研究[J].混凝土与水泥制品,2006(2):57-60.
LIU Yi,TONG Gen-shu,LI Wen-bin,et al. Research on Performance Test and Design Method of Reinforced Truss Composite Slab[J]. China Concrete and Cement Products,2006(2):57-60.
- [16] 陈赛国.四边简支 PK 预应力叠合楼板试验与分析[D].长沙:湖南大学,2012.
CHEN Sai-guo. Experiment and Analysis of PK Prestressed Concrete Composite Slab on Simple Support[D]. Changsha: Hunan University,2012.
- [17] 吴方伯,朱惠芳,文 俊,等.一种叠合楼板及其施工方法:中国,CN 201510202803X[P].2015-04-26.
WU Fang-bo,ZHU Hui-fang,WEN Jun,et al. A Composite Floor and Its Construction Method:China,CN 201510202803X[P].2015-04-26.
- [18] GB 50152—2012,混凝土结构试验方法标准[S].
GB 50152—2012,Standard for Test Method of Concrete Structures[S].
- [19] CECS 273:2010,组合楼板设计与施工规范[S].
CECS 273:2010,Code for Composite Slabs Design and Construction Floor[S].
- [20] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010,Code for Design of Concrete Structures[S].