

# 预制带肋钢筋桁架叠合板的试验与有限元分析

刘香,倪东阳,李娟

(内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

**摘要** 目的 针对现有叠合板的不足,研制出了一种新型预制带肋钢筋桁架叠合板。  
**方法** 通过对3块预制带肋钢筋桁架叠合板和1块预制钢筋桁架叠合板进行三分点静力加载试验,并利用有限元软件对4个试件的施工阶段、使用阶段进行模拟计算,研究在使用阶段荷载下该新型叠合板的受力特征、裂缝开展规律、破坏形态和在施工阶段预制底板的受力性能。  
**结果** 有限元模拟结果与试验结果基本吻合,该种板型叠合板具有良好的抗裂、抗剪性能,刚度和承载力也满足规范要求。  
**结论** 施工阶段预制底板的版型对挠度的影响较大,该种板型可以解决预制底板在施工阶段挠度过大的问题。带肋钢筋桁架叠合板兼具现浇板整体性好和预制装配式叠合板施工速度快的优点,可以达到节约钢筋、降低板厚的目的。

**关键词** 带肋钢筋桁架;叠合板;静力试验;有限元分析

中图分类号 TU375.2 文献标志码 A

## Experimental Study and Finite Element Analysis of Prefabricated Ribbed Steel Truss Laminated Slabs

LIU Xiang, NI Dongyang, LI Juan

(School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010)

**Abstract:** To solve the problems of laminated slabs, we developed a new type of prefabricated ribbed steel truss laminated slabs. The three point static loading tests of the three precast ribbed reinforced concrete truss two-way slabs and a precast reinforced truss composite slab are carried out, and the four specimens are simulated at the construction stage and the service stage by using the finite element software, we studied the load laminated bearing characteristics, crack laws and destroy form of this new type laminated slab at the service load stage and simulation analysis of the precast floor mechanical behavior at the construction stage. The finite element simulation results are in good agreement with the experimental results, this kind of slab shape laminated slab has good crack resistance, shear strength, stiffness and bearing capacity, which can meet the requirements of specification. The deflection of precast slab at the construction stage is mainly affected by slab shape, and this slab shape could solve the problem that the precast slab has a large deflection at the con-

收稿日期:2017-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51768056);内蒙古自治区自然科学基金项目(2013MS730);包头市科技局计划项目(2014X1003-1)

作者简介:刘香(1964—),女,教授,主要从事结构动力分析、混凝土结构抗震方面研究。

struction stage. The ribbed steel truss composite slab has the advantages of good integrity of the cast-in-place slab and the fast construction speed of the prefabricated composite slab, which achieves the purpose of saving the steel bar and reducing the thickness of the slab.

**Key words:** ribbed steel truss; laminated slab; static test; finite element analysis

建筑产业现代化,尤其是装配式建筑的发展,不仅是一场建筑生产方式的变革,更是建筑业未来发展的潮流和必然趋势.我国传统建筑业的生产方式,施工现场环境差,建筑垃圾与日俱增,人工成本逐渐增加,项目建造周期长等问题日益突出.大力发展预制装配式建筑,对于节约资源、减少施工污染、提高劳动生产效率具有重要意义<sup>[1]</sup>.

预制叠合板是装配式结构中重要的水平受力构件,目前已广泛应用于装配式住宅.国内外专家学者已经对叠合板的受力性能进行了大量的试验研究与理论分析<sup>[2-6]</sup>.刘轶等<sup>[7]</sup>对4块自承式钢筋桁架混凝土叠合板的受力性能进行了试验研究,探讨了在施工阶段和正常使用阶段自承式钢筋桁架混凝土叠合板的刚度和极限承载能力.陈日涛<sup>[8]</sup>对四块钢筋桁架混凝土叠合板进行了试验研究和模拟拓展分析,结果表明叠合板预制构件的短期刚度主要由钢筋桁架高度和上弦钢筋直径决定,腹杆直径对短期刚度贡献较小,可以忽略.沈春祥等<sup>[9]</sup>对单向预应力双向叠合板的极限承载力和刚度进行了试验研究和理论分析,推导并验证了单向预应力双向叠合板的极限承载力计算方法.张敬书等<sup>[10]</sup>对14个正方形足尺预制带肋底板叠合板进行面内低周反复加载试验,通过数值分析和理论研究的方法,对这种叠合板的抗震性能进行了大量研究.吴方伯等<sup>[11]</sup>对1块四边简支的预制带肋底板叠合板的变形特性、破坏形态、极限承载能力进行了试验研究,发现板破坏时的裂缝分布和破坏形态具有典型的塑性铰线特征.柳旭东等<sup>[12]</sup>研发出一种新型带肋预应力混凝土叠合板,研究了施工阶段受荷下该叠合板的受力特征、裂缝开展规律及其变形

形态,结果表明此种新型结构具有良好的抗裂性、刚度和承载力.

目前已有叠合板中,自承式钢筋桁架混凝土叠合板在施工现场需要较多的湿作业,使用阶段不能拆除底模钢板,浪费钢材,不够经济.带肋预应力底板混凝土叠合板的预留孔洞容易造成初始缺陷,而且,在预应力张拉过程中不易控制张拉应力.而预制带肋钢筋桁架叠合板是一种新型的预制装配式混凝土叠合结构.该叠合板兼具现浇板整体刚度大、抗震性能好和预制板施工速度快的优点,将提前加工好的钢筋桁架在模板中固定就位后,在预制厂浇筑预制带肋钢筋桁架混凝土底板,预制底板经过运输、吊装就位后浇筑叠合层混凝土,叠合板制作完成.预制带肋钢筋桁架混凝土底板作为叠合板的永久模板即作为楼板的一部分,节约了大量木模板,这种叠合板具有施工周期短、更加环保和经济等特点<sup>[13-17]</sup>.笔者对3块不同肋高底板的带肋钢筋桁架混凝土叠合板和1块同尺寸钢筋桁架混凝土叠合板进行了静力加载破坏试验和有限元模拟,对比分析两种叠合楼板的各项受力性能指标,研究成果可为带肋钢筋桁架混凝土叠合板的进一步研究和实际工程中的应用提供参考.

## 1 试验概况

### 1.1 试件的设计

试验对4块预制叠合板(两种底板板型:一种是钢筋桁架底板;另一种是带肋钢筋桁架底板)进行三分点静力加载破坏试验,试件均为单向板,设计宽600 mm,跨度为2 800 mm,每块试验板的外形尺寸均相同,预制板混凝土强度等级与后浇层混凝土强度等级相同,均为C30,受力主筋为 $\Phi 8$  mm,构

造筋为  $\phi 6@200$ . 试件尺寸及编号见表 1.

表 1 试件参数表

Table 1 Summary of specimen parameters

试件编号	矩形肋高度	叠合板厚度	预制底板高度	钢筋桁架高度
板 1(DL - DHB1)	50	120	60	80
板 2(DL - DHB2)	40	120	60	80
板 3(DL - DHB3)	30	120	60	80
板 4(GJ - DHB4)	无	120	60	80

图 1 为钢筋桁架混凝土叠合板(GJ - DHB4)底板配筋图,图 2 为带肋钢筋桁架混凝土叠合板(DL - DHB1、DL - DHB2、DL - DHB3)底板配筋图.

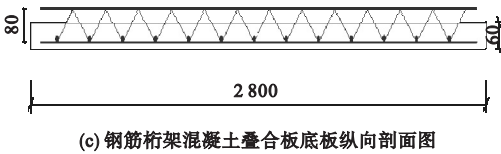
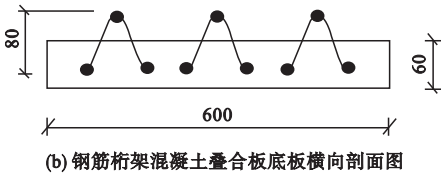
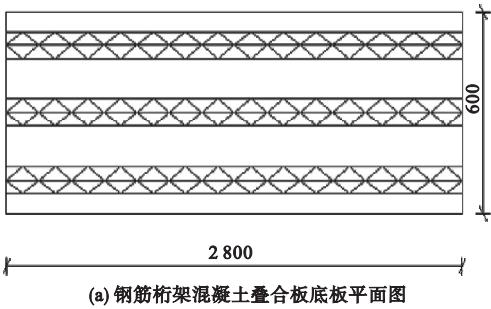


图 1 钢筋桁架混凝土叠合板配筋图

Fig. 1 Reinforcement drawing of the steel bar truss concrete laminated slabs

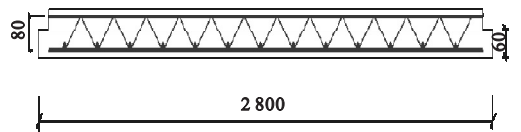
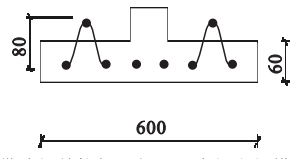
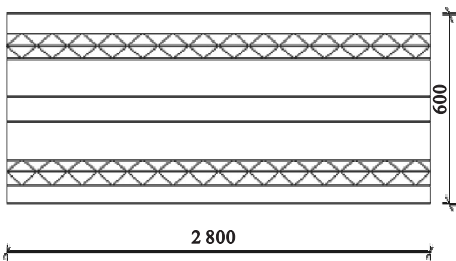
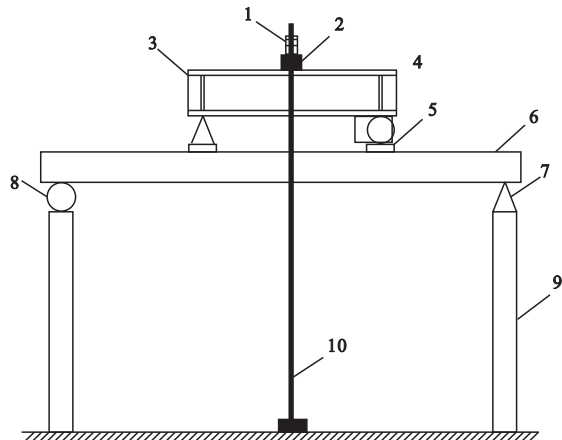


图 2 带肋钢筋桁架混凝土叠合板配筋图

Fig. 2 Reinforcement drawing of the ribbed steel bar truss concrete laminated slabs

### 1.2 加载装置及测点布置

试验研究采用的加载方法是三分点分配梁加载方法,在支座两端布置垫板和滚轴作为简支约束条件,并且在叠合楼板下布置垫块,防止叠合楼板断裂下坠造成破坏,试件加载示意图如图 3 所示.



1. 荷载传感器; 2. 千斤顶; 3. 分配梁; 4. 加劲梁; 5. 集中力下的垫块; 6. 试验板; 7. 固定铰支座; 8. 滚动铰支座; 9. 支墩; 10. 拉杆。

图 3 试验加载示意图

Fig. 3 Test loading device

制作预制件时,提前在钢筋桁架适当位置贴好钢筋应变片,试验前布置好位移计、贴好混凝土应变片并做好导线的布置.位移计和应变片布置见图 4~图 6.

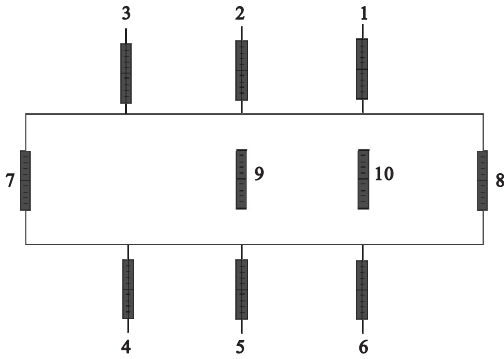


图 4 位移计应变片测点

Fig. 4 The strain gage layout of displacement meter

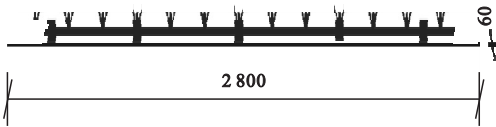


图 5 钢筋应变片测点

Fig. 5 The strain gage layout of reinforcement

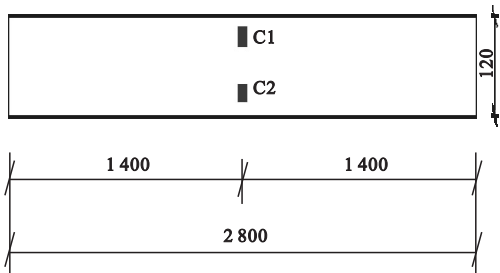


图 6 混凝土应变片测点

Fig. 6 The strain gage layout of concrete

## 2 试验结果及分析

### 2.1 钢筋荷载-应变

各试件跨中板底受拉钢筋荷载-应变曲线见图 7.从图中可以看出,当荷载加载到 5 kPa 之前,4 个试件的底板均未出现裂缝,此时受拉钢筋应变较小,荷载-应变曲线基本呈线性.但当荷载加载至 5 kPa 之后,钢筋的荷载-应变曲线有明显突变,随着荷载不断

增加,钢筋的应变增加幅度变大.当荷载加载到 20 kPa 时,试件 DL-DHB1 的受拉钢筋屈服,应变达到钢筋屈服应变,随着荷载继续增加到 21 kPa,DL-DHB1 板底的最大裂缝宽度超过 1.5 mm,跨中挠度值接近跨度的 1/50,试件宣告破坏.DL-DHB2、DL-DHB3、GJ-DHB4 所测得的数据在 5 kPa 以前时,与试件 DL-DHB1 大致相同.5 kPa 以后混凝土开裂,开裂后受拉钢筋的应变有较大幅度的增长,各试件的曲线图上均有突变.当试件 DL-DHB2 荷载加到 19.2 kPa、试件 DL-DHB3 荷载加到 18.3 kPa 时,GJ-DHB4 荷载加到 22.2 kPa 时受拉钢筋的应变达到屈服应变,钢筋开始屈服.

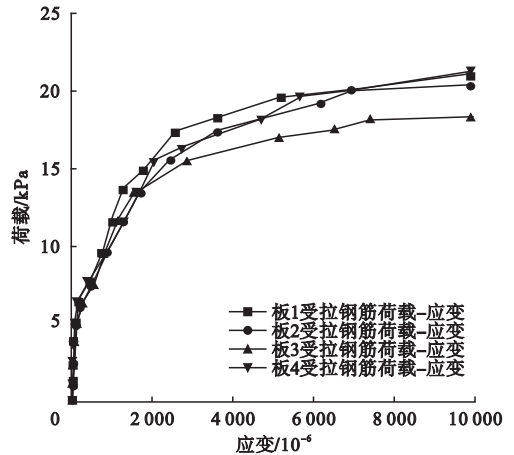


图 7 试件跨中受拉钢筋荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curves of tensile steel bars in the mid-span of each specimen

### 2.2 混凝土荷载-应变

在各试件的跨中侧面布置两个混凝土应变片,自上而下为 C1、C2,受压、受拉区各一个,荷载-应变曲线见图 8.从图 8 可以看出,混凝土开裂之前,各试件 C1、C2 点的混凝土应变均呈线性变化,应变值的增量较小,而在混凝土开裂后,C1、C2 点的混凝土应变呈非线性变化,且增长幅度变大.

试件 DL-DHB3 的混凝土荷载-应变曲线与其他 3 个试件略有不同,当荷载达到 17.5 kPa 时,板侧裂缝开展速度加快,在持荷

10 min 的过程中,板侧面裂缝开展到板顶,混凝土应变片 C1 呈现正值的现象. 试件 DL - DHB1、DL - DHB2 和 GJ - DHB4 混凝土荷载 - 应变曲线和裂缝开展趋势都很相似,裂缝主要集中在三分点之间,均匀分布,板侧裂缝由板底自下而上开展缓慢,宽度较小,至加载结束,都未能使 C2 点的混凝土应变片被拉断. 当加载至极限承载力时,试件

DL - DHB1、DL - DHB2 和 GJ - DHB4 顶部 C1 点的混凝土均没有达到混凝土的极限压应变,说明试件 DL - DHB1、DL - DHB2 和 GJ - DHB4 的刚度和整体性优于试件 DL - DHB3. 分析原因为矩形肋的存在使叠合面的抗剪强度得到加强,肋高的增加可以延缓叠合板裂缝的开展,增强叠合板的整体性.

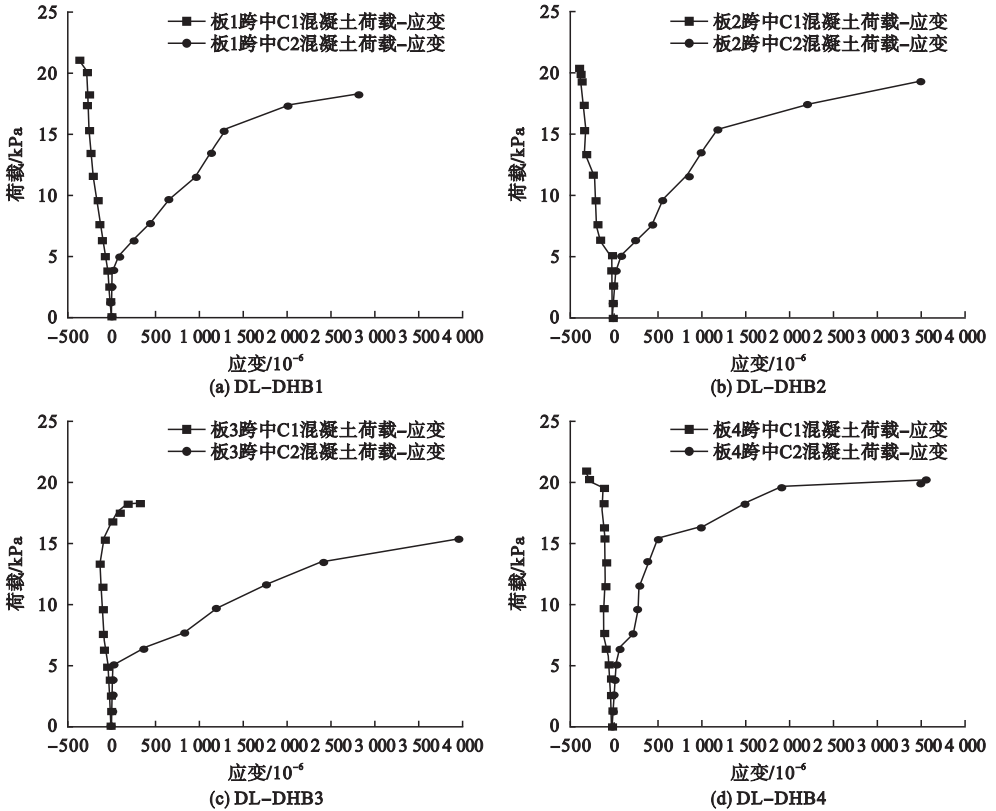


图8 试件跨中侧面 C1、C2 处混凝土荷载 - 应变曲线

Fig. 8 The concrete load-strain curves of C1 and C2 of in the mid-span side of each specimen

### 2.3 叠合楼板荷载 - 挠度

图9为4个试件跨中荷载 - 挠度曲线. 从图中可以看出,当荷载加至接近各试验板的极限承载力时,各试验板的挠度增加较为缓慢,并且预制底板肋可以有效地提高叠合板的开裂荷载,预制底板肋越高,极限承载力提升越显著.

### 2.4 裂缝形态比较

对试件 DL - DHB1 底部同一位置用裂缝观测仪进行裂缝宽度监测. 在荷载小于 5 kPa 之前,DL - DHB1 还没有出现第一条裂

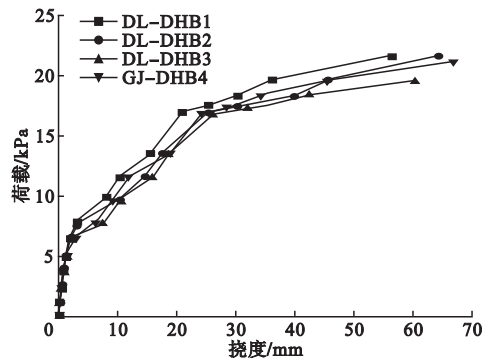


图9 各试件跨中荷载 - 挠度曲线对比

Fig. 9 The load deflection curves of in the mid-span of each specimen



缝.随着荷载的增加,当荷载加到 5 kPa 并持荷 5 min 左右时,在板底部三分点处出现第一条细小裂纹,为垂直裂缝.用铅笔在裂缝周围画好线,使用裂缝测宽仪对裂缝进行观测,裂缝宽度 0.02 mm.持荷 10 min 后,继续施加荷载,已经产生的细小裂缝不断继续开展,同时在板底跨中位置,裂缝数量也在不断增加,裂缝主要集中在三分点处.荷载达到

12 kPa 并持荷 10 min 后,板底最大裂缝宽度已经达到 0.1 mm.随着荷载继续加大,裂缝开始均匀分布在三分点之间,当 DL - DHB1 荷载达到 19 kPa 时,板底裂缝与板侧面裂缝贯通,在持荷过程中,侧面裂缝开始向板顶延伸,当荷载达到 21 kPa 时,板底最大裂缝宽度已经达到 0.7 mm. DL - DHB1 裂缝宽度变化见图 10.

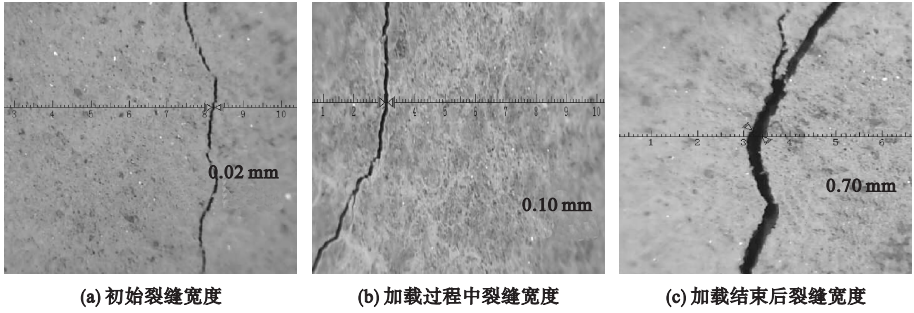


图 10 DL - DHB1 裂缝宽度变化

Fig. 10 The variation diagram of crack width of DL-DHB1

其他各试验板裂缝开展规律与 DL - DHB1 相同,加载初期,各测点的应力和挠度均较小,挠度与荷载近似呈线性变化.试验过程中,叠合面处没有出现裂缝,说明预制板与

后浇混凝土有很好的黏结力,矩形肋使预制板与后浇混凝土之间的摩擦力增大,提高了叠合板的抗剪强度.各试件板侧面裂缝分布情况如图 11 所示.

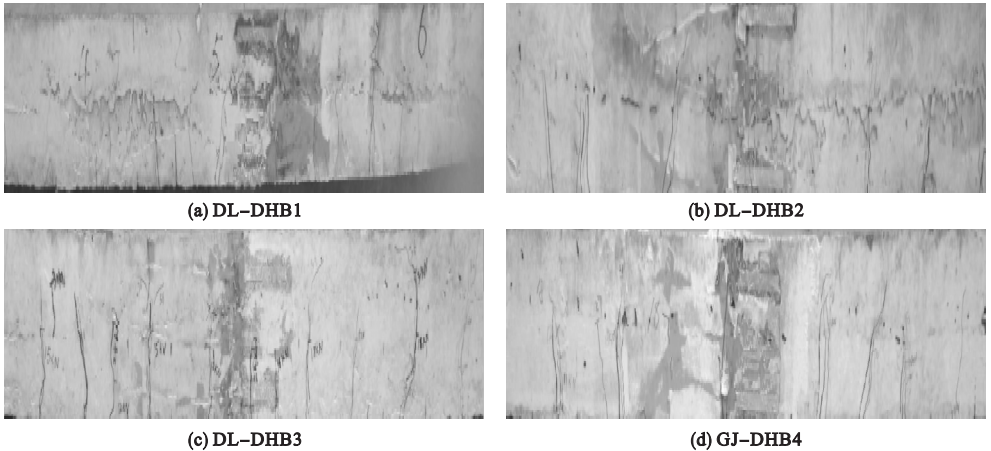


图 11 各试件侧面裂缝分布图

Fig. 11 The crack distribution on the side of each specimen

### 3 有限元数值模拟分析

#### 3.1 有限元模型

为了更好地研究施工阶段预制底板板型不同对预制板挠度的影响,建立了 4 个试件

的预制底板及叠合板的计算模型.用 ABAQUS 研究非线性问题之前,应对实际模型进行合理简化,以突出影响试验结果的重要因素.忽略次要因素,促进模型计算收敛,增加模型的计算效率,因此将钢筋内部嵌入

混凝土,忽略其粘结滑移.为了更好地模拟实际工程中的施工情况,荷载采用面荷载加载方式.

### 3.2 预制底板有限元模拟结果比较分析

对4个试件的预制底板施加相同荷载(施工荷载),各试件底板混凝土应力云图见图12,各试件底板混凝土位移云图见图13.从图12、图13可以看出,各试验板预制底板的应力云图结果差别明显,试件DL-DHB1

底板的最大压应力为10.13 MP,跨中最大挠度值为6.22 mm;试件DL-DHB2底板的最大压应力为13.71 MP,跨中最大挠度值为9.01 mm;试件DL-DHB3底板的最大压应力为19.30 MP,跨中最大挠度值为14.3 mm;试件GJ-DHB4底板的最大压应力为5.4 MP,跨中最大挠度值为40.4 mm.预制底板矩形肋对底板刚度的提高效果显著,矩形肋越高,预制底板刚度提高越大.

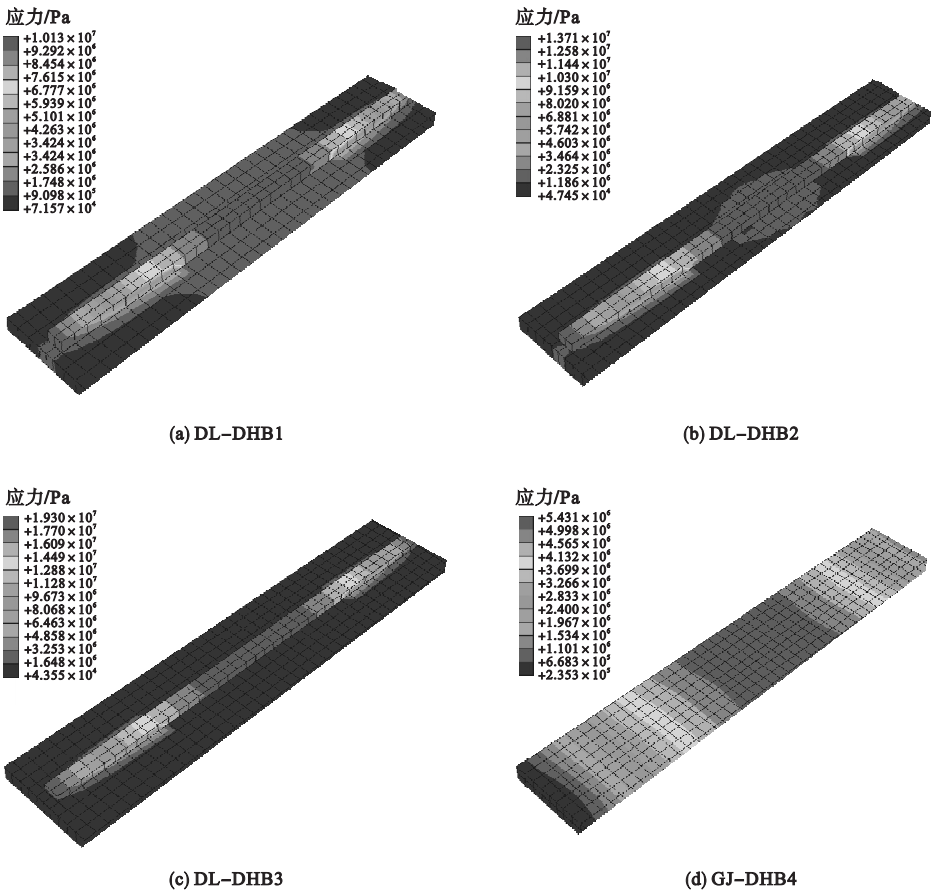


图12 试件底板混凝土应力云图

Fig. 12 The concrete stress plots of bottom slab of each specimen

通过模拟验证,在施工阶段,带肋钢筋桁架混凝土叠合板底板可以作为有效的自承模板,DL-DHB1、DL-DHB2、DL-DHB3的挠度均小于施工阶段控制挠度的 $L/180$ (15.6 mm),而GJ-DHB4的预制底板挠度值为40.4 mm已经超过15.6 mm.预制叠合板的带肋底板对刚度具有较大贡献,对板的

挠度控制效果也很明显,在施加集中活荷载及近似均布活荷载时,带肋预制底板的挠度值明显小于无肋预制底板,可以满足施工阶段楼板变形的要求.在实际工程中可根据具体情况不加或者少加设临时支撑,对挠度可以进行进一步的控制.

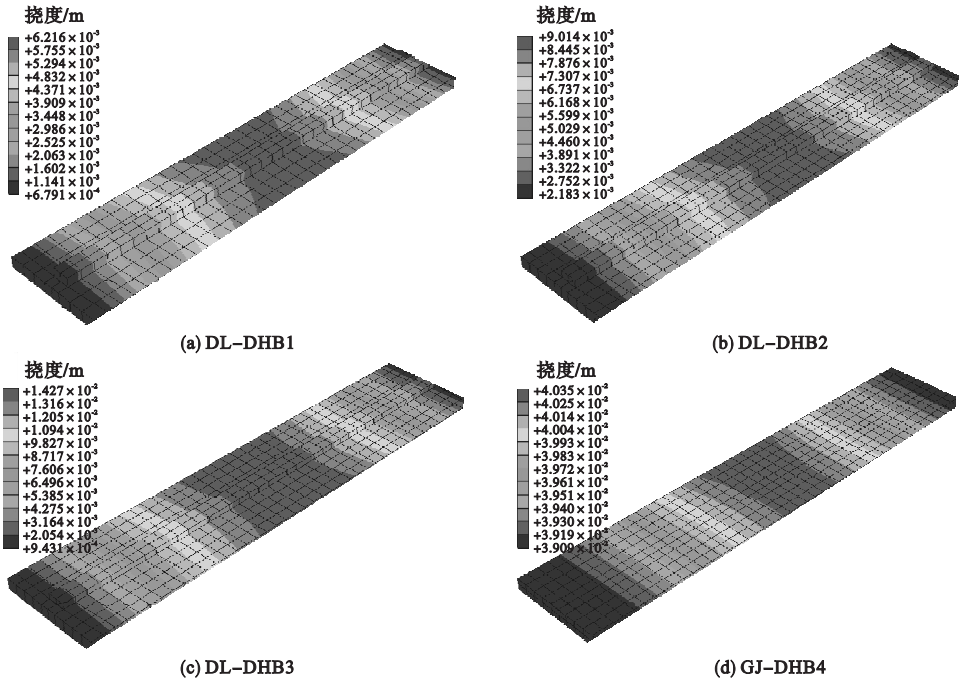


图 13 试件底板混凝土挠度云图

Fig. 13 The concrete displacement plots of bottom slab of each specimen

### 3.3 叠合板有限元模拟结果比较分析

对建立的 4 个叠合板有限元模型施加与试验过程中相同的极限荷载,加载结束后,各试验板最终破坏时的挠度云图见图 14。从图中可以看出,DL - DHB1、DL - DHB2 和

DL - DHB3 的最终挠度表现出了与试验结果相同的破坏规律,DL - DHB1 挠度最小,DL - DHB3 挠度最大,GJ - DHB4 试件的最终挠度介于 DL - DHB1 和 DL - DHB2 之间。

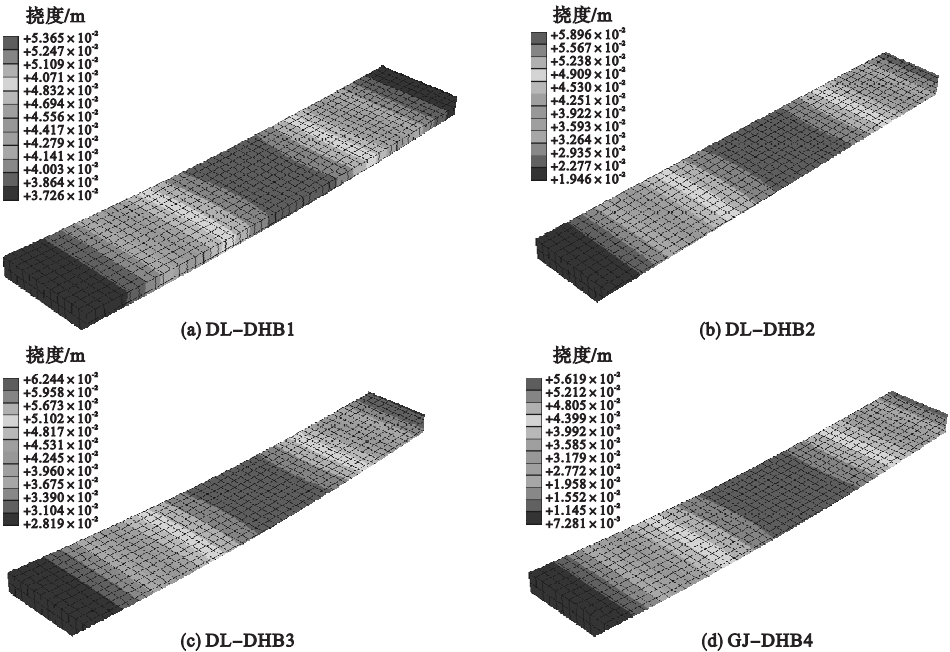


图 14 试件混凝土挠度云图

Fig. 14 The concrete deflection plots of each specimen



各试件跨中荷载 - 挠度曲线见图 15. 从模拟结果与试验结果的对比可以看出, 当荷载加载到 5kPa 前, 受拉钢筋所产生的应变较小, 荷载 - 应变曲线呈线性变化, 当荷载加载

到 5kPa 之后, 曲线有一个比较明显的突变. 模拟结果与试验结果变化规律相同, 4 个试件的模拟结果挠度值均比试验值小.

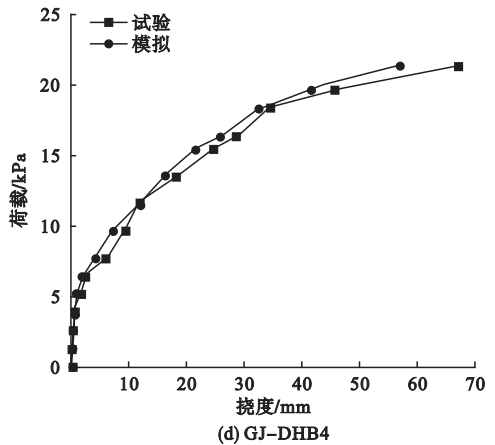
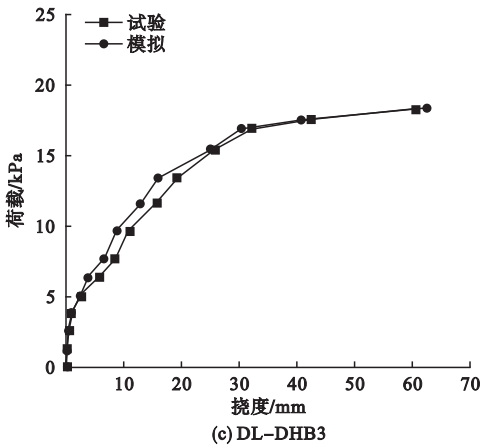
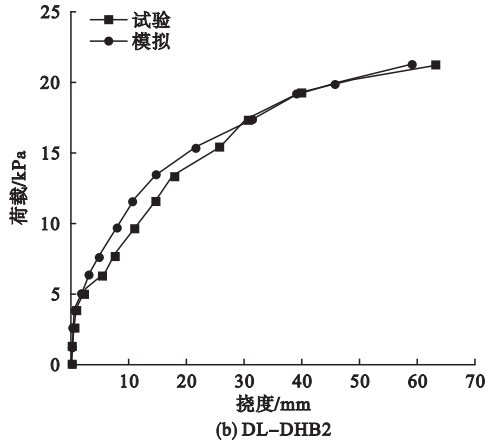
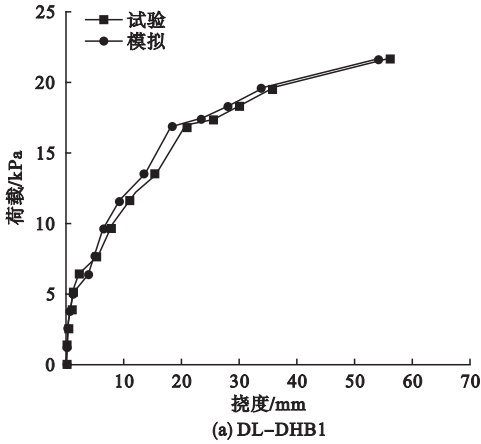
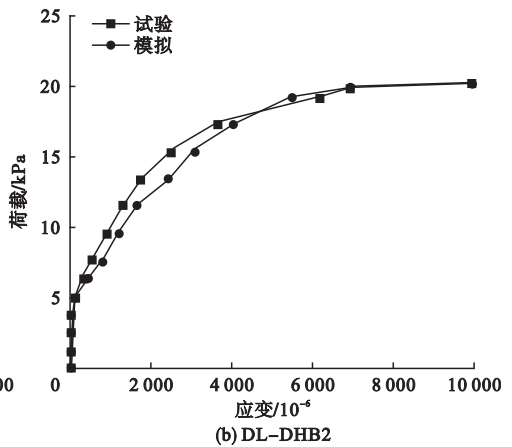
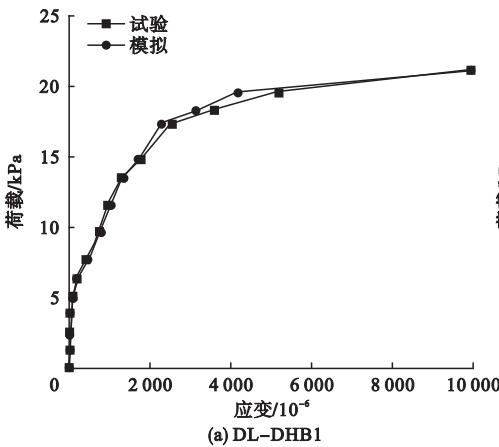


图 15 试件跨中荷载 - 挠度曲线

Fig. 15 The load deflection curves in the mid-span of each specimen

各试件跨中同一截面下弦钢筋荷载 - 应变曲线见图 16. 从图中可以看出, 模拟结果

与试验结果变化趋势相同, 而且钢筋应力计算结果与试验值之间差值一般在 10% 以内.



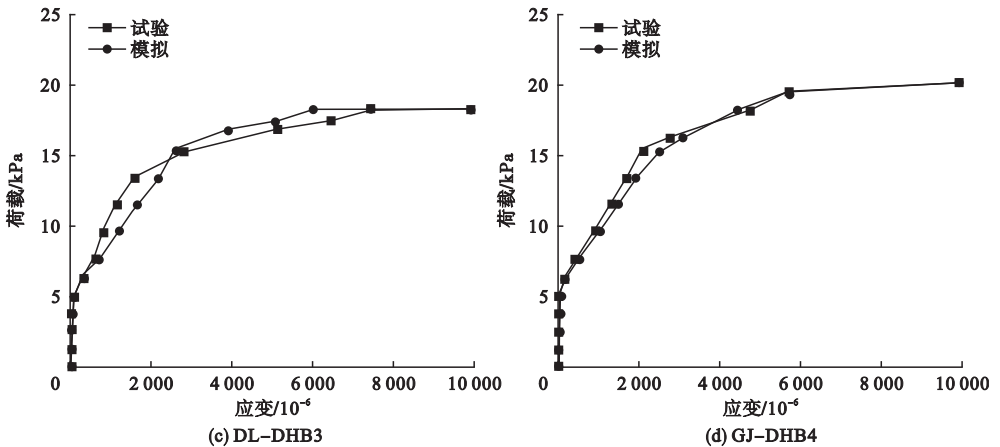


图 16 试件跨中下弦钢筋荷载 - 应变曲线

Fig. 16 The load-strain curves of bottom chord bar in the mid-span of each specimen

ABAQUS 有限元软件具有较强的非线性计算能力,笔者通过运用 ABAQUS 有限元软件,采用合理的材料本构关系、加载模型和相互约束作用,对预制带肋钢筋桁架混凝土底板和叠合板分别进行了非线性有限元数值模拟。将试验结果与有限元模拟结果进行对比分析,发现试验实测结果与有限元计算结果符合良好,挠度变化趋势与试验基本一致,表明笔者所采用的有限元方法及材料本构模型能够很好地模拟预制带肋钢筋桁架混凝土叠合板的极限承载力、破坏形态、变形等力学特性。

## 4 结 论

(1)带肋的预制底板挠度明显小于无肋的预制底板挠度值,从模拟结果可以看出,钢筋桁架预制板挠度是带肋钢筋桁架预制板挠度的 3~6 倍。带肋钢筋桁架预制板的最终挠度可以满足施工阶段楼板变形的要求。带肋的预制底板是解决预制板在施工阶段挠度过大问题的有效途径之一。

(2)矩形肋的存在不仅增加了预制底板刚度,还对叠合板裂缝的开展起到了抑制作用,增强了叠合板的整体性能。

(3)试件加载过程中,带肋钢筋桁架叠合板叠合面没有出现裂缝和滑移,表明预制板与后浇混凝土有很好的黏结力,抗剪性能

满足要求。

## 参考文献

- [1] 梁栓柱,张笑尘,王光崇,等. 建筑产业化发展趋势与前景[J]. 山西建筑,2015,41(27): 23-25.  
(LIANG Shuanzhu, ZHANG Xiaochen, WANG Guangchong, et al. Construction industry development trend and prospect [J]. Shanxi architecture, 2015, 41(27): 23-25.)
- [2] JOHNSTON B S. Tentative recommendations for the design of composite slab and girder for buildings[J]. Journal of ACI, 1990, 61(6): 225-236.
- [3] CRISINEL M. A new simplified method for the design of composite slabs [J]. Journal of constructional steel research, 2004, 20(60): 481-491.
- [4] WANG Bing. Study on flexural bearing capacity of unbounded pre-stressing composite slab [J]. Applied mechanics and materials, 2011, 71(1): 1020-1024.
- [5] HERRMANN P, JUEN L, FINK J. Development of an innovative composite deck slab for railway bridges [J]. Stahlbau, 2011, 80(11): 859-865.
- [6] KOSTECKI T. 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(1): 55-67.
- [7] 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, 31(2): 57-60.  
(LIU Yi, TONG Genshu, LI Wenbin, et al. De-

- sign method research and properties experiment of composite slabs with steel bar trusses [J]. China concrete and cement products, 2006, 31 (2): 57 - 60. )
- [ 8 ] 陈日涛. 自承式钢筋桁架叠合板刚度有限元分析[J]. 山西建筑, 2007, 33(22): 76 - 77. (CHEN Ritao. Finite element analysis on the short-term rigidity of composite slab by steel bar truss and concrete[J]. Shanxi architecture, 2007, 33(22): 76 - 77. )
- [ 9 ] 沈春祥. 预应力混凝土双向叠合板的试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2005. (SHEN Chunxiang. The experimental study of two-way prestressed laminated concrete slab [D]. Tianjin ; Tianjin University, 2005. )
- [ 10 ] 张敬书. 预制带肋底板叠合板抗震性能的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013. (ZHANG Jingshu. Research on seismic performance of concrete composite slabs with precast ribbed bottom panels [D]. Lanzhou : Lanzhou University, 2013. )
- [ 11 ] 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板试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 28(1): 6 - 11. (WU Fangbo, DENG Libin, LIU Biao, et al. Experimental study on four-sides simply supported single-direction-prestress double-direction-tendon concrete composite floor slab [J]. Building structure, 2014, 28(1): 6 - 11. )
- [ 12 ] 柳旭东, 王东辉, 刘帅, 等. 新型带肋预应力混凝土叠合板试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(5): 98 - 101. (LIU Xudong, WANG Donghui, LIU Shuai, et al. Experimental study of a new ribbed prestressed concrete laminated slab [J]. Industrial construction, 2016, 46(5): 98 - 101. )
- [ 13 ] 马兰, 陈向荣, 蒋路, 等. 钢筋桁架混凝土叠合楼板试验及有限元分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(21): 54 - 57, 62. (MA Lan, CHEN Xiangrong, JIANG Lu, et al. Experimental research and finite element analysis of concrete composite floor slabs with steel bar trusses [J]. Building structure, 2013, 43(21): 54 - 57, 62. )
- [ 14 ] 赵磊. 自承式钢筋桁架混凝土叠合板设计计算方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007. (ZHAO Lei. Design calculation method study of composite slab by steel bar truss and concrete [D]. Changsha: Central South University, 2007. )
- [ 15 ] 吴方伯, 黄海林, 陈伟, 等. 预制带肋底板混凝土双向叠合板极限承载力[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(5): 34 - 40. (WU Fangbo, HUANG Hailin, CHEN Wei, et al. Ultimate bearing capacity of concrete two-way composite slabs with precast concrete ribbed panel [J]. Journal of civil, architectural & environmental engineering, 2011, 33(5): 34 - 40. )
- [ 16 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People Republic of China. Standard for test method of concrete structures: GB/T50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. )
- [ 17 ] 刘海城, 郑旭, 刘强. 叠合楼板极限承载力研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(5): 787 - 796. (LIU Haicheng, ZHENG Xu, LIU Qiang. Study on the ultimate bearing capacity of composite floor slabs [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(5): 787 - 796. )