

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.014



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



新型桁架钢纤维混凝土叠合板的受力性能与协同效应有限元分析

张金保^{1a,2}, 秦张晨^{1a}, 徐涛^{1a,3}, 胡可欣^{1a}, 陈增顺^{1a,1b}, 许叶萌^{1a,1c},
王来发⁴, 胡俊杰²

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室; c. 航空航天学院, 重庆 400045; 2. 青海交通建设管理有限公司, 西宁 810021; 3. 重庆建工第三建设有限责任公司, 重庆 400042; 4. 青海省交控建设工程集团有限公司, 西宁 810021)

摘要:为提升预制叠合板在施工阶段的力学性能,并减少对临时支撑的依赖,提出一种新型桁架钢纤维混凝土叠合板(XUDB板),通过材料与结构的协同设计,系统研究其受力性能与增强机制。以3600 mm标准跨度叠合板为对象,设计涵盖传统钢筋桁架、新型桁架、普通混凝土与钢纤维混凝土的4类对比试件,通过有限元软件ABAQUS建立精细化三维实体模型并开展非线性耦合分析,其中混凝土采用塑性损伤模型,关键损伤参数采用逆向标定方法,钢材采用双折线本构模型。实体模型充分考虑各部件相互作用,建立加载装置模型以精确模拟实际受力状态。结果表明:相较于传统钢筋桁架板,新型桁架体系显著优化应力分布,使跨中主筋峰值应力降低21%,材料利用率提升至91.7%;钢纤维的桥接效应有效抑制裂缝与塑性区发展,XUDB板最大塑性应变降低37%,损伤因子峰值下降26.7%。钢纤维与新型桁架表现出显著的协同效应,共同形成了“纤维桥接-弦板分流”双重增强机制,使构件的破坏模式由“脆性压溃”转为“梯度缓释-多核耗能”,跨中压溃区面积减少33%,刚度退化速率降低28%。该协同机制显著提升了构件延性、承载力及施工阶段免支撑能力。

关键词:新型桁架;钢纤维混凝土;有限元分析;协同机制;破坏模式

中图分类号:TU375.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-16

A finite element analysis of mechanical performance and synergistic mechanisms in novel truss steel fiber-reinforced concrete composite slabs

收稿日期:2025-11-18

基金项目:重庆市杰出青年科学基金(2022NSCQ-JQX2377);重庆市技术创新与应用发展专项(CSTB2022TIAD-KPX0095、CSTB2022TIAD-KPX0142);重庆市建委科技计划项目(城科字2023第5-5号)

作者简介:张金保(1982-),男,正高级工程师,主要从事结构工程研究,E-mail:44155243@qq.com。

陈增顺(通信作者),男,博士,教授,E-mail:zengshunchen@cqu.edu.cn。

Received: 2025-11-18

Foundation items: Chongqing Outstanding Youth Science Fund Project (No. 2022NSCQ-JQX2377); Technological Innovation and Application Development of Chongqing (Nos. CSTB2022TIAD-KPX0095, CSTB2022TIAD-KPX0142); Chongqing Construction Technology Project (No. 2023 5-5)

Author brief: ZHANG Jinbao (1982-), senior engineer, main research interest: structural engineering, E-mail: 44155243@qq.com. CHEN Zengshun (corresponding author), PhD, professor, E-mail: zengshunchen@cqu.edu.cn.

ZHANG Jinbao^{1a,2}, QIN Zhangchen^{1a}, XU Tao^{1a,3}, HU Kexin^{1a},
CHEN Zengshun^{1a,1b}, XU Yemeng^{1a,1c}, WANG Laifa⁴, HU Junjie²

(1a. School of Civil Engineering; 1b. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area; 1c. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Qinghai Provincial Transportation Construction Management Co., Ltd., Xining 810021, P. R. China; 3. No.3 Construction Co., Ltd. of Chongqing Construction Engineering Group, Chongqing 400042, P. R. China; 4. Qinghai Communications Construction Engineering Co., Ltd, Xining 810002, P. R. China)

Abstract: To enhance the mechanical performance and support-free capability of precast composite slabs during the construction phase, this study proposes a novel truss steel fiber-reinforced concrete composite slab (XUDB slab). Through the synergistic design of materials and structure, its mechanical behavior and enhancement mechanisms were systematically investigated. Focusing on composite slabs with a standard span of 3600 mm, four types of comparative specimens were designed, encompassing traditional reinforced trusses, novel trusses, ordinary concrete, and steel fiber-reinforced concrete. A refined three-dimensional solid finite element model was established using ABAQUS for nonlinear coupled analysis. The results demonstrate that the novel truss system significantly optimizes stress distribution by improving the load transfer path, reducing the peak stress of the main reinforcement at mid-span by 21% and increasing the material utilization rate to 91.7%. The bridging effect of steel fibers effectively suppresses the initiation and propagation of micro-cracks, leading to a 37% reduction in the maximum plastic strain of the XUDB slab and a 26.7% decrease in the peak damage factor. Most importantly, the steel fibers and the novel truss exhibit a significant synergistic effect, jointly forming a dual enhancement mechanism of “fiber bridging - truss load redistribution.” This mechanism successfully transforms the failure mode from traditional “brittle crushing” to “gradient energy dissipation with multiple cores,” thereby reducing the crushing area at mid-span by 33% and decreasing the stiffness degradation rate by 28%. This synergistic mechanism significantly improves the ductility, load-bearing capacity, and support-free capability during the construction phase, providing an important theoretical basis for the optimal design of prefabricated composite slabs.

Keywords: new truss system; steel fiber-reinforced concrete; finite element analysis; synergistic mechanism; failure mode

随着城市化进程的加速和人们对建筑品质要求的提高,传统现浇方式虽然在长期的实践中被广泛应用,但现浇建筑需要进行烦琐的施工工序,导致施工周期较长,无法满足快速建设的需求^[1],相对于传统的现浇式建筑,装配式建筑是一种全新的建筑方向^[2-4],在环保、缩短工期、简化工序等方面具有显著的优势,有效地解决了传统施工方式存在的问题。在工厂中制作的预制构件质量可以得到较大保证,且对周围环境造成的污染小。同时,在现场吊装的过程中只需少量支撑,无需像现浇混凝土那样大量支设模板,极大地节约了材料和人力^[5]。

在装配式建筑的施工阶段,预制底板吊装后与墙柱进行拼装连接,在同样承受预制底板自重以及施工活荷载的情况下,底板最大弯矩远大于设置临时支撑情况下的最大弯矩,预制底板向下产生挠曲变形,若预制底板无法抵抗由于自重以及施工活荷载引起的变形,则预制底板将会发生破坏^[6]。普通钢筋桁架叠合板预制底板为设置有钢筋桁架的混

凝土薄板,钢筋桁架的存在增强了叠合板的整体性和刚度^[7]。在主体预制混凝土构件的选用方面,目前还是以预制普通钢筋桁架叠合板为主,尤其大量应用于住宅、教学楼等标准化程度较高的建筑^[8]。然而,在装配式结构施工中,由于预制水平构件在工厂标准化生产阶段已完成材料强度发展并形成初始刚度,其作为叠合层现浇混凝土模板时已具备自承重潜力^[9]。若仍依赖传统临时支撑系统,不仅造成预制构件承载潜力的人为抑制,更将产生支撑架设与拆除过程额外人工及周转材料消耗、密集支撑体系加剧施工界面交叉干扰等问题,降低空间利用效率。由此可见,装配式建筑中冗余临时支撑的应用,实质上背离了工业化建造模式所追求的节能、节地、节水、节材与环境保护的核心理念,对建筑全生命周期碳排放控制产生逆向效应^[10]。

针对传统预制底板抗弯性能差、易开裂等缺点^[11-13],李隆邳等^[14]在混凝土薄板内嵌置连续钢筋桁架体系,通过三维空间结构的整体协同作用,显著

提升了预制构件的结构整体性和抗弯刚度。Yang等^[15]构建了预制底板无支撑跨度决策模型,研究揭示普通桁架体系临界无支撑跨度为3.0 m,预应力体系可拓展至3.9 m,其本质差异源于预应力钢绞线使截面刚度提升系数达1.83。Ma等^[16]揭示了桁架-混凝土协同作用机理,桁架钢筋通过45°剪力传递角形成空间桁架效应,使叠合板刚度提升系数达2.15。Zhang等^[17]揭示了工字钢接头装配式梁体系关键抗震指标变化规律发现,弯矩系数比在0.6~0.8区间时,表现出最优的耗能能力。Jhatial等^[18]采用波形补强内模,实现空心率42%,并将安装工效提升60%;通过肋梁参数优化,使材料利用率较传统密肋楼盖提高25%。恽燕春等^[19]采用响应面法优化密拼体系,使节点刚度提升37%,搭接长度缩减40%,为工程连接设计提供了量化指导。李浩东^[20]提出预埋角钢连接式H型钢-混凝土组合梁体系,研究表明,当角钢长度从200 mm增至250 mm时,组合梁刚度提升率达18.7%,极限承载力提高12.4%;研究建立的刚度优化公式为工程参数选择提供了理论依据^[21]。

在预制底板新材料开发方面,王文超等^[22]、彭亚萍等^[23]采用碳纤维增强复材(CFRP)片材强化体系,通过三点弯曲试验揭示CFRP增强节点界面滑移量降低82%,极限承载力提升2.1倍;建立的剥离破坏模型,准确预测了界面失效模式。该技术消除传统外伸钢筋构造,使拼缝施工效率提升50%。Lu等^[24]提出了一种预制混凝土组合板,采用压型钢板作为预制模板,剪力连接件与表层混凝土连接。对组合板性能进行了有限元分析,结果表明,钢板厚度、混凝土强度、RCA比例对预制RAC组合板的抗弯性能影响较小,钢筋屈服强度和压型钢板波高对预制RAC组合板的抗弯性能有一定影响。Lárusson等^[25]研究了高性能纤维增强水泥基复合材料和钢下部结构组成的预制轻质复合板构件的结构行为,结果表明,构件的挠度和固有频率都在可接受的范围内,并且其动力学特性被证明可以满

足典型的结构性能要求。黄炜等^[26]将钢纤维掺量1.5%的淤泥陶粒混凝土应用于预制底板,试验表明弯曲韧性指数提升至12.3,较普通混凝土底板提高3.8倍。

针对目前预制底板的研究现状,在预制底板优化设计的过程中存在不足:材料与结构协同研究方面,现有研究主要通过单一手段改善预制底板性能,尚未深入探讨材料与结构协同优化对预制底板力学性能的整体提升作用,未揭示其增强机制的系统性原理;协同作用下预制底板力学性能变化规律不明晰,现有研究对新材料、新结构协同作用下的装配式预制混凝土底板的力学性能变化规律尚未充分揭示,且对实际力学性能的演变缺乏系统性研究。为了进一步拓展预制叠合板的构造方式,并结合相关研究成果,提出一种新型桁架预制装配式钢纤维混凝土叠合板,对其受力性能进行有限元分析,研究叠合板的应力分布、塑性累积变形情况等,为此种新型叠合板的工程应用提供一定参考价值。

1 试件设计

主要研究3 600 mm这种最为典型的开间板长的预制底板。预制底板尺寸设计为长3 600 mm、宽1 200 mm、高60 mm,保护层厚度均采用15 mm。为了探究新型桁架结构与钢纤维混凝土材料对构件力学性能的影响,设置4种试件:钢筋桁架普通混凝土预制底板(DB板),采用传统钢筋桁架与C30普通混凝土;钢筋桁架钢纤维混凝土预制底板(UDB板),在DB板的基础上,以钢纤维混凝土替换普通混凝土;新型桁架普通混凝土预制底板(XDB板),在基准组的基础上,以新型桁架替换传统钢筋桁架,变量为桁架结构形式;新型桁架钢纤维混凝土预制底板(XUDB板),在结构组的基础上,进一步采用钢纤维混凝土,研究材料与结构的协同效应。试件编号等信息见表1,其中成本估算根据预制底板材料用量、材料单价等计算得到,由于材料价格存在波动区间,该成本估算仅供参考。

表1 试件信息

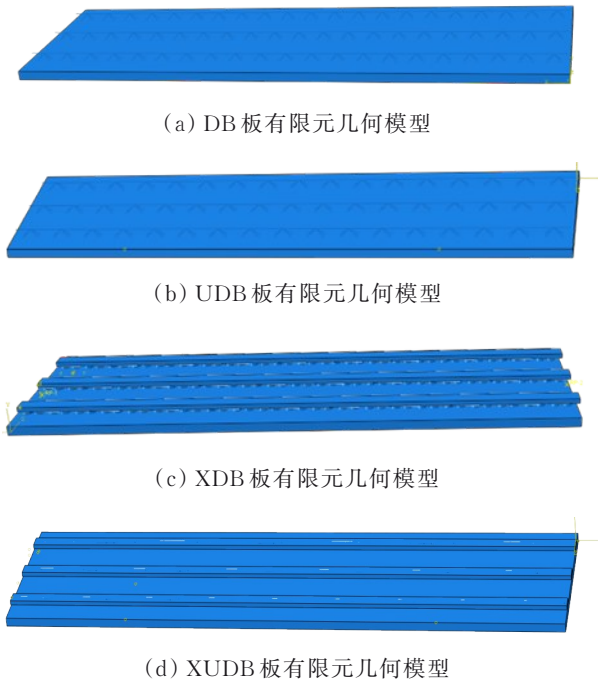
Table 1 Specimen information

试件	编号	名称	新型桁架	钢纤维混凝土	造价成本估算
试件1	DB	钢筋桁架普通混凝土预制底板	×	×	100~120元/m ²
试件2	UDB	钢筋桁架钢纤维混凝土预制底板	×	√	125~150元/m ²
试件3	XDB	新型桁架普通混凝土预制底板	√	×	108~133元/m ²
试件4	XUDB	新型桁架钢纤维混凝土预制底板	√	√	150~183元/m ²

新型桁架钢纤维混凝土预制底板的结构示意图及具体构造参数设计详图如图1所示。新型桁架预制底板的设计融合了材料与结构协同创新,其核

心由混凝土上弦肋、平面钢管桁架腹杆及钢纤维混凝土底板构成,取代了传统的钢筋桁架结构。基于上弦肋受压机理、腹杆受拉机理、裂缝控制机理,新

Region)嵌入混凝土实体中,假定二者协调变形。桁架节点间采用“绑定约束”(Tie)模拟焊接连接。加载设备与试件表面采用“表面与表面接触”(Surface-to-surface contact),其中法向为“硬接触”(Hard contact),切向摩擦系数取 0.3,以确保荷载传递的真实性。



(a) DB板有限元几何模型

(b) UDB板有限元几何模型

(c) XDB板有限元几何模型

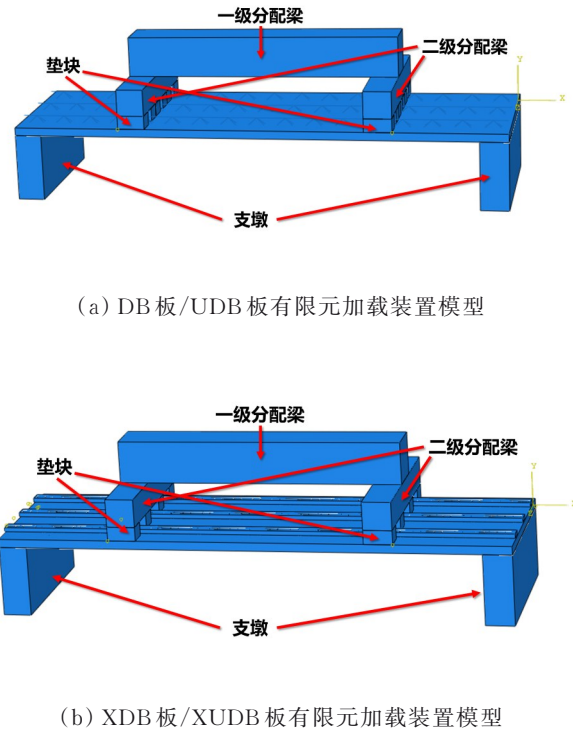
(d) XUDB板有限元几何模型

图2 有限元几何模型图

Fig. 2 Finite element geometric model schematic

根据实际加载方案建立有限元加载装置模型,如图3所示,包括支墩、一级分配梁、二级分配梁和垫块。在具体有限元加载装置模型中,叠合板与分配梁/垫块间的接触定义为:叠合板与垫块(或分配梁)之间采用“表面与表面接触”(Surface-to-surface contact);切向行为定义为“罚接触”(Penalty),摩擦系数设定为 0.3,以模拟构件间的摩擦力;法向行为定义为“硬接触”(Hard contact),允许接触压力在表面间传递,并防止相互穿透。构件桁架钢筋、受力筋等通过“内置区域”(Embedded region)命令嵌入到混凝土底板和上弦肋中,假设两者间不发生相对滑移;在一级分配梁顶面中心设置参考点,通过“耦合约束”(Coupling)将参考点与加载面关联,从而施加集中荷载或位移。支墩的底部需要模拟其固定在实验室地面的状态,对支墩底面施加“固定约束”(Encastre),即限制其3个方向的平动位移($U_1=U_2=U_3=0$)和3个方向的转动位移($U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$)。基于圣维南原理构建等效加载体系,通过两个1/4跨对称集中荷载实现等效均布荷载转换,建立弯矩等效方程 $M_{eq}=2PL/8=qL^2/8$,确定集中荷载

值 $P=ql/2$ 。



(a) DB板/UDB板有限元加载装置模型

(b) XDB板/XUDB板有限元加载装置模型

图3 有限元加载装置模型图

Fig. 3 Finite element loading setup model schematic

2.2 材料属性与本构

基于 ABAQUS 数值模拟平台,采用连续介质力学框架构建混凝土材料的本构表征体系。C30 普通混凝土与钢纤维高强混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 依据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012) 试验获得,每个试件搅拌批次对应制作 150 mm×150 mm×150 mm 立方体标准试件 3 个,试验值如表 2 所示。根据《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010) 得到其他混凝土性参数,由式(1)~(3)计算得到。

$$f_c = \alpha_{c1} \alpha_{c2} f_{cu} \quad (1)$$

$$f_t = 0.395 \times (f_{cu})^{0.55} \times (1 - 1.645\delta)^{0.45} \alpha_{c2} \quad (2)$$

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}}} \quad (3)$$

选用塑性损伤模型构建混凝土本构关系,在定义其塑性损伤时,设定初始单轴屈服应力、硬化系数,应力应变关系参考《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010),破坏准则为强度准则,不考虑混凝土压碎;其损伤参数(包括单轴受压/受拉损伤因子、膨胀角、流动势偏心率等)经试验数据逆向标定如表 3 所示。试件采用钢筋为 HRB400 钢筋,钢管为 Q345B 钢。

表2 混凝土立方体试件抗压强度表

Table 2 Table of compressive strength of concrete cube specimens

混凝土类别	试件编号	组别	峰值荷载/kN	混凝土立方体抗压强度/MPa
C30普通混凝土	DB	实测值1号	338.76	34.46
	DB	实测值2号	358.18	34.46
	DB	实测值3号	336.89	34.46
	XDB	实测值1号	367.34	35.53
	XDB	实测值2号	343.87	35.53
	XDB	实测值3号	354.64	35.53
钢纤维高强混凝土	UDB	实测值1号	663.79	68.18
	UDB	实测值2号	740.51	68.18
	UDB	实测值3号	641.15	68.18
强混凝土	XUDB	实测值1号	645.74	65.33
	XUDB	实测值2号	631.37	65.33
	XUDB	实测值3号	682.75	65.33

表3 混凝土塑性损伤参数

Table 3 Concrete plastic damage parameters

膨胀角/(°)	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	K	黏性参数
30	0.1	1.16	0.6667	0.0005

混凝土单轴受压应力-应变关系的本构关系^[27]

见式(4)。

$y =$

$$y = \begin{cases} \left(\frac{E_0 \epsilon_c}{f_c} \right), x \leq 0.211, \text{ 即 } \sigma \leq 0.4f_c \\ \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3, 0.211 < x \leq 1 \\ \frac{x}{\left[\alpha_d (x - 1)^2 + x \right]}, x > 1 \end{cases} \quad (4)$$

混凝土单轴受拉应力-应变关系^[28]由(5)计算。

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6, x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_t (x - 1)^{17} + x}, x > 1 \end{cases} \quad (5)$$

C30混凝土受压应力-应变曲线如图4所示, C30混凝土受拉应力-应变曲线图5所示。

基于连续介质损伤力学理论系统表征混凝土受压全过程力学响应。其中非弹性应变 $\epsilon_{c,m}$ 作为损伤演化的内变量,其演化规律遵循式(6)表征的指数型硬化-软化准则^[29],该参数通过试验数据逆向回归标定,其数学表达式为

$$\epsilon_{c,m} = \epsilon_c - \sigma_c / E_0 \quad (6)$$

开裂应变 ϵ_{ck} 的计算公式^[30]见式(7)。

$$\epsilon_{ck} = \epsilon_t - \sigma_t / E_0 \quad (7)$$

开裂损伤因子 d_t 的计算公式见式(8)。

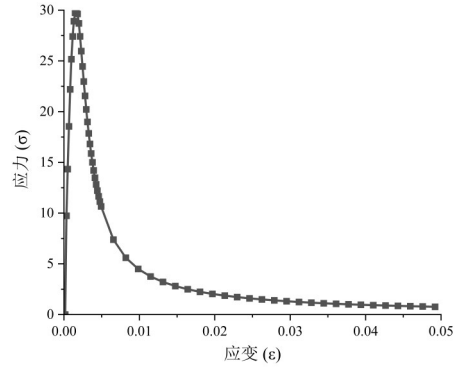


图4 C30混凝土受压应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of C30 concrete under compression

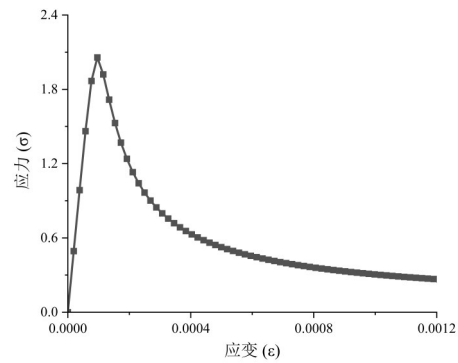


图5 C30混凝土受拉应力-应变曲线

Fig. 5 Tensile stress-strain curve of C30 concrete

$$d_t = 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon_{tr}} - 1 \right)^{1.7} + \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{tr}}} \quad (8)$$

C30混凝土开裂应变曲线如图6所示, C30混凝土开裂损伤曲线如图7所示。

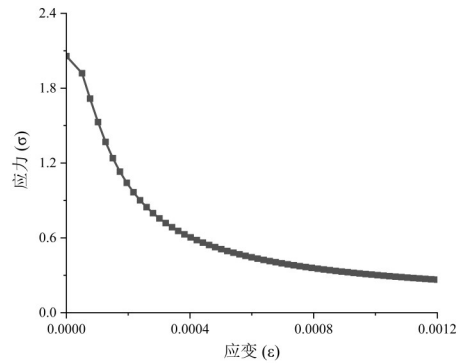


图6 C30混凝土开裂应变曲线

Fig. 6 C30 concrete cracking strain curve

以CEB-FIP MC90本构模型作为钢纤维混凝土的本构关系模型,由上升段和下降段组成,其中上升段采用抛物线近似,下降段采用指数衰减。钢纤维混凝土的单轴受压应力-应变曲线表达式见式(9)。

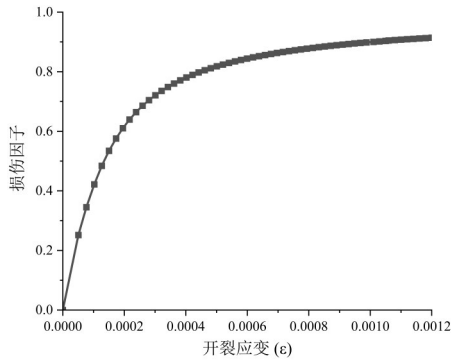


图 7 C30 混凝土开裂损伤曲线

Fig. 7 C30 concrete cracking damage curve

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{cf} \cdot \left(\frac{k_f \cdot \epsilon}{\epsilon_{of} + (\epsilon^{k_f})} \right), & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{of} \\ f_{cf} \cdot e^{-\beta_f(\epsilon - \epsilon_{of})}, & \epsilon > \epsilon_{of} \end{cases} \quad (9)$$

钢纤维混凝土的单轴受拉应力-应变曲线表达式见式(10)。

$$\sigma_t = \begin{cases} E_{cf} \cdot \epsilon, & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{ct} \\ f_{ctf} \cdot e^{-\gamma_f(\epsilon - \epsilon_{ct})}, & \epsilon > \epsilon_{ct} \end{cases} \quad (10)$$

钢纤维混凝土受压应力-应变曲线如图 8 所示, 钢纤维混凝土受拉应力-应变曲线图 9 所示。

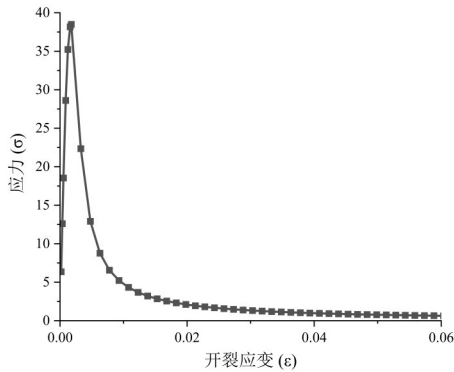


图 8 钢纤维混凝土受压应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve of steel fibre concrete under compression

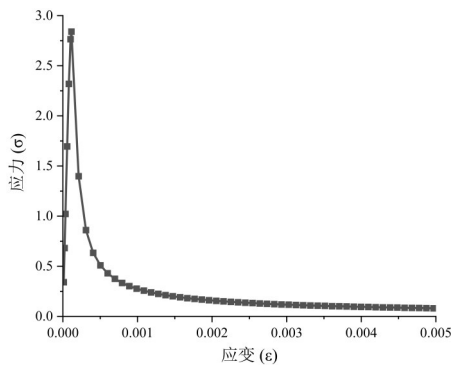


图 9 钢纤维混凝土受拉应力-应变曲线

Fig. 9 Tensile stress-strain curve of steel fibre concrete

钢纤维混凝土的非弹性应变由式(11)计算。

$$\epsilon_{in} = \epsilon - \frac{\sigma}{E_{cf}} \quad (11)$$

钢纤维混凝土的开裂应变由式(12)计算。

$$\epsilon_{ct} = \frac{f_{ctf}}{E_{cf}} \quad (12)$$

钢纤维混凝土开裂应变曲线如图 10 所示, 钢纤维混凝土开裂损伤曲线如图 11 所示。

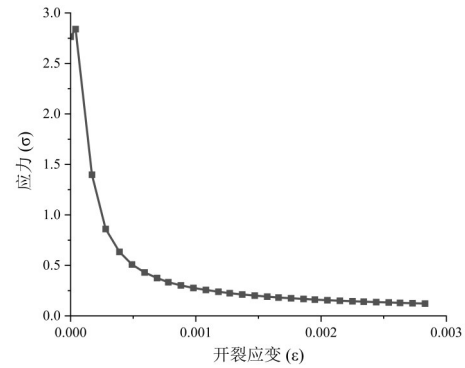


图 10 钢纤维混凝土开裂应变曲线

Fig. 10 Cracking strain curve of steel fibre concrete

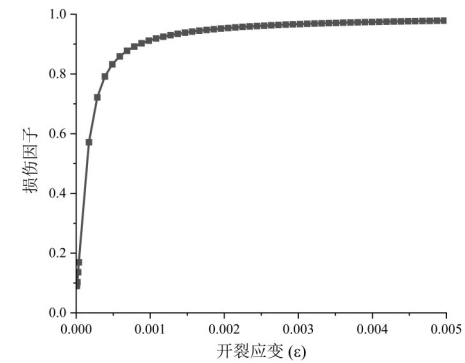


图 11 钢纤维混凝土开裂损伤曲线

Fig. 11 Steel fibre concrete cracking damage curve

基于金属材料弹塑性力学理论体系,对钢材本构行为进行多尺度表征。采用 VonMises 屈服准则表征钢筋力学行为,其本构关系表达式为

$$\sigma_s = \begin{cases} \epsilon_s E_s, & \epsilon_s \leq \epsilon_y \\ f_y + k(\epsilon_s - \epsilon_y), & \epsilon_s > \epsilon_y \end{cases} \quad (13)$$

HRB400 钢筋本构关系曲线如图 12 所示,其本构行为可解析表述为 OB 段为弹性阶段,BC 段为塑性硬化阶段,OB 段斜率为钢材的弹性模量,B 点为条件屈服点,C 点钢材的应力达到极限值。

Q345B 钢的屈服准则通常采用 Von Mises 屈服准则,该准则考虑了多轴应力状态下的屈服行为。

Von Mises 屈服准则的数学表达式为

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2)} \leq \sigma_y \quad (14)$$

通过准静态拉伸试验获取钢材材料性能,试件

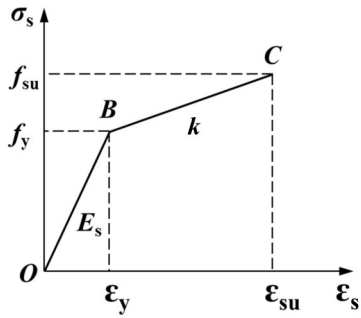


图 12 HRB400 钢筋本构关系曲线

Fig. 12 HRB400 constitutive relationship curve

主体采用的 HRB400 钢筋直径为 8 mm 与 10 mm, Q345B 钢管直径/厚度为 32 mm/2 mm, 钢材材料性能具体如表 4 所示。

2.3 网格敏感性分析

网格敏感性分析旨在评估不同网格尺寸对模拟结果的影响, 确保计算的精度、稳定性和效率之间达到合理平衡。在模拟过程中, 过粗的网格可能导致计算误差较大, 无法准确捕捉应力集中或局部变形, 而过细的网格虽然能提高精度, 但会显著增

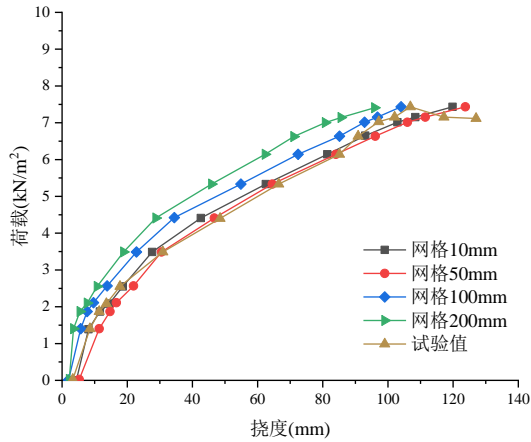
表 4 钢材材料性能试验结果

Table 4 Steel material property test results

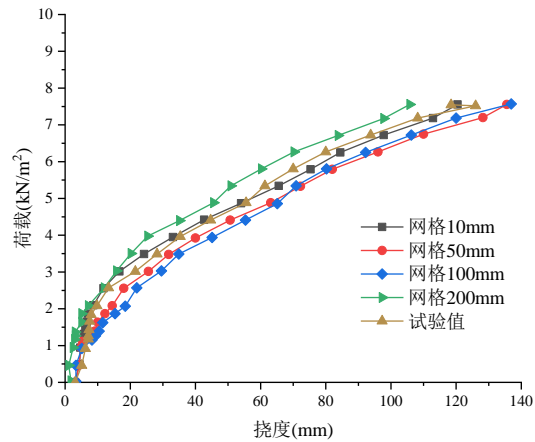
材料类别	直径、厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	强屈比
HRB400	8	433.5	661.7	189.5	1.53
HRB400	10	447.5	631.6	220.6	1.41
Q345B	32、2	350.4	556.1	225.5	1.58

加计算成本, 甚至导致收敛性问题。通过 4 组不同网格尺寸的模拟结果对比, 以荷载-挠度曲线作为关键力学参数, 分析 4 块板的网格敏感性, 确定合理的网格密度, 在计算效率和结果精度之间取得最佳平衡, 确保模型的鲁棒性, 如图 13 所示。

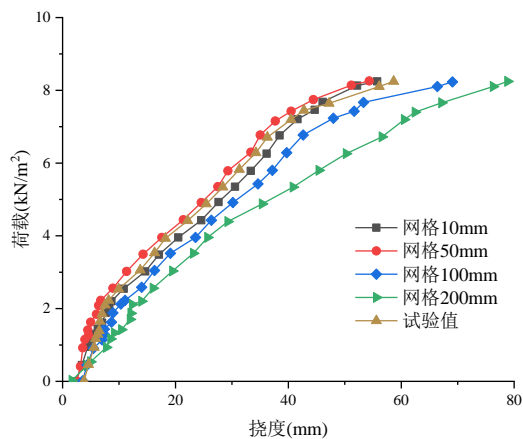
通过分析 4 块预制底板不同网格尺寸 (10、50、100、200 mm) 下的荷载-挠度曲线, 并与某装配式施工项目中与上述相同设计试件验收的试验值进行对比 (见图 14)。由图 13 可知, 50 mm 网格的曲线与试验数据非常接近, 能够有效模拟结构的受力和变形行为, 尤其在荷载较大时, 模拟值与试验数据的吻合程度更高, 能够较好地反映结构的全局行为和局部应力分布, 既保证了模拟计算值的准确性, 又



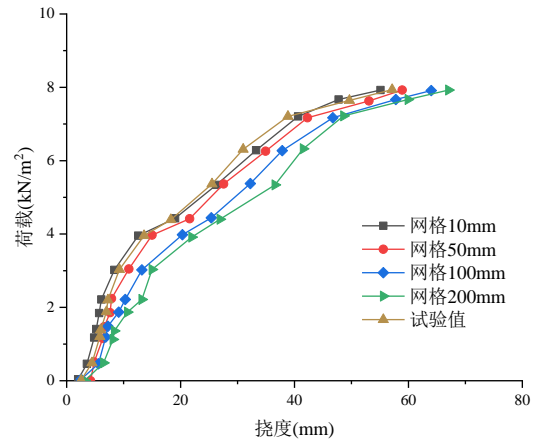
(a) DB板网格敏感性分析



(b) UDB板网格敏感性分析



(c) XDB板网格敏感性分析



(d) XUDB板网格敏感性分析

图 13 网格敏感性分析

Fig. 13 Grid sensitivity analysis diagram

提高了计算效率。

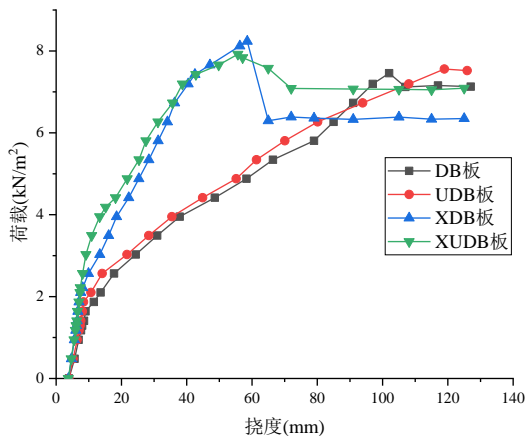


图 14 相同设计试件验收试验与结果

Fig. 14 Acceptance test of identical design specimens

3 结果分析

3.1 荷载-挠度分析

在模拟加载过程中,预制底板的挠曲变形随着荷载的增加呈现出明显的阶段性特征,其荷载-挠度曲线如图 15 所示,以 XUDB 板为例,在低荷载阶段,即荷载小于 2.56 kN/m^2 时,预制底板的挠度变形较小,荷载-挠度曲线呈线性关系,此时构件的刚度较高,构件处于弹性阶段。随着荷载的逐步增加,跨

中区域的挠曲变形开始显著增大,荷载-挠度曲线开始呈现非线性增长,曲线斜率较之于弹性阶段增大,表明构件进入弹塑性阶段。当荷载增加至 7.92 kN/m^2 时,荷载-挠度曲线出现了新的拐点,曲线斜率进一步增大,上弦板跨中出现裂纹,此时构件进入破坏阶段。进一步分析发现,新型桁架体系混凝土板相比于传统钢筋混凝土板,其挠曲变形控制得到大幅提升,从整体受力角度来看,桁架与混凝土板共同工作,形成一个整体的受力体系。根据结构力学原理,桁架通过杆件的轴力传递荷载。新型桁架系统在受弯过程中,桁架的上弦杆主要承受压力,下弦杆主要承受拉力,腹杆则起到传递剪力与协调上、下弦杆受力的作用。新型桁架的存在改变了板内的应力分布,使得板内的应力分布更加均匀,有助于提高预制底板的承载能力与刚度。

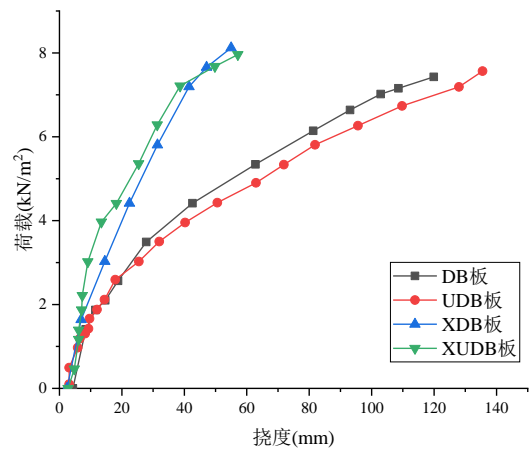


图 15 荷载-挠度曲线

Fig. 15 Load-deflection curves

3.2 钢筋/钢管应力分析

DB 板与 XDB 板的钢筋/钢管应力对比云图如图 16 所示。由图 16 可见,在弹性阶段,XDB 板通过新型桁架显著优化了应力分布,其纵向主筋跨中峰值应力较 DB 板降低 21%,端部应力衰减率由 35% 缩减至 18%,且桁架下弦杆与主筋应力差从 45 MPa 降至 12 MPa,证实了三维应力网格体系的高效荷载分配特性;进入塑性阶段后,XDB 板的纵筋裂缝截面应力梯度较 DB 板降低 68%,同时交叉桁架节点提前参与应力重分配,促使腹杆应力响应与纵筋同步发展,塑性阶段整体应力离散度下降 42%。极限状态下,DB 板呈现“单峰”脆性破坏特征,跨中纵筋应力峰值达 420 MPa,而 XDB 板通过应力多核化分散将最大应力值控制在 350 MPa。

在荷载递增过程中,DB 板纵筋的最大应力集中区始终局限在跨中 $0.3L$ (L 为试件跨度) 范围内,仅占构件总长度的 28.6%,呈现出典型的“局部超

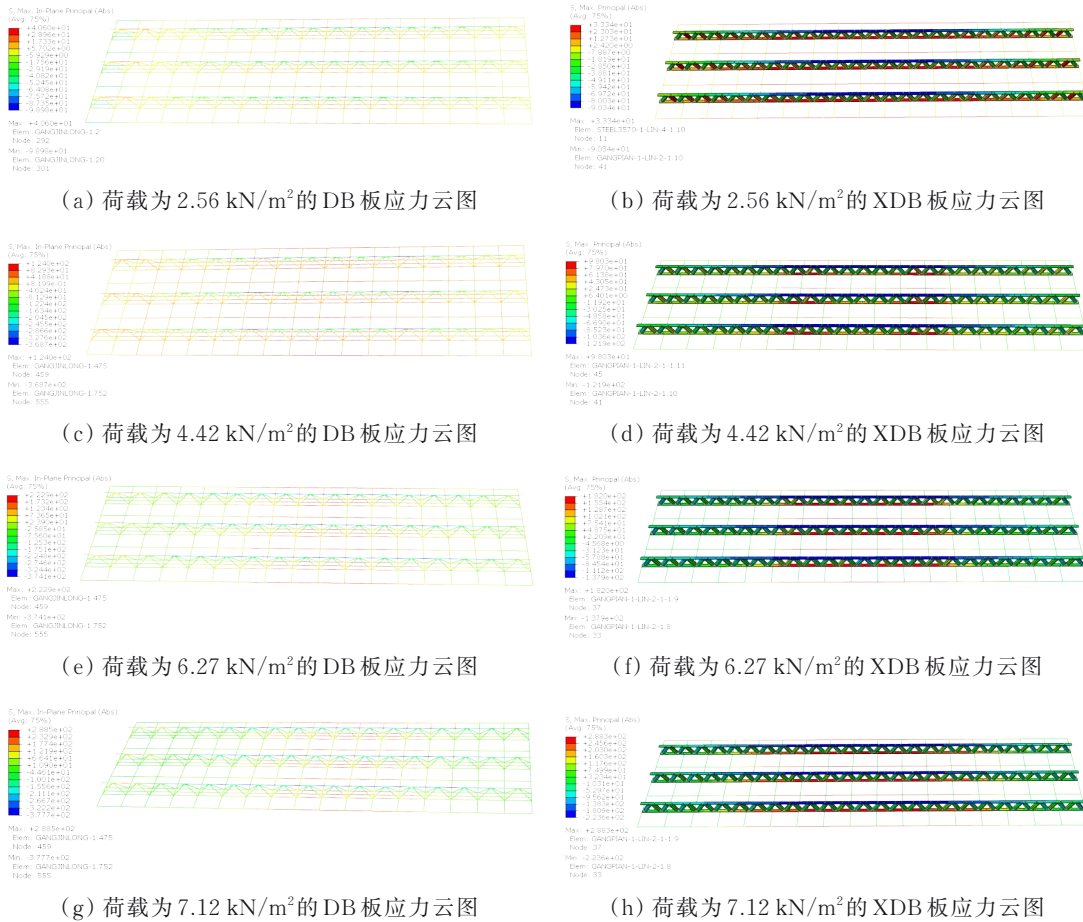


图 16 DB板、XDB板钢筋/钢管应力对比云图

Fig. 16 Stress cloud of DB slab, XDB slab steel truss/ pipe

筋”特征,其应力梯度在跨中至1/4跨度处陡增320 MPa/m,导致跨中纵筋过早屈服而两端锚固区应力水平仅达到设计值的36%;反观XDB板的纵筋最大应力区随荷载发展呈现显著的空间扩展特性:塑性阶段应力集中区为0.35L,进入塑性强化阶段后逐步向支座端延伸,极限状态时高应力区已覆盖试件中部49.5%范围,且沿纵向形成平滑的应力过渡带,梯度值小于85 MPa/m,这种“宽域渐进”的应力分布模式使得XDB板纵筋材料利用率提升至91.7%,而DB板仅为68.4%,避免了传统DB板因应力局部化引发的超筋破坏。XDB板应力云图具有“梯度缓变、多核耗能”的特征,较DB板的“单峰集中、节点弱化”模式显著增强施工阶段力学性能优势,为基于应力云图反馈的预制构件优化及桁架强化设计提供了数据支撑。

3.3 协同作用下塑性累积应变分析

XDB板与XUDB板的等效塑性应变(PEEQT)云图的对比分析如图17所示,图17系统揭示了钢纤维与新型桁架协同作用对塑性应变演化的抑制机制及延性提升机理。在初始荷载阶段,当荷载为2.56 kN/m²时,XDB板已形成两条沿跨中对称分布

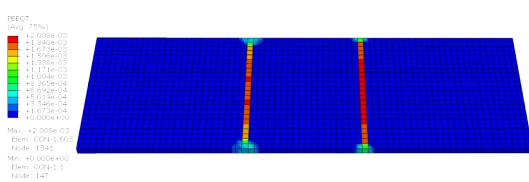
的塑性应变带,而XUDB板仅出现离散的塑性应变点,此时PEEQT小于 1.502×10^{-5} ,表明钢纤维的桥接效应显著延缓了塑性变形的局部化进程。当荷载增至3.49 kN/m²时,XDB板跨中占比面积28%的区域呈现矩形高应变区,其内部形成4条纵向应变带,此时PEEQT小于 3.306×10^{-3} ,边缘应变带强度较中心区域弱18%;与XDB板相比,XUDB板仅在跨中轴线处发育4条主应变带,此时PEEQT小于 2.902×10^{-3} ,且未出现外围扩展,印证了引入钢纤维混凝土对塑性发展的空间约束作用。荷载提升至4.88 kN/m²时,XDB板塑性应变带快速扩展至试件面积的52%,并分化为跨中两侧各6条、对称分布的12条应变带,近长边区域呈现“3”形应变集中特征,此时PEEQT梯度达 2.512×10^{-3} ;而XUDB板仅形成11条应变带,且最大PEEQT值较XDB板降低37%,表明钢纤维通过界面滑移耗能与桁架应力分流协同抑制了塑性应变的累积。进入极限状态后,荷载为6.27~7.92 kN/m²时,XDB板塑性区覆盖率达90%,跨中“3”形应变带贯通并伴随端部应变突增,此时PEEQT为 6.368×10^{-3} ,而XUDB板塑性区扩展至80%,端部

PEEQT 为 4.310×10^{-3} , 跨中 PEEQT 为 2.825×10^{-3} , 呈现“两端高-中心低”的应变分布特征, 与裂缝萌生时序形成空间耦合。通过“纤维桥接-弦板分流”双路径, XUDB 板实现了承载力、延性及损伤可控性的全面提升, 破坏模式从“脆性压溃主导”转型为“梯度缓释-多核耗能”, 显著提升了上弦板的延性及损伤容限, 提高了装配式预制底板在施工阶段的免支撑能力。

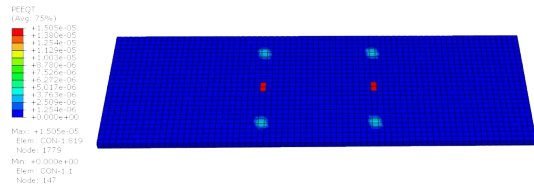
3.4 协同作用下预制底板受拉损伤研究

尽管 XDB 板与 XUDB 板的整体混凝土应力云图均呈现“上弦板受压、底板受拉”的典型受弯特征, 但二者在底板受拉损伤演化规律及损伤分布模式上存在差异。试件 XDB 板与 XUDB 板的受拉损伤云图对比分析如图 18 所示, 图 18 揭示了新型桁

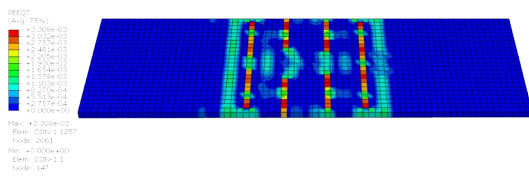
架-纤维协同设计对损伤发展的优化机制。在相同荷载下, 损伤分布空间特性对比, XDB 板明显早于 XUDB 板产生应力损伤。在荷载 4.88 kN/m^2 时, XDB 板跨中心部位呈现 3 个小圈纵向均匀排列, 而 XUDB 板跨中心部位仅有 1 个圈, 其余部分呈现纵向贯通分叉损伤裂缝, 受拉损伤呈现“多核分散”特征。极限状态时, XDB 板底板跨中形成“哑铃形”高损伤区, 最大损伤带沿桁架下弦杆轴线延伸, 长度占比 $0.4L$, 损伤梯度达 0.08 。XUDB 板跨中主损伤区被分割为 3 个亚区, 间距约为 150 mm , 损伤梯度降至 0.05 , 且损伤前沿沿斜向腹杆路径以倾角 35° 扩展。XDB 板和 XUDB 板损伤累积速率差异明显, XDB 板在 8.12 kN/m^2 的极限荷载时, 跨中损伤因子突破 0.92 , 高损伤区面积占比达 72% , 且端部出



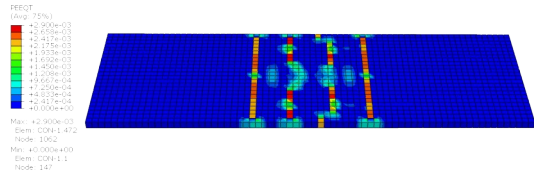
(a) 荷载为 2.56 kN/m^2 的 XDB 板塑性应变云图



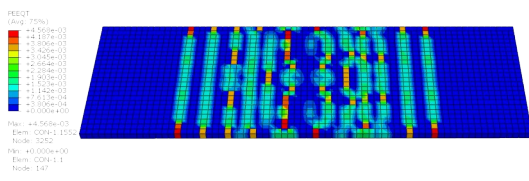
(b) 荷载为 2.56 kN/m^2 的 XUDB 板塑性应变云图



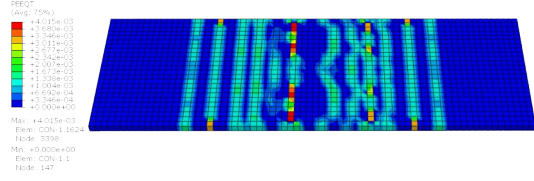
(c) 荷载为 3.49 kN/m^2 的 XDB 板塑性应变云图



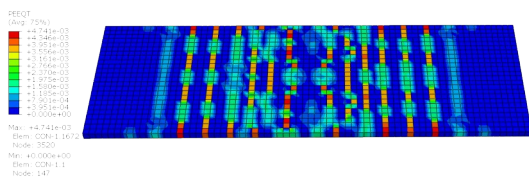
(d) 荷载为 3.49 kN/m^2 的 XUDB 板塑性应变云图



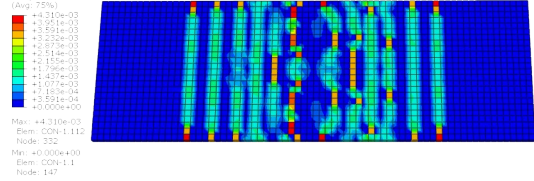
(e) 荷载为 4.88 kN/m^2 的 XDB 板塑性应变云图



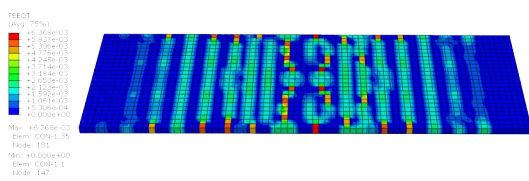
(f) 荷载为 4.88 kN/m^2 的 XUDB 板塑性应变云图



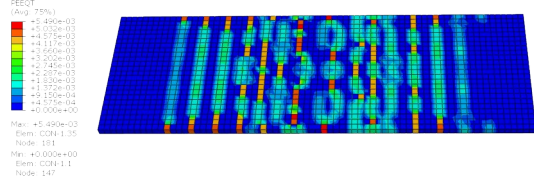
(g) 荷载为 6.27 kN/m^2 的 XDB 板塑性应变云图



(h) 荷载为 6.27 kN/m^2 的 XUDB 板塑性应变云图



(i) 荷载为 7.92 kN/m^2 的 XDB 板塑性应变云图



(j) 荷载为 7.92 kN/m^2 的 XUDB 板塑性应变云图

图 17 XDB 板和 XUDB 板的塑性应变对比云图

Fig. 17 Equivalent plastic cumulative strain cloud for XDB slab, XUDB slab

现局部二次损伤峰,说明新型桁架普通混凝土结构具有应力集中缺陷。XUDB板通过新型桁架节点分流、轴力转移与钢纤维桥接效应,将跨中损伤因子控制在0.78,高损伤区面积占比缩减至55%,能

量耗散密度提升18.4%,且损伤分布均匀性指数提升0.21。较XDB板相比,XUDB板减少集中塑性应变分布群,等效塑性应变(PEEQT)云图显示XUDB板具有“多核协同耗能”特征。

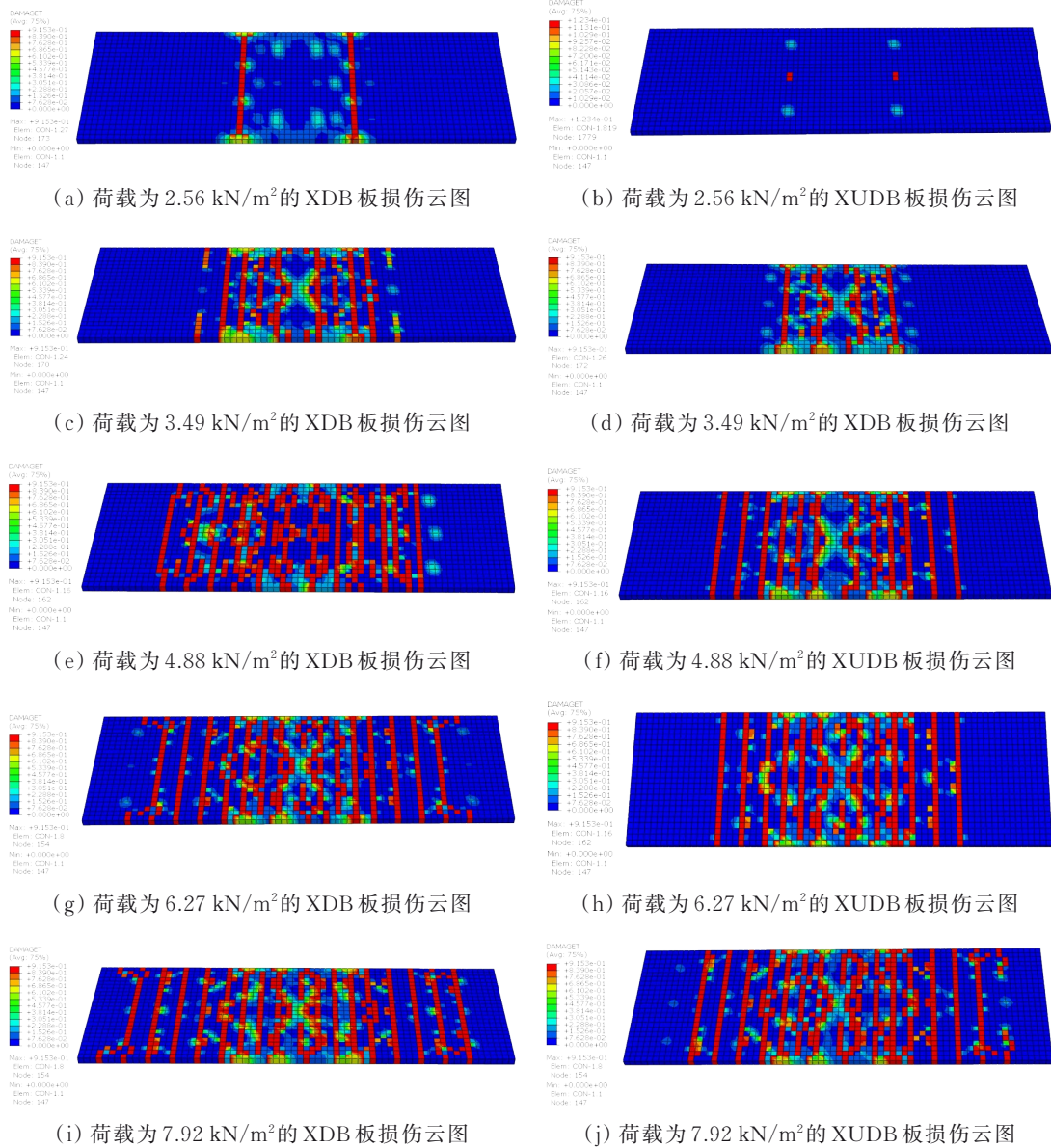


图 18 XDB 和 XUDB 板的受拉损伤对比云图

Fig. 18 Comparative cloud diagram of tensile damage of specimen XDB and XUDB plates

XDB板的受拉损伤云图与裂缝分布的空间耦合系数为0.71,跨中主裂缝对应损伤带宽度偏差达22%,损伤局部化显著,XUDB板受拉损伤协同性增强,底板受拉损伤云图与裂缝分布的空间耦合系数提升至0.92,跨中损伤区面积占比误差小于3%,表明钢纤维桥接效应与桁架应力路径的高度协同。XUDB板的损伤云图与静力试验得到的裂缝路径吻合,主裂缝宽度与损伤带宽度误差低于10%,且次生裂缝沿损伤梯度方向有序分布,验证新型桁架和钢纤维的协同作用下能够提升裂缝-损伤协同演

化机制。XUDB板的优化性能源于双重协同作用,其一为纤维-混凝土界面增强,钢纤维体积率2%使微裂缝发展从“贯通型”转为“枝状分叉”;其二为桁架应力路径优化,钢管腹杆将主拉应力方向偏转12~18°,形成“斜向损伤耗散网”,避免跨中区域过早损伤饱和。并且XUDB板通过损伤分布模式的重构,实现了“跨中损伤延缓-多核耗能协同”的受拉破坏机制,证明XUDB板在施工阶段有效延缓了裂缝的形成,为高抗裂预制构件设计提供了理论依据。

3.5 协同作用下上弦板受压损伤研究

XDB板和XUDB板的上弦板受压损伤对比云图如图19所示。由图19可见,XUDB板的上弦板受压损伤因子峰值控制在0.75,较XDB板降低26.7%,节点区通过应力扩散使损伤梯度降低41%,钢纤维体积率为2%时,压溃区面积缩减至58%,证明了协同设计对上弦板局部压溃的抑制作用。XUDB板损伤分布从XDB板的“哑铃形集中”模式转变为“多核分散”模式,刚度退化速率降低28%,高损伤区面积占比从72%降为54%。特别在荷载6.27~7.92 kN/m²的极限阶段,XUDB板损伤累积速率较XDB板明显降低,跨中压溃区面积降幅

33%,损伤梯度峰值降幅40%。钢纤维体积率2%的桥接效应有效抑制了混凝土微裂缝贯通,使受压区有效承载面积增加17%,同时纤维-基体界面显著缓解局部应力集中。在钢纤维混凝土和新型桁架的协同作用下,XUDB板屈服平台段延长至极限位移的38%,且等效塑性应变分布均匀性显著提升,表明钢纤维与交叉桁架的协同作用通过偏转损伤扩展路径和优化应力扩散机制,将破坏模式从“脆性压溃主导”转型为“梯度缓释-多核耗能”。研究结果证实XUDB板显著提升了上弦板的延性及损伤容限,为XDB板上弦板的局部压溃问题提供了优化方向。

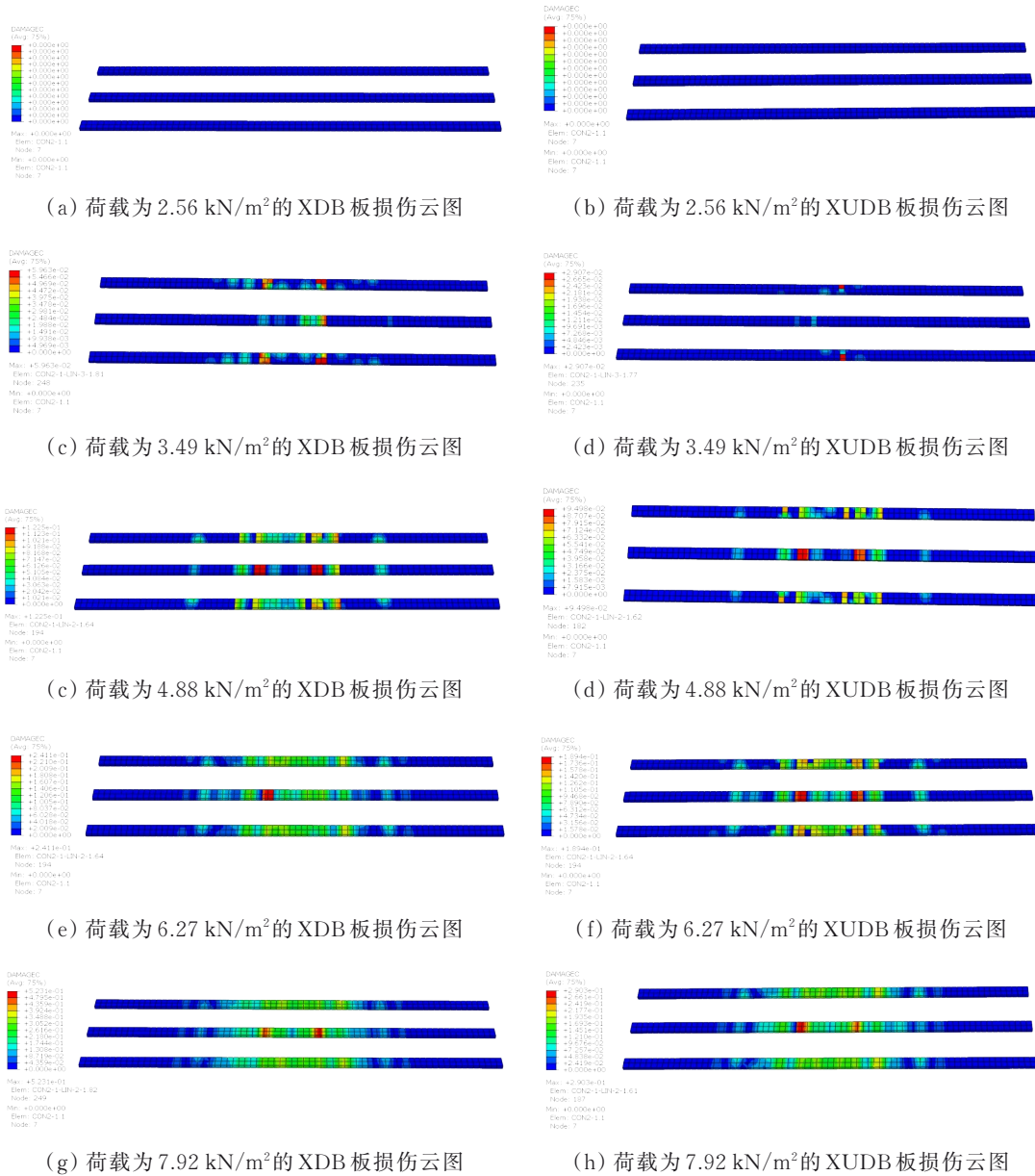


图 19 XDB 板和 XUDB 板的上弦板受压损伤对比云图

Fig. 19 upper chord plate compression damage cloud diagram of XDB slab, XUDB slab

3.6 经济性分析与适用性分析

以单位面积(m²)的直接材料成本为对比基准。

估算基于市场参数与设计假设:C30普通混凝土,500~550元/m³;C30钢纤维混凝土(纤维体积率

2%), 1 550~1 650 元/m³。钢材:传统钢筋桁架(HRB400 成品), 5000~6 000 元/t;新型钢管桁架(Q345B 钢管与钢筋组合), 6500~8 000 元/t。板厚:60 mm, 即每 m² 混凝土用量为 0.06 m³。含钢量:根据设计图纸,传统桁架体系(DB、UDB)用钢量约为 15~18 kg/m²;新型桁架体系(XDB、XUDB)因结构效率更高,用钢量略低,约为 12~15 kg/m²。估算结果见于表 1。需要说明的是,此估算未包含生产、运输、安装等间接费用,且材料价格会随市场、地域及采购规模波动。由表 1 可知,性能最优的 XUDB 板,其直接材料成本约为传统 DB 板的 1.5~1.8 倍。成本增量主要来源于钢纤维的添加,其次为新型钢管桁架体系。这印证了“高性能往往伴随高初始成本”的普遍规律。

尽管 XUDB 板材料成本较高,但其带来的综合效益可在大幅提升的性能与节约的施工成本中找到平衡点,XUDB 板卓越的免支撑能力,可大幅减少甚至取消临时支撑。这不仅节省了支撑材料租赁、搭拆的人工与时间成本,更关键的是极大简化了现场作业,缩短了主体施工周期。对于城市核心区改造、抢险救灾工程或工期极度紧张的商业项目,所节约的时间成本与施工措施费可以平衡其材料成本的增加。

对于力学性能有特殊要求的建筑部位,XUDB 板提供了一站式解决方案。其高承载力和高刚度,可在满足变形要求的前提下实现更大净跨,或减少次梁设置,优化建筑空间与结构布局。在地下室外墙、清水混凝土建筑、对裂缝敏感的精密仪器车间等,XUDB 板能有效抑制裂缝与损伤发展,提升耐久性与使用品质。同时,“梯度缓释-多核耗能”的破坏模式提供了更高的延性和韧性安全储备。

在建筑全生命周期评价体系下,XUDB 板优异的耐久性和低维护需求,可显著降低后期维修加固的成本与风险,对于设计使用年限长、运营重要的公共基础设施具有长期经济性。

4 结论

开展了新型桁架钢纤维混凝土叠合板的受力性能有限元分析与协同机制研究,提出并验证了基于“材料-结构”协同设计的装配式构件增强新路径。主要结论如下:

1) 新型桁架钢纤维混凝土叠合板通过“纤维桥接-桁架分流”双重增强机制,在有效降低材料应力集中、减少裂缝扩展的同时,显著提高构件的材料利用率至 91.7%。这一机制转变了传统“脆性压溃”的破坏模式,使构件破坏由“脆性压溃”转为“梯

度缓释-多核耗能”,显著提升了构件的延性。

2) XUDB 板的协同设计显著增强了其施工阶段的免支撑能力,跨中压溃区面积减少 33%,刚度退化速率降低 28%。这表明,XUDB 板具备较传统叠合板更高的承载能力和施工便捷性,适用于快速建设的需求。

3) 在高性能混凝土材料和创新桁架结构的应用上,XUDB 板的研究成果可以为装配式建筑的快速施工提供支持,尤其在减少临时支撑和缩短施工周期方面具有广泛的应用前景。

研究中的有限元模型虽然充分考虑了各部件的相互作用,但在实际工程中,可能还需要根据更为复杂的工况进行进一步验证;尽管提出了新型桁架钢纤维混凝土叠合板的设计方案,但其制造成本明显高于传统钢筋桁架混凝土预制底板,在成本-效益平衡方面未体现出明显优势,后续工作可在该方面进行设计优化,为新型桁架钢纤维混凝土预制底板的大规模应用提供可能性。

参考文献

- [1] Wu X C, Han J Y, Cui H L, et al. A comparative review of recent research progress in prefabricated buildings in China and other countries [J]. *Buildings*, 2024, 14 (4): 1062.
- [2] Li C Z, Tam V W, Hu M C, et al. Lean construction management: A catalyst for evaluating and enhancing prefabricated building project performance in China [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 94: 109930.
- [3] Wang H, Liu X G, Yue Q R, et al. Longitudinal shear behavior and design method of UHPC connection for prefabricated slabs in composite beams [J]. *Engineering Structures*, 2023, 277: 115386.
- [4] Xu A Y, Zhu Y Y, Wang Z P, et al. Carbon emission calculation of prefabricated concrete composite slabs during the production and construction stages [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 80: 107936.
- [5] Xu H J, Kim J I, Chen J Y. Improved framework for estimating carbon emissions from prefabricated buildings during the construction stage: Life cycle assessment and case study [J]. *Building and Environment*, 2025, 272: 112599.
- [6] 张玉明, 陈丽洁, 邓馨雨, 等. 预应力混凝土钢管桁架叠合板施工阶段性能分析研究[J]. *建筑技术*, 2023, 54 (11): 1354-1358.
Zhang Y M, Chen L J, Deng X Y, et al. Performance analysis of prestressed concrete steel pipe truss composite plate during construction stage [J]. *Architecture Technology*, 2023, 54(11): 1354-1358. (in Chinese)
- [7] 冯鑫, 陈明, 田志昌. 混凝土叠合板分类及研究综述

- [J]. 建筑结构, 2024, 54(1): 138-144.
Feng X, Chen M, Tian Z C. Summary of classification and research on concrete composite slab [J]. Building Structure, 2024, 54(1): 138-144. (in Chinese)
- [8] 严志浩. 装配式建筑设计及施工在实际工程项目中的应用现状及发展思路[J/OL]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(28): 91-93.
Yan Z H. Application status and development ideas of prefabricated building design and construction in practical engineering projects [J/OL]. Theoretical Research in Urban Construction, 2024(28): 91-93. (in Chinese)
- [9] Zhang H, Wang R X, Chen L, et al. Full-scale testing and stability analysis of prefabricated steel plate-concrete composite walls in underground granaries [J]. Buildings, 2025, 15(4): 561.
- [10] Zhang X, Liu Q K, Xiao W W, et al. Seismic performance of U-shaped connection for prefabricated steel plate shear wall [J]. Buildings, 2024, 14(1): 282.
- [11] Liu J M, Bao Y M, Qin K. Experimental and finite element analysis on the structural performance of lightweight hollow slab prefabricated staircases [J]. Buildings, 2025, 15(2): 245.
- [12] Jin J Y, Hu W C, Zheng F Y, et al. Experimental and numerical studies on the mechanical behavior of a novel bidirectional, prestressed, prefabricated, composite hollow-core slab [J]. Buildings, 2025, 15(2): 232.
- [13] Liu H, Zainul Abidin N. A review on research of prefabricated building costs: Exploring collaborations, intellectual basis, and research trends [J]. Sustainability, 2024, 16(22): 9823.
- [14] 李隆邳, 王晓锋, 赵广军, 等. 预应力混凝土叠合板免支撑底板挠度控制研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(4): 132-136.
Li L Z, Wang X F, Zhao G J, et al. Research on deflection control of prestressed concrete composite slab without support floor [J]. Construction Technology, 2025, 54(4): 132-136. (in Chinese)
- [15] Yang C, Chen H, Ou J P. Seismic behavior of composite bolted T-shaped exterior joints in modular steel construction [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 212: 108249.
- [16] Ma S C, Lou Y Y, Bao P. Experimental study of bending resistance of pre-fabricated truss beams under eccentric loads [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 49: 104119.
- [17] Zhang K, Zhou M, Zhang B Q, et al. Experimental and numerical study of the flexural performance of spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete laminated slab [J]. Buildings, 2023, 13(7): 1718.
- [18] Jhatial A A, Sohu S, et al. Effect of steel fibres on the compressive and flexural strength of concrete [J]. International Journal of Advanced and Applied Sciences, 2018, 5(10): 16-21.
- [19] 恽燕春, 陈鹏, 王柏生, 等. 密拼叠合楼板受力性能研究[J]. 施工技术, 2018, 47(12): 75-79, 129.
Yun Y C, Chen P, Wang B S, et al. Study on mechanical properties of joints between composite floor slabs [J]. Construction Technology, 2018, 47(12): 75-79, 129. (in Chinese)
- [20] 李浩东. 装配式H型钢—混凝土组合梁力学性能研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2023.
Li H D. Study on mechanical properties of prefabricated H-shaped steel and concrete composite beams [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2023. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 王文超, 彭亚萍, 恽燕春, 等. 碳纤维增强复材-混凝土密拼双向叠合楼板抗弯承载能力分析[J]. 工业建筑, 2019, 49(9): 75-81, 101.
Wang W C, Peng Y P, Yun Y C, et al. Analysis of flexural capacity of CFRP-concrete and two-way composite floor slab connected without gap [J]. Industrial Construction, 2019, 49(9): 75-81, 101. (in Chinese)
- [23] 彭亚萍, 王文超, 金鹏, 等. 碳纤维增强复材-混凝土密拼双向叠合楼板静载试验研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(1): 205-210.
Peng Y P, Wang W C, Jin P, et al. Experimental research on CFRP-concrete two-way composite floor slab connected without gap under static load [J]. Industrial Construction, 2022, 52(1): 205-210. (in Chinese)
- [24] Lu L F, Ding Y Z, Guo Y, et al. Flexural performance and design method of the prefabricated RAC composite slab [J]. Structures, 2022, 38: 572-584.
- [25] Lárússon L H, Fischer G, Jönsson J. Prefabricated floor panels composed of fiber reinforced concrete and a steel substructure [J]. Engineering Structures, 2013, 46: 104-115.
- [26] 黄炜, 罗斌, 李斌, 等. 不同构造形式绿色混凝土叠合板受弯性能试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(7): 35-44.
Huang W, Luo B, Li B, et al. Experiment on flexural behavior of green concrete composite slab with different structural forms [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(7): 35-44. (in Chinese)
- [27] 曹立染. 大跨度钢管桁架预应力混凝土预制底板力学性能研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.
Cao L R. Study on mechanical properties of prestressed concrete floor of long span steel tube truss [D]. Hefei:

- Anhui Jianzhu University, 2024. (in Chinese)
- [28] 赵发伟, 张敬书, 帅磊, 等. 钢-混凝土组合预制底板受力性能的数值分析[J]. 混凝土, 2025(2): 138-144.
Zhao F W, Zhang J S, Shuai L, et al. Numerical analysis of mechanical behavior of precast steel-concrete composite panels [J]. Concrete, 2025(2): 138-144. (in Chinese)
- [29] Rots J G, de Borst R. Analysis of mixed-mode fracture in concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1987, 113(11): 1739-1758.
- [30] Fan X Q, Liu S, Ge F. Fracture properties of early-age concrete based on digital image correlation technique [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2025, 315: 110847.

(编辑 XXX)