



基于精细化数值模型的密拼桁架钢筋 叠合板承载力影响因素分析

邬林锋, 谢秉鑫, 童亿力, 梁诗雪

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘要: 为研究密拼叠合板承载力的影响因素, 以单缝密拼桁架钢筋叠合板作为研究对象, 考虑材料非线性和材料间的接触行为, 通过精细化数值模型进行分析。首先进行叠合板足尺试验, 测量其荷载-挠度曲线和裂缝分布, 初步了解叠合板的力学性能; 然后采用 ABAQUS 有限元软件对桁架钢筋叠合板建立精细化数值模型, 并与试验结果比较, 以验证模型正确性; 最后通过建立不同构造的有限元模型, 对影响单缝密拼叠合板承载力的因素进行系统分析。结果表明: 新旧混凝土的强度差异、叠合面处理方式以及桁架钢筋布置会对叠合板整体刚度产生影响; 提高混凝土强度可小幅提升叠合板的整体刚度, 叠合面可采用 4.00 mm 的凹凸面处理方式约束板面滑移, 增加适量的桁架钢筋道数可提升叠合板承载能力的安全储备。该研究可为桁架钢筋叠合板的优化设计提供参考。

关键词: 桁架钢筋叠合板; 叠合面; 混凝土强度; 影响因素; 有限元模拟

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2021)11-0827-08

Analysis of influence factors of bearing capacity of single joint latticed girder composite slabs based on refined numerical model

WU Linfeng, XIE Bingxin, TONG Yili, LIANG Shixue

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech
University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to study influence factors of bearing capacity of the single joint latticed girder composite slabs, a refined numerical model considering the nonlinearity of materials and the contact behavior between materials was used for analysis. First a full-scale test of the latticed girder composite slab was conducted to measure its load-deflection curve and crack distribution, and the mechanical properties of composite slab were preliminarily understood. After that, based on ABAQUS finite element software, a refined numerical model was built for the single joint latticed girder composite slabs and compared with the test results to verify the correctness of the model. Finally, the influence factors of the bearing capacity of the composite slab are systematically analyzed by establishing finite element models with different structures. The results indicated that the strength difference between old and new concrete, the treatment of interface and the arrangement of girder steel bars will affect the overall stiffness of the lattice girder composite slab. Increasing the strength of concrete can slightly increase the overall stiffness of composite slab. It is proposed that 4.00 mm concave and convex surface treatment can be used to restrain the sliding of slab surface, and the safety reserve of the bearing capacity of lattice girder composite slab can be

收稿日期: 2021-04-20 网络出版日期: 2021-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808499); 浙江理工大学基本业务项目(20052144-Y)

作者简介: 邬林锋(1996—), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事结构工程方面的研究。

通信作者: 梁诗雪, E-mail: liangshixue0716@126.com

improved by adding an proper number of girder steel bars. This study can provide a reference for the structural optimization design of latticed girder composite slabs.

Key words: latticed girder composite slabs; composite surface; concrete strength; influence factors; finite element simulation

0 引言

装配式混凝土结构是工业化建筑重要的组成部分,与传统现浇混凝土结构相比,它具有质量可控、施工便捷、节能环保等优点。积极发展装配式混凝土结构,有助于推进建筑产业化、工业化发展,保证我国建筑行业的可持续发展^[1]。装配式叠合板是由预制板和现浇钢筋混凝土层叠合而成的装配整体式楼板,由于兼具预制构件的诸多优点,又有较好的整体性,能产生巨大的经济效益,具有广阔的应用前景。在所有的装配式叠合板中,桁架钢筋叠合板应

用占比最大。桁架钢筋叠合板单板的基本类型可分为四面出筋叠合单板和四面不出筋叠合单板;根据相邻预制板连接方式的不同,其可以分为后浇带连接和密拼连接两类,示意图如图1所示。后浇带连接需在预制板之间留出外伸钢筋,板拼接处需进行现场支模,浇注混凝土形成整体,如图2(a)所示;而密拼连接的预制板无需外伸钢筋,板拼接处无需支模,仅需在上层浇注混凝土形成整体,如图2(b)所示。由于密拼桁架钢筋叠合板拼缝处无需现场支设模板,提高了施工效率,降低了施工技术要求,避免了运输时外伸钢筋的损耗,更利于发挥装配式技术的优势。

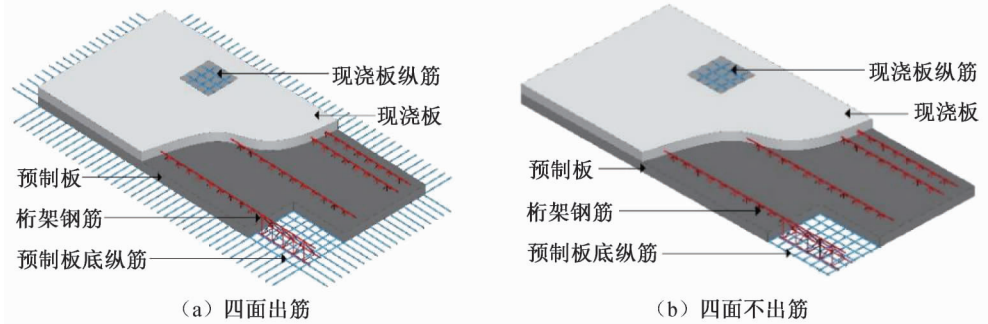


图1 桁架钢筋叠合板单板基本类型示意图

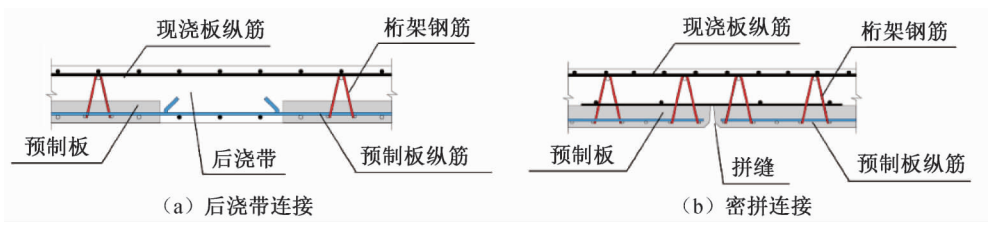


图2 桁架钢筋叠合板连接形式示意图

鉴于密拼叠合板的诸多优点,研究者从多角度对叠合板进行了试验研究。余泳涛等^[2]通过对叠合板传力机理的分析,提出了提高板整体承载力的方法。刘运林等^[3]研究了在各级荷载下拼缝对叠合板传力影响。周鲲鹏等^[4]根据弹性原理,推导了预应力双向叠合板的弯矩分配公式。Zhang等^[5]通过足尺试验,研究了叠合板承载力、裂缝开展以及拼缝受力情况。Lam等^[6]通过试验和数值分析发现,现浇层与预制板的可靠连接对叠合构件的整体结构性能的评价至关重要。Han等^[7]将带肋预制板倒置,增强了叠合性能。Gholamhoseini等^[8]对带有型钢甲板的预制板进行测试研究,描述了钢面板与混凝土

板之间的黏结滑移行为。张晓光等^[9]通过现场试验发现,叠合构件的新旧混凝土黏结性能与界面粗糙程度指标相关。此外,研究者建立了一系列数值模型,对叠合板进行有限元分析。邴卿德等^[10]利用有限元软件 ABAQUS 研究了叠合板拼缝处的受弯性能,并对凹槽密拼叠合板进行一系列因素分析。张磊等^[11]通过有限元分析研究了四边不出筋桁架钢筋叠合板的受力特点,并验证了四边不出筋叠合板的有效性。解忠舒等^[12]采用 ABAQUS 并结合混凝土损伤理论,对密拼叠合板进行有限元建模,进一步分析了叠合板的受力性能。上述研究揭示了桁架钢筋叠合板的力学性质,为工程设计提供了基本依据。

本研究通过建立精细化数值模型,考虑材料非线性以及材料间的接触行为,研究影响密拼桁架钢筋叠合板承载力的不同因素。首先通过叠合板足尺加载试验,揭示其荷载-挠度曲线和裂缝分布等力学性能。然后采用 ABAQUS 对密拼桁架钢筋叠合板进行精细化建模,输出荷载-挠度曲线和分析破坏形式,并与试验结果进行对比,验证所建立模型的合理性。最后建立不同模型并设置不同的材料参数,进行叠合板承载力的影响因素分析。影响因素分析中主要考虑了新旧混凝土的强度差异;量化了叠合面可能存在的叠合面滑移;探究了桁架钢筋道数对叠合板的整体作用,并以试验结果为基础,运用损伤理论对桁架钢筋叠合板数值模拟结果作进一步解释。本研究建立的叠合板精细化分析模型,能够对试验结果进行扩展,为密拼桁架钢筋叠合板的工程应用推广提供理论基础和技术支撑。

1 叠合板足尺试验

本研究根据《钢筋桁架混凝土叠合板应用技术规程》(T/CECS 715—2020),试验设计了轴线尺寸为 5000 mm×5000 mm 单拼缝的叠合板试件。底板由两块板厚为 60 mm,长宽为 4600 mm×2300 mm 的预制板密拼而成。底板四边不出筋并由混凝土边梁支撑,现浇层厚度为 80 mm,与楼板的梁、柱均采用 C30 强度的混凝土现浇为一体,叠合板平面图见图 3,垂直拼缝截面图见图 4,试件具体构造可参见文献[5]。根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),预制层和现浇层配筋均采用 HRB400 钢筋,现浇层布筋为双向 $\Phi 8@150$ (钢筋直径为 8 mm,布置间距为 150 mm),在支座以及拼缝

处分别增加附加钢筋 $\Phi 8@150$ (钢筋直径为 8 mm,布置间距为 150 mm) 和 $\Phi 10@130$ (钢筋直径为 10 mm,布置间距为 130 mm)。

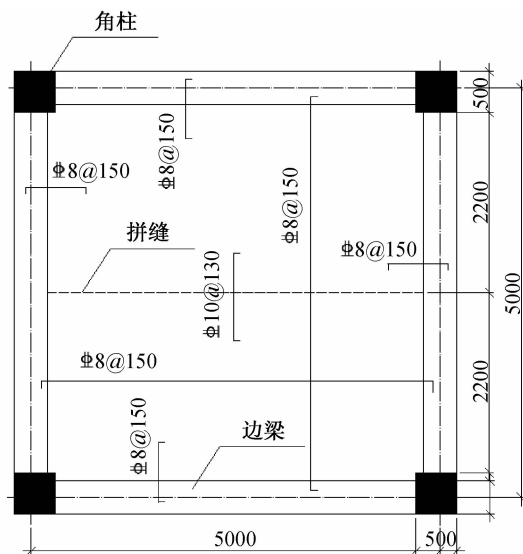


图 3 叠合板平面图(mm)

根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)计算,叠合板正常使用极限状态对应的荷载为 9.6 kN/m²,承载能力极限状态对应的荷载为 20.8 kN/m²。为了深入研究叠合板的受力极限以及构件安全性,试验最大荷载选取 40.0 kN/m²,基本为 2 倍承载能力极限状态时的荷载。荷载方案参考《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)进行,通过在上板面均匀堆放沙包来模拟分级施加均布荷载(见图 5),以避免地板变形后的拱效应。每级荷载为 1.0 kN/m² 并持荷 15 min,直至挠度数据稳定,并且下一级加载前试验数据采集完毕。

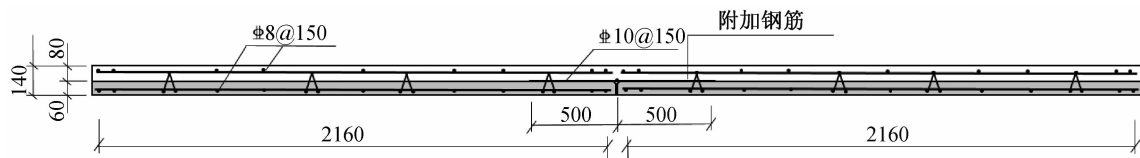


图 4 叠合板垂直拼缝截面图(mm)

图 6 为试验所测底板跨中处、平行拼缝 1/4 处以及垂直拼缝 1/4 处荷载-挠度曲线,从图中可以看出,平行拼缝 1/4 处的刚度略大于垂直拼缝 1/4 处的刚度,表明底板拼缝或桁架钢筋排布走向使密拼桁架钢筋叠合板表现为各向异性的力学特征。荷载施加至 40.0 kN/m² 时,两者峰值挠度差值为 2.31 mm,底板跨中峰值挠度为 25.68 mm。图 7 为试验底板裂缝分布情况,裂缝沿 45°角向四边延伸。

与现浇双向板不同的是,由于拼缝的存在削弱了垂直拼缝方向板带刚度^[5],进行试验的叠合板底板拼缝处有明显的裂缝,并出现多条垂直于拼缝的裂缝。

2 叠合板有限元模型

2.1 材料属性

在 ABAQUS 中,钢筋材料采用桁架单元且视为弹塑性,其中屈服强度 $f_{y,r} = 400$ MPa,杨氏模量



图5 试验堆载现场照片^[5]

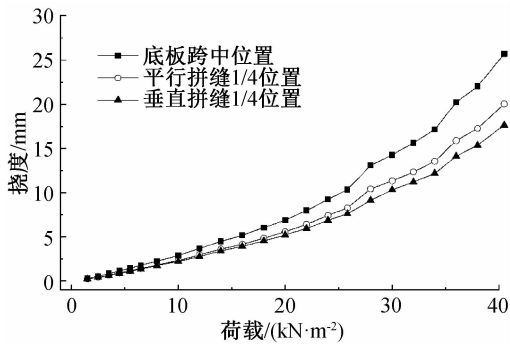


图6 预制底板荷载-挠度曲线

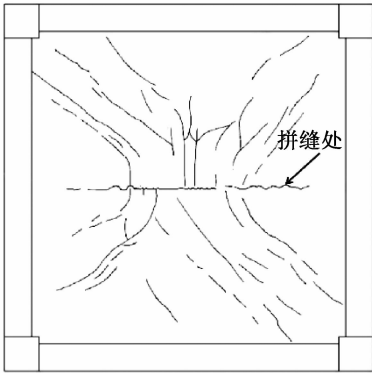


图7 预制底板裂缝分布位置

$E_s=2\times10^5$ MPa,泊松比 $\nu=0.3$ 。为了描述混凝土材料的非线性,采用混凝土塑性损伤本构模型(Concrete damaged plasticity,CDP)^[13]给出混凝土的力学性能。该模型以各向同性的弹性损伤和各向同性的拉伸和压缩塑性对混凝土的非弹性行为进行描述^[14]。两个损伤变量分别为拉伸损伤和压缩损伤,说明了不同的刚度退化状态。根据退化损伤响应,建立了弹塑性损伤本构方程,应用有效应力函数,并校准材料参数,以便控制屈服面的演变。

对于单轴拉伸以及压缩^[15]可给出以下方程:

$$\sigma_t=(1-d_t)E_0\varepsilon$$
$$\sigma_c=(1-d_c)E_0\varepsilon$$

其中: σ_t 和 σ_c 为混凝土单轴拉伸以及压缩应力; ε 为混凝土应变; E_0 为杨氏模量; d_t 和 d_c 在CDP模型

中分别表示拉伸损伤变量以及压缩损伤变量。
在给出了损伤与应力之间的关系后,还需确定损伤演化公式。本研究采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(2015 年版)推荐的损伤演化公式:

$$d_c=\begin{cases}1-\frac{\rho_c\beta}{\beta-1+x_c^\beta}, & x_c\leqslant 1; \\ 1-\frac{\rho_c}{\alpha_c(x_c-1)^2+x_c}, & x_c>1\end{cases}\quad (3)$$

$$\rho_c=\frac{f_{cr}}{E_0\varepsilon_{cr}}\quad (4)$$

$$\beta=\frac{E_0\varepsilon_{cr}}{E_0\varepsilon_{cr}-f_{cr}}\quad (5)$$

$$y_c=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cr}}\quad (6)$$

其中:受压时的形状参数 $\alpha_c=0.92$;杨氏模量 $E_0=3\times10^4$ N/mm²;混凝土的单轴抗压强度代表值 $f_{cr}=22.8$ MPa; ε_{cr} 为 f_{cr} 所对应抗压强度的应变。拉伸损伤定律可表示为:

$$d_t=\begin{cases}1-\rho_t(1.2-0.2y_t^5), & y_t\leqslant 1; \\ 1-\frac{\rho_t}{\alpha_t(y_t-1)^{1.7}+y_t}, & y_t>1\end{cases}\quad (7)$$

$$y_t=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{tr}}\quad (8)$$

$$\rho_t=\frac{f_{tr}}{E_0\varepsilon_{tr}}\quad (9)$$

其中:受拉时的形状参数 $\alpha_t=1.26$;杨氏模量 $E_0=3\times10^4$ N/mm²;混凝土单轴抗拉强度代表值 $f_{tr}=2.01$ MPa; ε_{tr} 为 f_{tr} 所对应抗拉强度的应变,泊松比 $\nu=0.2$ 。

为了描述混凝土在受压状态下的塑性变形,还需确定CDP模型中的塑性参数,CDP模型所需的混凝土塑性参数见表1,其中:偏心率为流动势偏移量, f_{b0}/f_{c0} 为双轴抗压强度与单轴抗压强度之比, k 为不变量应力比。

表1 CDP模型材料定义				
膨胀角/(°)	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	k	黏性参数
38	0.1	1.16	0.667	0.0005

加载方式为均布堆载 $P=40.0$ kN/m²,钢筋与混凝土之间的黏结主要依靠胶着力、二者间的摩擦力和钢筋表面螺纹而产生的机械咬合力。因未施加循环荷载,钢筋与混凝土之间的黏结视为可靠,不考虑其中钢筋与混凝土的滑移效应。在ABAQUS中将钢筋网与混凝土模型进行内置区域(Embedded

region)约束,混凝土构件以八节点实体减缩积分单元进行网格划分,钢筋则采用桁架单元。

2.2 数值模拟结果

由试验现象可知,叠合板新旧混凝土界面未发生明显的剪切破坏,故在 ABAQUS 中采用绑定 (Tie)将预制底板和现浇层进行约束,暂时不考虑叠合面相互滑移^[16]。图 8 为数值模拟输出的底板最大主应力云图,图中高应力区由底板跨中起始,随后逐渐向底板中部呈 45°扩展,呈现典型的双向板受力特征。在混凝土塑性损伤模型中,拉压损伤变量被用来描述裂缝发展所带来的拉压损伤机理,将模型与非线性有限元方法结合,可精细地描述裂缝开展规律^[17]。因此输出底板受拉损伤云图(见图 9),结果显示高损伤区域集中在底板的拼缝附近,这与试验中裂缝(见图 7)的集中部位基本一致。

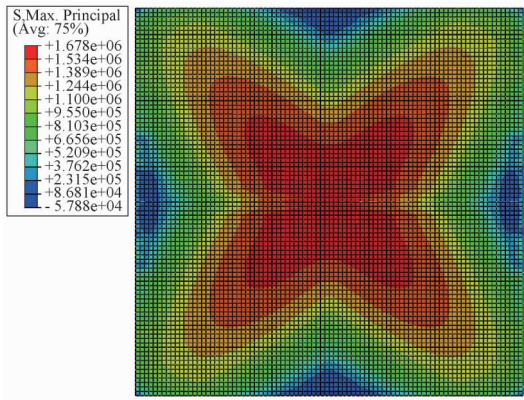


图 8 底板最大主应力云图

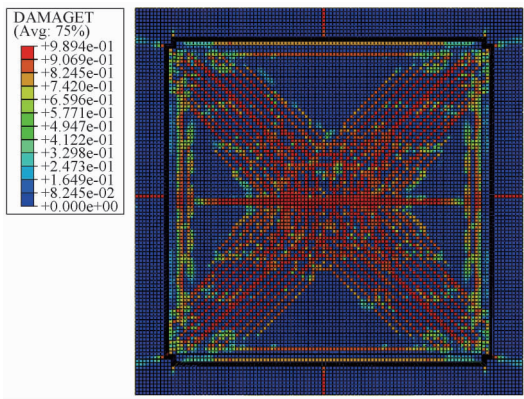


图 9 底板受拉损伤云图

图 10 为叠合板在均布堆载作用下的跨中荷载-挠度曲线,模拟结果与试验进行比较,两者荷载-挠度曲线发展趋势一致。其中试验对应曲线的峰值挠度为 25.68 mm,数值模拟输出的叠合板跨中峰值挠度为 27.46 mm,模拟结果相较试验误差为 6.93%,且更偏于保守,这表明所提出的数值模型的正确性和有效性。

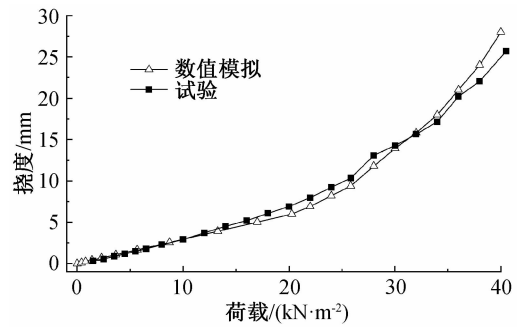


图 10 底板跨中荷载-挠度曲线

3 叠合板承载力影响因素分析

叠合板与现浇楼板相比,结构组成更为复杂,影响其受力性能的构造因素更多,也比现浇楼板更为复杂。然而,由于试验条件、经费、时间等因素的限制,试验方式并不适宜大规模开展。有限元数值分析方法,可以在不增加试验个数的基础下,大幅扩展叠合板受力性能研究的探讨深度。因此在验证本研究提出的数值模型正确性的基础上,对新旧混凝土强度、叠合面接触、桁架钢筋道数等影响叠合板承载力的因素进行分析。

3.1 新旧混凝土强度分析

新旧混凝土的黏结连续性可靠是保障叠合构件承载力的关键,目前桁架钢筋叠合板大多采用底板预制上部现浇的结构模式,这种结构模式使新旧混凝土接触界面易产生不连续性。研究表明,不同混凝土强度对叠合构件的结构协调变形和传力产生影响^[18-19],因此进行叠合板的新旧混凝土强度影响分析。底板选择 C30 混凝土不变,以现浇层混凝土强度作为变量进行数值分析。其中,各等级混凝土材料参数参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)进行计算确定。

输出数值分析所得的叠合板跨中荷载-挠度曲线如图 11 所示,并将各强度混凝土对应的峰值挠度与 C30 混凝土所对应的峰值挠度进行对比,见表 2。从图 11 和表 2 可知:a)叠合板跨中挠度峰值随混凝土强度增强而减小,对应的承载能力小幅提升;b)现浇层为 C25 混凝土时,峰值挠度对比 C30 混凝土差值最大,对比差率为-4.69%,C45 混凝土对比 C30 混凝土对应的叠合板峰值挠度对比差率为 4.20%;c)随着混凝土强度增长,挠度减下幅度降低,这一现象与文献^[20]所得到的结论相似,若考虑经济效益可选用 C30—C40 混凝土对叠合板进行上部现浇。

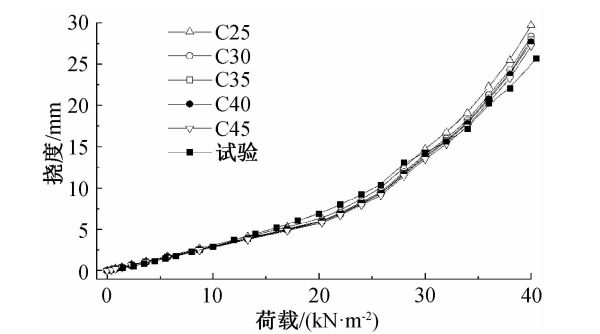


图 11 不同混凝土强度对应荷载-挠度曲线

表 2 不同混凝土强度对应跨中挠度峰值

混凝土等级	弹性模量 $\times 10^{-4}$ /MPa	峰值挠度/ mm	对比差率/ %
C25	2.80	29.68	-4.69
C30	3.00	28.35	0
C35	3.15	27.92	1.53
C40	3.25	27.65	2.47
C45	3.35	27.16	4.20

3.2 叠合面接触分析

在现场作业时,叠合面通常的处理方式是自然粗糙和人工拉毛(增设 4.00 mm 深度的凹凸面),也可以通过预制底板加肋、在界面增设抗剪筋等,以达到增强界面抗剪的目的。为研究叠合面可能存在的摩擦滑移,本研究建立了四组模型(见表 3),其中:PS-1 不考虑叠合面滑移行为,上下板面视为理想黏结;模型 PS-2、PS-3 和 PS-4 设置底板和现浇层接触属性时,分别定义法相行为和切相行为,法相行为为“硬”接触,考虑到叠合面可能存在的弹性滑移,避免数值计算不收敛,在切向行为采用罚函数设置叠合面摩擦系数。在模拟分析过程中,底板和现浇层的接触面相对滑动量不超过一个单元典型尺寸的 20%,因此在 ABAQUS 中选择小滑移 (Small

sliding)而不是有限滑移(Finite sliding)来描述接触面的滑动行为^[21]。

表 3 叠合面摩擦设定^[22]

编号	叠合面处理方式	摩擦系数 μ
PS-1	不考虑滑移	—
PS-2	抹光处理	0.3
PS-3	未经处理自然振捣粗糙面	0.6
PS-4	拉毛或增设 4.00 mm 凹凸面处理	1.0

数值模拟所得叠合板的跨中荷载-挠度曲线见图 12,由图 12 可知:相较叠合面采用绑定(Tie)约束的模型 PS-1,界面采用接触单元降低了叠合板承载力,叠合板在荷载作用下挠度增大;对比 PS-2、PS-3 和 PS-4,切向摩擦系数取值 0.6 和 1.0,即叠合板新旧混凝土截面施工采用粗糙面处理或拉毛增设凹凸面更为安全合理。

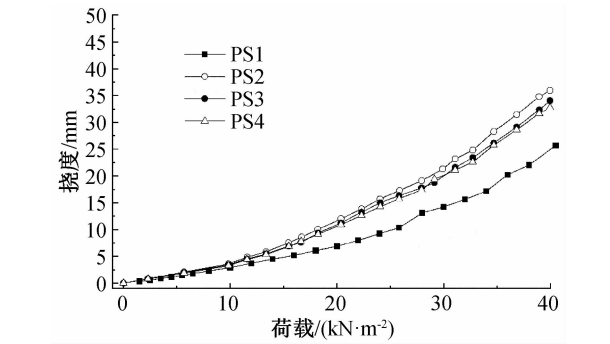


图 12 不同叠合面处理荷载-挠度曲线

在有限元分析中,底板损伤分布情况(见图 13)与试验中底板裂缝分布情况较为一致,高损伤区域沿 45°角向四周扩展,且存在部分竖向损伤带垂直于拼缝。三组模拟所输出的损伤分布形式相近,在相同的荷载作用下,模型 PS-2($\mu=0.3$)的损伤分布区域更大更加密集,而 PS-4($\mu=1.0$)的损伤分布区域最小。

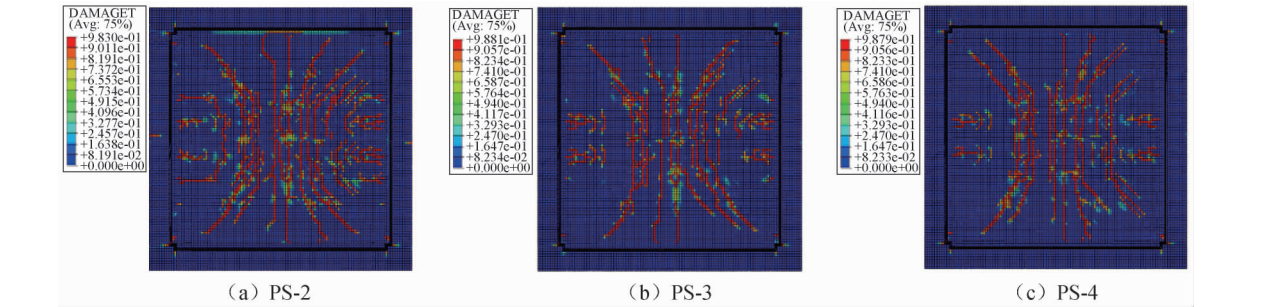


图 13 不同叠合面处理底板受拉损伤云图

3.3 桁架钢筋对叠合板承载能力的影响

为研究桁架钢筋对叠合板承载能力的影响,以桁架钢筋道数为变量,分别建立 5 组模型(HJ1—HJ5)。在不改变模型尺寸以及材料属性的前提下,仅改变桁架钢筋道数(见图 14)。其中 HJ1 为 8 道

桁架钢筋,HJ2 为 6 道桁架钢筋,拼缝两侧桁架钢筋上弦筋相距 1500 mm,HJ3、HJ4 分别为 4 道和 2 道桁架钢筋,对应拼缝两侧桁架钢筋上弦距离为 1500 mm 和 1700 mm。模型 HJ5 不设置桁架钢筋,仅双层双向布筋。

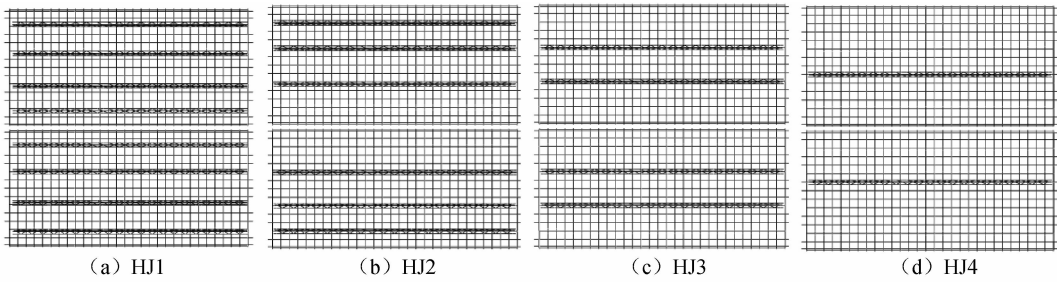


图 14 HJ1-HJ4 桁架钢筋布置

输出各模型预制底板跨中部位的荷载-挠度曲线如图 15 所示,由图 15 可知:各试件在加载初期的荷载-挠度曲线接近重合,发展趋势基本一致。随着持续加载,曲线逐渐分离,HJ5 对应曲线提前进入塑性阶段,上升趋势加快。模型设置的桁架钢筋道数越少,对应曲线峰值挠度越大,由于曲线输出部位为底板跨中,其挠度变化表现也与拼缝两侧的桁架钢筋间距相关联。在 40.0 kN/m^2 荷载作用下,HJ1 与 HJ2 峰值挠度差为 11.34 mm ,而 HJ2—HJ5 峰值挠度较为接近。

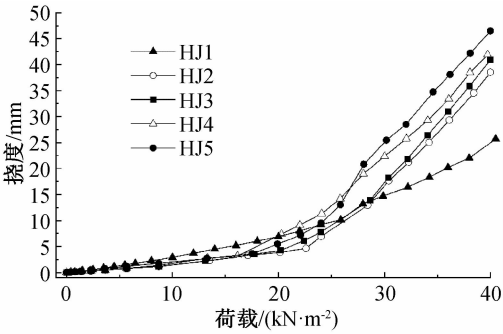


图 15 不同道数桁架钢筋的叠合板荷载-挠度曲线

4 结 论

本研究考虑了材料非线性和材料间的接触行为,通过足尺试验得到了单缝密拼桁架钢筋混凝土叠合板的荷载-挠度曲线和裂缝分布,建立了精细化数值模型,并对叠合板的新旧混凝土强度、叠合面接触、桁架钢筋等影响叠合板承载力的因素进行有限元分析,得到以下结论:

a)对叠合板进行有限元分析时,采用 CDP 模型可以描述混凝土材料非线性行为,结合损伤理论能较好模拟出单缝密拼桁架钢筋叠合板的裂缝分布和受力特征。足尺试验中观察到叠合面无明显界面滑移行为;进行数值分析时,在参数设置中以约束单元代替界面的接触行为,所输出的峰值挠度与足尺试验所测峰值挠度误差为 6.93% ,且更偏于保守。

b)提高现浇层混凝土强度的同时,叠合板整体

刚度也随之提升,但随着混凝土强度增长,挠度减下幅度降低。在对叠合板进行现浇混凝土强度选择时,应考虑经济性以及结构使用功能进行合理选择。

c)叠合面不同的处理方式对叠合板承载力影响明显,若考虑到界面可能存在滑移,叠合面处理方式为 4.00 mm 左右凹凸面时,提升叠合板整体承载力以及减小裂缝扩展效果最佳。

d)在 40.0 kN/m^2 荷载作用下,增加桁架钢筋道数可较为明显的提升叠合板的刚度。值得注意的是,对于单缝密拼叠合板,拼缝两侧桁架钢筋的间距是控制叠合板跨中挠度的关键因素之一。

参考文献:

[1] 王洋. 浅谈装配式结构的发展前景[J]. 绿色环保建材, 2021, 4(77): 158-159.

[2] 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.

[3] 刘运林, 叶献国, 种迅, 等. 端拼缝叠合楼板受力性能试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(4): 85-89.

[4] 周鲲鹏, 吴方伯. 四边简支矩形单向预应力双向叠合板的弹性设计方法[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2006, 3(1): 63-65.

[5] Zhang X F, Li H M, Liang S X, et al. Experimental and numerical study of lattice girder composite slabs with monolithic joint[J]. Crystals, 2021, 11(2): 219.

[6] Lam S S E, Wong V, Lee R S M. Bonding assessment of semi-precast slabs subjected to flexural load and differential shrinkage[J]. Engineering Structures, 2019, 187: 25-33.

[7] Han S J, Jeong J H, Joo H E, et al. Flexural and shear performance of prestressed composite slabs with inverted multi-ribs[J]. Applied Sciences, 2019, 9(22): 4946.

[8] Gholamhoseini A, Gilbert R I, Bradford M A, et al. Longitudinal shear stress and bond-slip relationships in composite concrete slabs[J]. Engineering Structures, 2014, 69: 37-48.

[9] 张晓光, 陈泽超, 刘星, 等. 新旧混凝土结合面抗剪性能现场试验研究[J]. 结构工程师, 2010, 26(6): 70-75.

[10] 邴卿德, 林彦, 宋健凯, 等. 叠合板加强型密拼拼缝构造及受弯性能有限元分析[J]. 工业建筑, 2020, 50(9): 55-61.

[11] 张磊, 向征, 林涛, 等. 基于 ABAQUS 的密拼双向不出筋叠合板承载力有限元分析[J]. 四川建筑, 2020, 40(4): 224-227.

[12] 解忠舒, 胡国锋, 张洪杰, 等. 密拼连接叠合楼板精细化建模与损伤分析[J]. 科技通报, 2020, 36(4): 107-112.

[13] Dassault Systemes SIMULIA. Abaqus, 6.14, User's manual [EB/OL]. (2014) [2021-05-13]. <http://130.149.89.49:2080/v6.14/index.html>.

[14] 张国丽, 苏军. 基于 ABAQUS 的钢筋混凝土非线性分析[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(20): 5620-5624.

[15] Ren W, Sneed L H, Yang Y, et al. Numerical simulation of prestressed precast concrete bridge deck panels using damage plasticity model[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2015, 9(1): 45-54.

[16] 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.

[17] 任晓丹, 李杰. 基于损伤理论的钢筋混凝土结构裂缝分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(8): 1129-1134.

[18] 赵志方, 赵国藩, 刘健, 等. 新老混凝土粘结抗拉性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 51-56.

[19] 赵志方, 赵国藩, 黄承逵. 新老混凝土粘结抗折性能研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(2): 67-72.

[20] 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: 40-43.

[21] 宫龙颖. ABAQUS 接触问题浅析[J]. 中国煤炭, 2009, 35(7): 66-68.

[22] 林高峰. 考虑叠合面摩擦滑移的装配式混凝土结构性能与分析方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 44-53.

(责任编辑: 康 锋)