

钢-钢纤维混凝土组合桥面板偏心受拉性能

徐晨¹, 徐艺¹, 励晓峰², 侯哲豪¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 为探究钢-钢纤维混凝土(SFRC)组合桥面板在主梁体系下的偏拉力学特征, 分别设计制作了1个普通混凝土组合桥面板和1个SFRC组合桥面板试件进行偏拉试验, 并引入材料塑性损伤模型进行有限元模拟, 考察了偏拉荷载作用下SFRC对组合桥面板破坏形态、刚度折减、应变分布等力学性能的影响规律。试验及数值分析结果表明, 相比普通混凝土, SFRC受拉裂缝数量多但宽度小; 通过观测钢筋应变发展及分布可知, 由于SFRC具有拉伸硬化特性, 在开裂后仍能继续承担外部荷载; SFRC开裂后, 其对组合板轴向抗拉刚度与侧向抗弯刚度贡献明显大于普通混凝土; 当最大裂缝宽度分别为0.10和0.20 mm时, SFRC对组合板的轴向抗拉刚度贡献为36%和22%, 普通混凝土仅为15%和11%; SFRC对组合板的侧向抗弯刚度贡献为41%和27%, 普通混凝土仅为29%和17%, 表明SFRC开裂后仍可考虑其对组合桥面板刚度贡献。此外, 结合理论推导分析了组合板在钢结构全截面屈服时的承载力, 结果表明, SFRC和普通混凝土对组合桥面板极限承载力贡献不显著。

关键词: 主梁体系; 钢纤维混凝土; 组合桥面板; 偏心受拉; 刚度变化

中图分类号: U443.32

文献标志码: A

Eccentric Tensile Behavior of Steel-Steel Fiber Reinforced Concrete Composite Bridge Deck

XU Chen¹, XU Yi¹, LI Xiaofeng², HOU Zhehao¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical characteristics of steel-steel fiber reinforced concrete (SFRC) composite deck under eccentric tension load in the main girder system, eccentric tension tests of normal concrete composite bridge deck and SFRC composite

bridge deck specimens, together with finite element analyses based on the plastic damage model of materials were executed. The influence of SFRC on failure form, stiffness reduction and strain distribution of composite bridge deck under eccentric tension load were investigated. The test and numerical analysis results showed that, compared with normal concrete, SFRC presented characteristics of more cracks but smaller crack width during the development of tensile cracks. By observing the strain development and distribution of reinforcements, SFRC could continue to bear external load after cracking due to its tensile hardening property. After cracking, the contribution of SFRC to axial tensile stiffness and lateral bending stiffness of composite deck was significantly greater than that of normal concrete. When the maximum crack width was 0.10 mm and 0.20 mm, respectively, the contribution of SFRC to axial tensile stiffness of composite deck was 36% and 22%, while that of normal concrete was only 15% and 11%; the contribution of SFRC to lateral bending stiffness of composite deck was 41% and 27%, while that of normal concrete was only 29% and 17%. In addition, combined with theoretical derivation, the ultimate bearing capacity of composite deck under full section yield of steel was analyzed. The results showed that the contribution of SFRC and normal concrete to ultimate bearing capacity of composite deck was not significant.

Key words: main girder system; steel fiber reinforced concrete (SFRC); composite bridge deck; eccentric tension; Stiffness change

钢纤维混凝土(steel fiber reinforced concrete, SFRC)在基材中掺入钢纤维, 可抑制混凝土内部微裂缝发展, 具有良好的大应变拉伸硬化特性。其按

收稿日期: 2021-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(51978501)

第一作者: 徐晨(1982—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢与组合结构桥梁功能复合材料的开发与应用。E-mail: xuchenprc@tongji.edu.cn

通信作者: 励晓峰(1966—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为桥梁设计。E-mail: 673885865@qq.com



论文
拓展
介绍

抗压强度可分为普通强度、高强度及超高强度3个等级,强度差异将影响材料力学性能与制备成本。将SFRC与钢桥面板连接形成组合桥面板可有效改善钢桥面板疲劳开裂及铺装层病害问题^[1-2],合理利用SFRC组合桥面板力学特性是优化桥梁结构受力与经济性的可行手段。

组合桥面板中混凝土层开裂是影响其设计使用的关键问题,而SFRC良好的抗裂特性可有效改善其开裂现象。曾明根等^[3]开展了C60和SFRC组合桥面板负弯对比试验,发现SFRC组合桥面板开裂荷载显著提高,开裂范围较小,且在极限荷载水平下仍具有较好延性。吴美艳等^[4]通过超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)组合桥面板静力弯曲试验,发现极限状态下UHPC裂缝宽度未超过0.15 mm,钢结构屈服时UHPC未严重损坏。李文光等^[5]和Luo等^[6-7]开展了大量钢-UHPC组合桥面板静力弯曲试验,发现UHPC裂缝发展呈细密特征,裂缝宽度与荷载呈线性关系。苏庆田等^[8-9]通过组合桥面板静力受弯试验,提出了一种考虑SFRC裂后残余应力的裂缝宽度计算方法。可见钢纤维混凝土组合桥面板裂后仍具有良好受力性能。

主梁体系下,负弯矩区SFRC组合桥面板受力与偏拉状态类似,已有研究多关注组合桥面板在桥面体系下的受力特性,对其在主梁体系中的力学性能研究较少。史占崇等^[10]研究了SFRC组合桥面板在轴拉荷载作用下的抗裂特性,但并未深入分析结构裂后受力性能。组合桥面板由拉弯荷载引起开裂与刚度下降将显著影响其力学性能,导致实际设计中难以考虑其对主梁受力贡献,不仅对结构经济性不利,还可能使结构存在安全隐

患。此外,在市政桥梁中使用UHPC材料成本较高,普通及高强SFRC具有更好的工程适用性。因此,研究偏拉荷载作用下SFRC组合桥面板受力特性对合理评估结构受力、提高结构经济性具有重大意义。

为探究偏拉荷载作用下SFRC组合桥面板受力特性,本文基于车道荷载作用下主梁负弯矩区组合桥面板截面应变分布与其在偏拉荷载作用下相似的特点,设计制作了1个普通混凝土组合板元试件和1个SFRC组合板元试件进行偏拉试验,同时引入材料塑性损伤模型进行有限元分析,以考察偏拉荷载作用下SFRC对组合桥面板受力特性的影响规律,为优化桥面体系及主梁结构提供基础。

1 试验设计

1.1 试件设计

参照某组合桥面板钢箱梁设计参数,设计制作2个组合桥面板元试件进行偏心受拉试验研究。试件构造如图1所示,试件全长1 600 mm,有效长度1 000 mm,宽240 mm,截面高242 mm。混凝土板厚80 mm,钢盖板厚12 mm,肋高150 mm、厚12 mm。混凝土板中配有直径10 mm、间距100 mm的纵横向绑扎钢筋网,横向钢筋布于上层,保护层厚度为35 mm。试件中焊钉直径13 mm,高60 mm,纵横向间距均为100 mm。试件两端板厚30 mm,用于连接地锚与分配梁。开孔板与端板和钢盖板焊接,并嵌入混凝土板中穿过钢筋,保证组合板元全截面受力稳定。两试件混凝土板分别采用C50混凝土与SFRC,对应试件编号DTN与DTF。混凝土浇筑完成后常温养护。

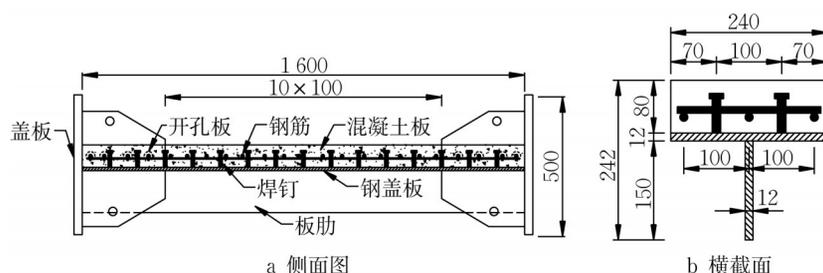


图1 试件构造示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of specimen (unit: mm)

通过建立有限元模型分析组合桥面板钢箱梁负弯矩区组合桥面板截面应变分布与不同偏心距下组合板元截面应变分布特点,多次试算得出当偏心距 e

设为15 mm时,两者在弹性阶段截面应变分布与发展特点基本一致。基于此,设置端板中心相对组合板元截面形心向混凝土侧偏移15 mm以模拟主梁中

组合桥面板的偏心受拉状态。

1.2 材料力学性能

表1列出按照标准试验方法^[11-12]测得的养护龄期28 d C50和SFRC材性结果。本文所采用的SFRC由相关工程项目提供,主要由水泥、河沙、石英砂、碎石、掺和料、外加剂、钢纤维等组成,钢纤维

体积掺量为1.0%。采用哑铃型试件对SFRC进行轴拉试验,测得轴拉应力-应变曲线如图2所示,可见SFRC具有大应变拉伸硬化特性。按标准试验方法^[13]测得钢板屈服强度和极限强度分别为328和485 MPa,钢筋屈服强度和极限强度分别为528和667 MPa,焊钉抗拉极限强度为520 MPa。

表1 混凝土材性试验结果

Tab.1 Material property test results

种类	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	抗折强度/MPa	抗拉强度/MPa
C50	51.4	40.0	45 100	5.3	3.2
SFRC	85.0	70.3	38 733	16.0	4.3

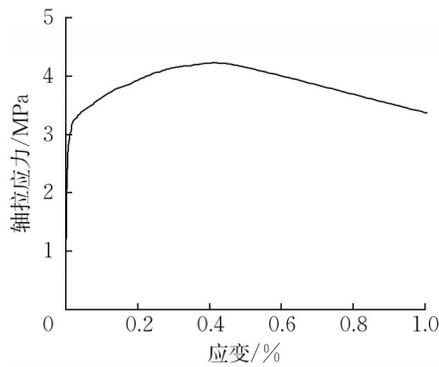
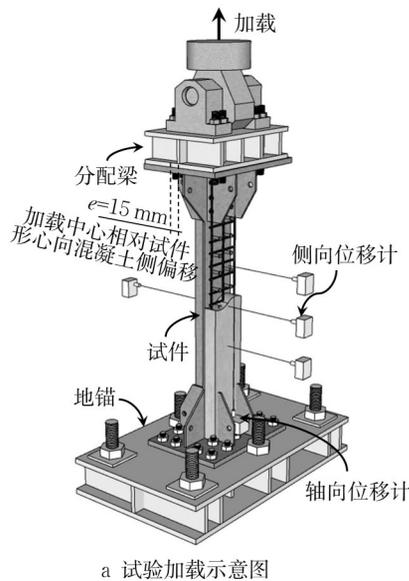


图2 SFRC轴拉应力-应变曲线

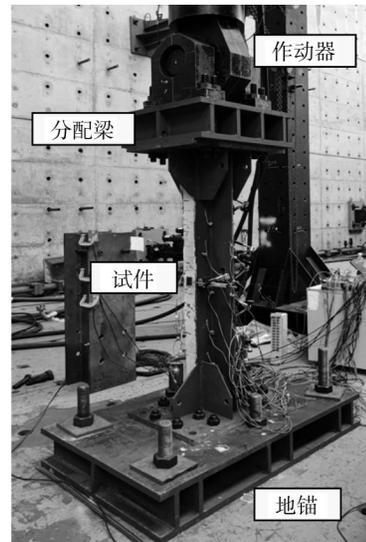
Fig.2 Uniaxial tensile stress-strain curve of SFRC

1.3 加载方案与测点布置

试验加载方式如图3a所示。加载时试件顶部端板通过长螺杆与分配梁和作动器连接,作动器带动分配梁和试件共同变形,对试件均匀加载;底部端板通过长螺杆与地锚连接。试件底部固接,顶部作动器自带铰装置,允许试件在受弯平面内转动。图3b为试件加载现场照片。正式加载前,进行一次100 kN预加载预紧试件及工装。正式加载时以100 kN为一级荷载增量分级单调加载,每级荷载持荷3~5 min记录裂缝发展情况。当荷载达到1 400 kN时采用位移控制加载至试件破坏。



a 试验加载示意图



b 试验加载现场

图3 试验加载方式

Fig.3 Test loading method

试件测点布置如图4所示,包括试件轴向位移(D1)、侧向变形(D2~D5)、界面滑移、钢筋应变等。试验全程对混凝土板裂缝发展及宽度进行记录。

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态

试件极限形态如图5所示。DTN与DTF试件

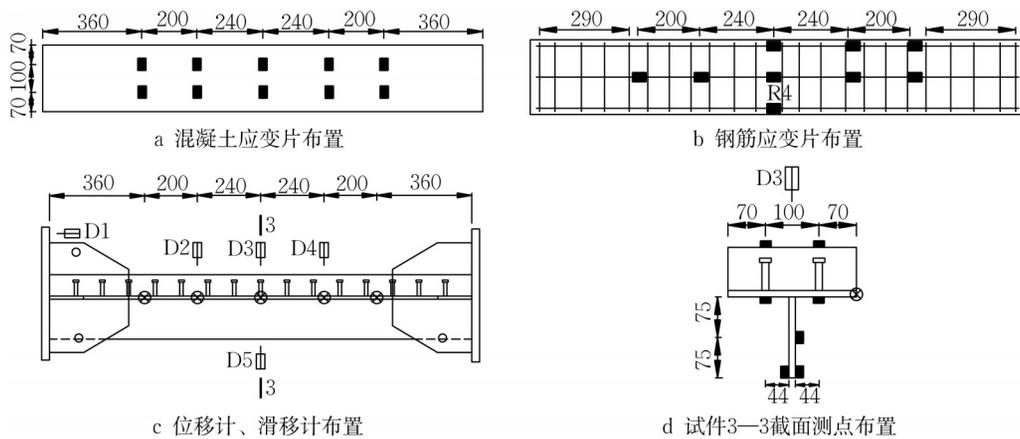


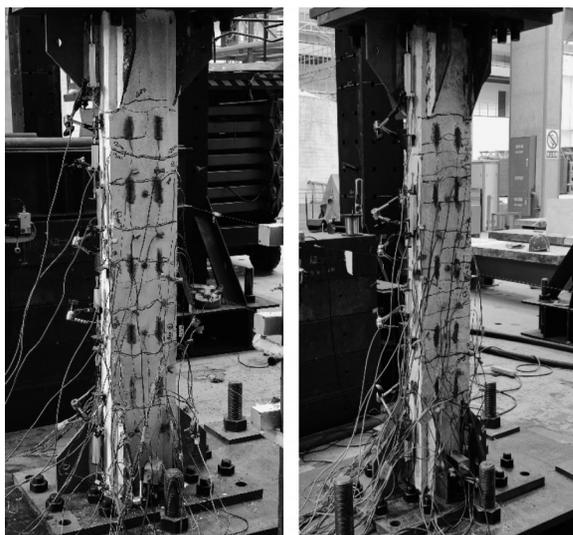
图4 测点布置示意图(单位:mm)

Fig.4 Layout of sensors (Unit: mm)

最终破坏时均表现为混凝土开裂、钢结构全截面屈服。DTN试件中混凝土板上出现几条主裂缝和部分微裂缝,主裂缝宽度较大,分布密度较小;DTF试件中SFRC出现多条主裂缝,主裂缝宽度较小,分布密度较大。SFRC中钢纤维限制了主裂缝宽度发展,但使其余位置不断生成新的裂缝。

受荷载是DTN试件开裂至0.20 mm时的2.25倍。作动器荷载达到峰值时,DTN试件与DTF试件最大裂缝宽度分别为2.10 mm和1.29 mm。

选取3—3截面钢筋应变片R4的实测数据做荷载-钢筋应变曲线如图8a所示。DTN试件开裂后钢筋应变发展明显加快,荷载为400 kN时其应变达到 $1\ 000\times 10^{-6}$;DTF试件钢筋应变在开裂前后发展平缓,加载至700 kN时其应变达到 $1\ 000\times 10^{-6}$,是DTN试件所受荷载的1.75倍。图8b展示了3个荷载等级下两试件中部纵向钢筋应变沿试件高度分布情况,可见,随着荷载增加,DTN试件钢筋中部应变远大于端部,DTF试件钢筋整体受力比DTN试件更加均匀,这与SFRC裂后拉伸硬化持荷特性是一致的。



a DTN试件 b DTF试件

图5 试件极限状态

Fig.5 Ultimate status of specimens

2.2 开裂特性与钢筋应变

图6为两试件在不同荷载等级下和最终破坏时裂缝分布情况。图7为荷载-最大裂缝宽度曲线。DTN试件前期裂缝发展较快,加载至400 kN时产生大量主裂缝,裂缝分布稀疏。DTF试件在每级荷载下均有新裂缝产生,裂缝分布密集。此外,当DTN试件开裂至0.20 mm时,DTF试件最大裂缝宽度仅为0.08 mm;当DTF试件开裂至0.21 mm时,其所

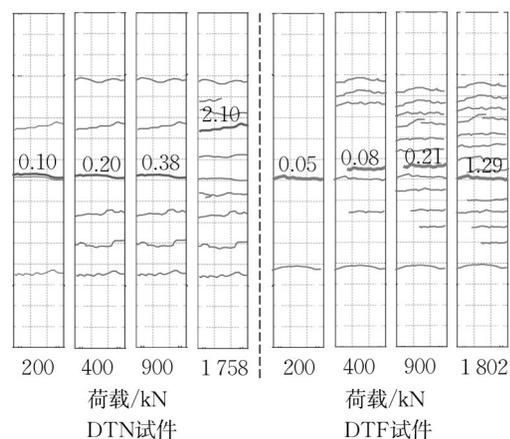


图6 不同荷载下混凝土裂缝宽度(单位:mm)

Fig.6 Development of concrete cracks(unit:mm)

2.3 试件变形与刚度

2.3.1 荷载-位移曲线

图9a和图9b所示为试件荷载-轴向位移曲线和

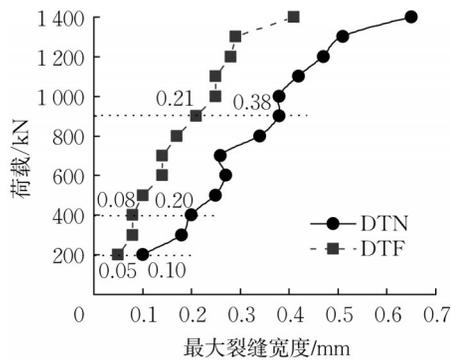
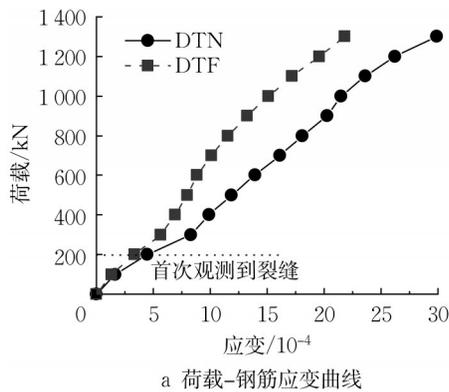
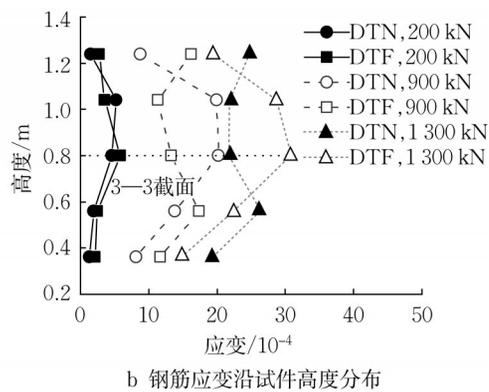


图7 荷载-最大裂缝宽度曲线

Fig.7 Load-maximum crack width curves



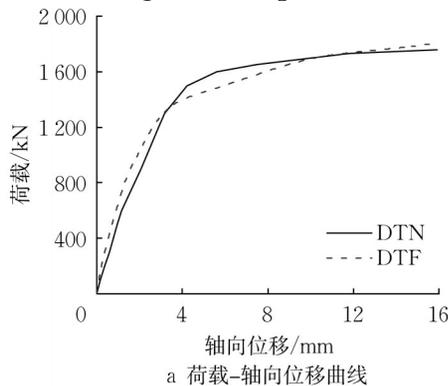
a 荷载-钢筋应变曲线



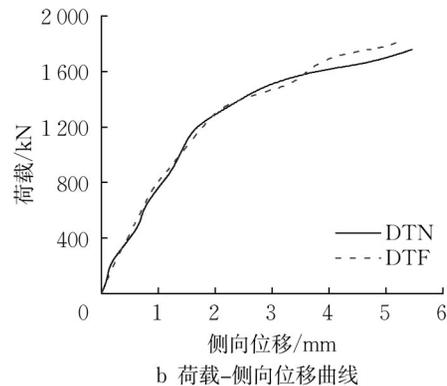
b 钢筋应变沿试件高度分布

图8 钢筋应变发展及分布

Fig.8 Development and distribution of reinforcement strain



a 荷载-轴向位移曲线



b 荷载-侧向位移曲线

图9 试件荷载-位移曲线

Fig.9 Load-displacement curves of specimens

2.3.2 轴向抗拉刚度

对比如图9a所示试件变形过程,在加载至1200 kN前,DTF试件轴向位移明显小于DTN试件,侧向位移与DTN试件基本一致,这表明SFRC相比普通混凝土更有利于抵抗组合桥面板轴向变形。

定义荷载-轴向位移曲线上的点的割线斜率为试件轴向抗拉刚度。表2列出了试件弹性状态、裂缝宽度达0.10、0.20 mm时的轴向抗拉刚度 K_0 、 K_1 、 K_2 ,弹性状态为混凝土未开裂时状态。同时计算

荷载-侧向位移曲线。荷载取作动器荷载值,轴向位移取D1测点数据,侧向位移取D3和D5测点数据平均值。由图9可见,两试件荷载-位移曲线斜率均在1200 kN后明显减小,1600 kN后趋于平缓,结合应变测量数据,上述荷载等级分别对应钢盖板屈服与全截面屈服。此外,根据试验结果,DTN和DTF试件作动器峰值荷载分别为1758 kN和1802 kN。由此可见两试件在以上3种状态下所受荷载基本一致,即表明在偏拉荷载作用下,组合桥面板承载能力由钢结构受拉屈服控制,混凝土板对其极限承载力无明显影响。

DTN与DTF试件弹性轴向抗拉刚度理论值分别为1041.0、965.0 $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。DTF试件弹性轴向抗拉刚度与理论值吻合较好,由于试验时C50混凝土开裂较早,未测得其初始开裂相关数据,因此DTN试件弹性轴向抗拉刚度以理论值代替。

由表2可知,当裂缝宽度分别达0.10和0.20 mm时,DTF试件轴向抗拉刚度比DTN试件高出39%与13%。与弹性轴向抗拉刚度理论值相比,DTN与DTF试件开裂至0.10 mm时轴向抗拉刚度

分别降低了49%与24%,开裂至0.2 mm时分别降低了51%与40%。以上现象表明,相比于C50混凝土,SFRC不仅能显著提高试件轴向抗拉刚度,还使

其下降速率明显减慢。SFRC在开裂后较长时期仍可继续承载并抵抗试件轴向变形,对试件轴向抗拉刚度产生贡献。

表2 试件轴向抗拉刚度

Tab.2 Uniaxial tensile stiffness of specimens

试件编号	$K_0/(kN \cdot mm^{-1})$	$K_1/(kN \cdot mm^{-1})$	$K_2/(kN \cdot mm^{-1})$
DTN	1 041.0*	530.2	515.4
DTF	968.1	735.6	583.5

注:*代表理论值。

2.3.3 侧向变形

图10展示了不同荷载等级下试件侧向位移沿长度分布情况。试件两端侧向位移取D2、D4位移计数据,试件中部侧向位移取D3、D5位移计数据平

均值。DTN试件只在中部挠曲严重,两端变形较小,而DTF试件侧向位移在不同位置差值较小,变形更平滑。这说明SFRC在开裂后仍具有较好的整体变形能力,可全试验段抵抗结构侧向变形。

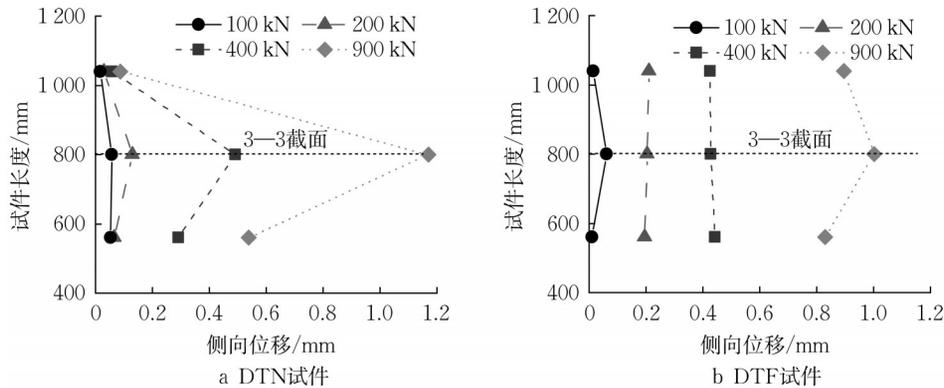


图10 试件侧向位移发展

Fig.10 Development of lateral displacement of specimens

2.4 截面应变分布

图11为不同荷载等级下试件3—3截面应变分布。应变取3—3截面应变片实测数据,截面高度0和150 mm分别代表板肋和钢盖板底部。可见两试件均为全截面受拉,钢盖板应变大于板肋底缘应变,与主梁体系下桥面板偏拉受力特征一致。由于DTF试件在制造或安装过程可能存在一定偏差,

导致其截面中部所测应变受横向弯矩影响而偏大(盖板及板肋底部取两侧应变平均值减弱了该影响)。因此将100 kN下所测盖板与板肋应变值代入式(1)计算截面偏心距,可得DTN和DTF试件偏心距分别为11.6和12.0 mm,与试验设计15.0 mm偏心距相差较小,说明试验中试件偏心受力状态良好。

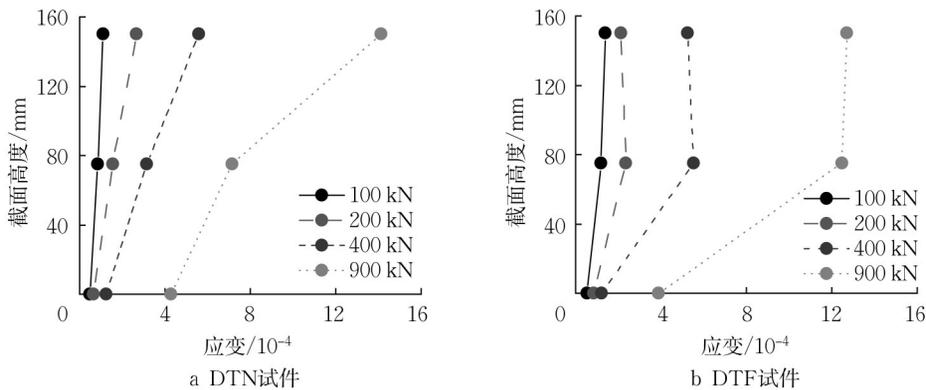


图11 试件3—3截面应变分布

Fig.11 Strain distribution of section 3-3 of specimens

$$\begin{cases} \sigma_{\text{top}} = \frac{F}{A_{\text{eq}}} + \frac{Fey_{\text{top}}}{I_{\text{eq}}} \\ \sigma_{\text{bot}} = \frac{F}{A_{\text{eq}}} - \frac{Fey_{\text{bot}}}{I_{\text{eq}}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_{top} 为钢盖板应力; σ_{bot} 为板肋底部应力; F 为偏拉力; e 为偏心距; y_{top} 为钢盖板到截面形心距离; y_{bot} 为板肋底部到截面形心距离; A_{eq} 为等效截面面积; I_{eq} 为未开裂截面等效惯性矩。

3 有限元模拟

为进一步研究组合桥面板在偏拉荷载作用下的力学特征,引入材料塑性损伤本构对组合板元偏拉试验进行有限元模拟,分析了组合板元模型变形及损伤发展特征,并与试验结果和理论解进行对比,总结了SFRC对组合桥面板开裂特性、刚度折减、极限承载力的影响规律。

3.1 有限元模型建立

3.1.1 模型组成

采用ABAQUS软件按1.1节所述试件尺寸建立组合板元有限元模型,图12所示为模型各部件与对应模拟单元。表3列出了模型与试件对应关系,其中DTS-M为仅考虑钢结构部件的有限元模型,以探究SFRC对组合桥面板受力贡献。

模型中钢筋耦合在混凝土板中。在组合界面、端板与工装接触面均设置了“面-面接触”,切向摩擦系数取0.3,法向设为“硬接触”。模型采用位移加载方式,在分配梁顶面形心设置刚臂并与分配梁顶面耦合,在刚臂顶点施加轴向位移荷载。地锚底面设

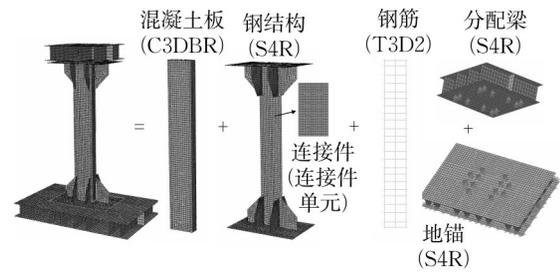


图12 有限元模型示意图

Fig.12 Schematic diagram of finite element model

表3 有限元模型信息

Tab.3 Finite element model information

模型编号	对应试件编号	混凝土材料
DTN-M	DTN试件	C50
DTF-M	DTF试件	SFRC85
DTS-M		纯钢结构件

置固端约束。

3.1.2 材料本构

结合材性试验结果和文献[14-15],图13为模型中C50混凝土和SFRC的材料本构曲线,其中SFRC轴拉应力-应变曲线为材性试验所得。模型中引入混凝土塑性损伤本构,其中非弹性应变根据公式(2)在应力-应变曲线基础上计算,损伤因子根据公式(3)^[16-17]计算。

$$\epsilon_{\text{in}} = \epsilon - \sigma/E \quad (2)$$

$$d = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E\epsilon}} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: ϵ_{in} 为非弹性应变; ϵ 为应变; σ 为应力; E 为弹性模量; d 为损伤因子。

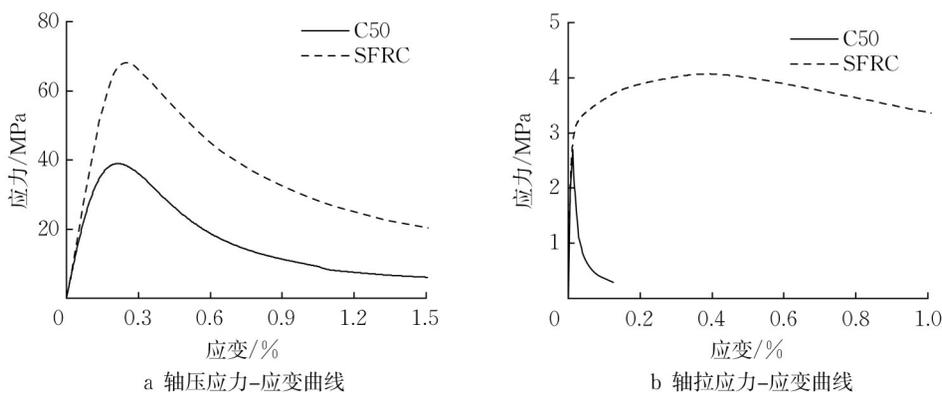


图13 C50混凝土和SFRC本构曲线

Fig.13 Constitutive curves of C50 concrete and SFRC

参考材性试验结果,模型中钢材与钢筋本构采用三折线模型,泊松比为0.3,达到极限强度时塑性

应变分别为0.19和0.10。模型中焊钉非线性剪切刚度根据推出试验结果^[18]设置。

3.2 有限元模型计算结果

3.2.1 模型变形与损伤分布

图14展示了试验与有限元分析所得荷载-位移曲线。轴向位移为顶、底部端板沿轴向的相对位移;侧向位移取组合板元中部混凝土板顶面与板肋底部

侧向位移平均值。试验及有限元分析在初期刚度和极限承载力方面较为吻合,有限元分析所得极限荷载与试验结果最大误差仅为7%,极限状态下位移值也与试验结果相近。

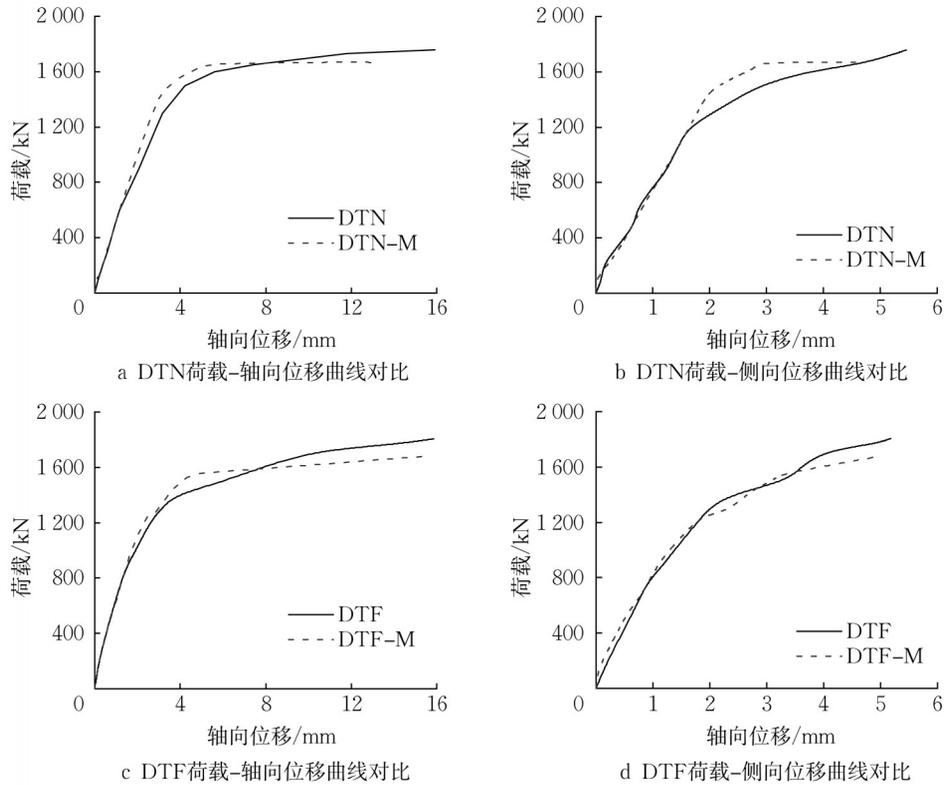


图14 荷载-位移曲线对比

Fig.14 Comparison of load-displacement curves

图15所示为3种荷载等级下试验与有限元模型混凝土板损伤分布对比。C50混凝土板损伤分布表现为多个截面严重损伤,SFRC板损伤程度相对较轻,损伤从中部向两侧均匀减小。以上现象与试验

中DTN试件裂缝分布稀疏而宽度大、DTF试件裂缝分布密集而宽度小的特征相对应。结合变形及损伤分布对比,有限元模型对组合板元偏拉作用过程的模拟结果可靠。

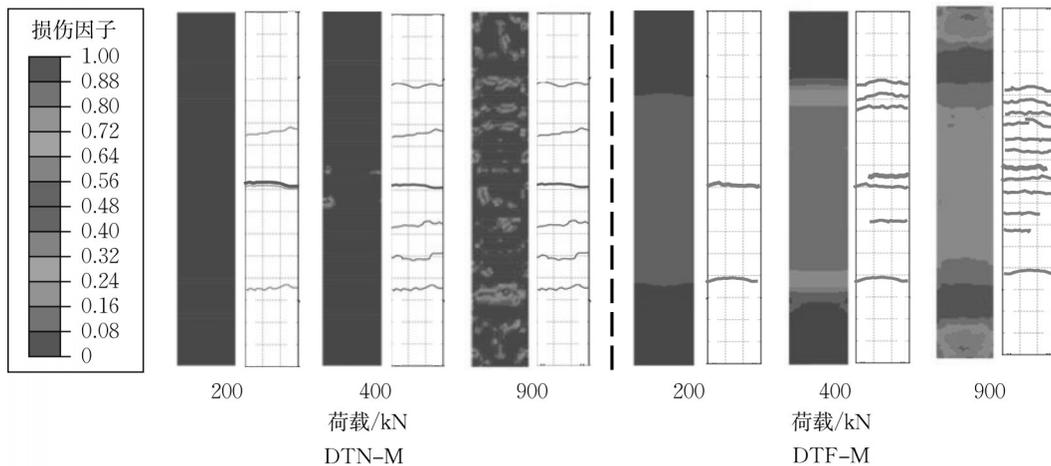


图15 混凝土板受拉损伤发展与分布对比

Fig.15 Comparison of development and distribution of tensile damage of concrete slabs

3.2.2 刚度分析

3.2.2.1 轴向抗拉刚度

表4列出了弹性状态、裂缝宽度达0.10和0.20 mm时有限元模型轴向抗拉刚度 K_{T0} 、 K_{T1} 、 K_{T2} 及混凝土最大纵向应变 ϵ_{T0} 、 ϵ_{T1} 、 ϵ_{T2} 。表5所示为组合板元模型轴向抗拉刚度折减及贡献值。轴向抗拉刚度折减值为裂后 K_{T1} 、 K_{T2} 与弹性状态 K_{T0} 之比;轴向抗拉刚度贡献值为混凝土板占组合板元轴拉刚度比例,表中 K_{TS} 为DTS-M模型轴向抗拉刚度,3种开裂状态下均约为 $463 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。

表4 模型轴向抗拉刚度与混凝土应变

Tab.4 Uniaxial tensile stiffness and strain of concrete slab of models

模型编号	轴向抗拉刚度/ ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)			混凝土板最大纵向 应变/ 10^{-6}		
	K_{T0}	K_{T1}	K_{T2}	ϵ_{T0}	ϵ_{T1}	ϵ_{T2}
DTN-M	1 110.4	542.3	519.8	44	1 654	3 391
DTF-M	1 048.9	721.0	596.2	69	484	1 539

表5 模型轴向抗拉刚度折减与贡献

Tab.5 Reduction and contribution of uniaxial tensile stiffness of models

模型编号	轴向抗拉刚度折减		轴向抗拉刚度贡献/%		
	K_{T1}/K_{T0}	K_{T2}/K_{T0}	$1-K_{TS}/K_{T0}$	$1-K_{TS}/K_{T1}$	$1-K_{TS}/K_{T2}$
DTN-M	0.49	0.47	58.4	14.5	10.8
DTF-M	0.69	0.57	55.9	35.7	22.2

对比表2可见有限元分析所得轴向抗拉刚度与试验结果基本一致。在弹性阶段,DTN-M和DTF-M模型轴向抗拉刚度差异较小,当最大裂缝宽度分别达0.10和0.20 mm时,DTN-M模型轴向抗拉刚度降低51%和55%,DTF-M模型轴向抗拉刚度降低31%和43%。结合混凝土板纵向应变值,C50混凝土在开裂后应变迅速增大,组合板元轴向抗拉刚度骤降;SFRC开裂后仍处于拉伸硬化阶段,轴向抗拉刚度下降缓慢。

当裂缝宽度分别达0.10和0.20 mm时,C50混凝土对组合板元轴向抗拉刚度贡献为15%和11%,而SFRC仍能贡献36%和22%,约为C50混凝土的2倍,表明SFRC在开裂后仍对组合桥面板轴拉刚度具有较大贡献,实际设计时应合理考虑其受力贡献而非仅将其作为安全储备。

3.2.2.2 侧向抗弯刚度

图16所示为不同荷载等级下组合板元模型侧向位移沿长度分布。可见SFRC组合板元侧向变形更小且更平滑,表明SFRC更有利于抵抗组合板元

侧向变形。

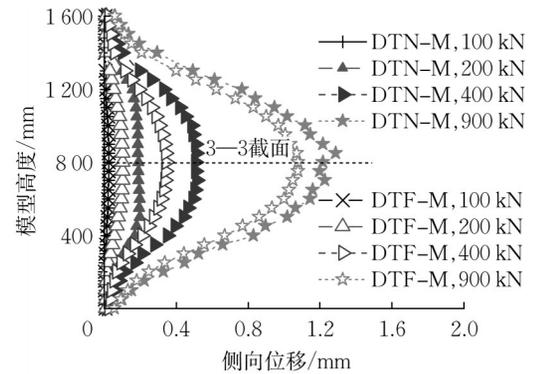


图16 模型侧向位移发展

Fig.16 Development of lateral displacement of models

表6列出了弹性状态、裂缝宽度达0.10和0.20 mm时有限元模型侧向抗弯刚度 K_{B0} 、 K_{B1} 、 K_{B2} 。表7列出了相应的侧向抗弯刚度折减与贡献值。刚度折减与贡献值定义与上述轴向抗拉刚度相同。模型侧向抗弯刚度按式(4)、(5)计算,其中挠曲线方程为模型侧向位移曲线拟合所得,弯矩值通过提取模型中部截面所有节点力对截面形心取矩求和所得。经对比同等荷载下带有不同SFRC损伤的截面,其节点力对形心弯矩之和差值在10%以内;DTN-M模型由于其开裂特征选取中部未损伤截面,因此未考虑混凝土损伤后截面形心下移。3种开裂状态下侧向抗弯刚度 K_{BS} 为 $2.5 \times 10^9 \sim 3 \times 10^9 \text{ kN}\cdot\text{mm}^2$ 。

表6 模型侧向抗弯刚度

Tab.6 Lateral bending stiffness of models

模型编号	侧向抗弯刚度/($10^9 \text{ kN}\cdot\text{mm}^2$)		
	K_{B0}	K_{B1}	K_{B2}
DTN-M	7.3	3.8	3.0
DTF-M	6.6	4.6	3.4

由表7可知,当裂缝宽度分别达0.10和0.20 mm时,DTN-M模型侧弯刚度降低48%与59%,DTF-M模型侧弯刚度降低30%与49%,可见SFRC开裂后组合板元侧向抗弯刚度下降速率显著低于C50混凝土。对比DTS-M模型,SFRC和C50混凝土在弹性状态对组合板元侧向抗弯刚度贡献较大,分别可达到53%和57%。当最大裂缝宽度分别达到0.10和0.20 mm时,SFRC对组合板元侧向抗弯刚度贡献仍有41%与27%,普通混凝土则仅能贡献29%与17%,这表明SFRC在开裂后对组合板元侧向抗弯刚度具有良好的贡献。

表7 模型侧向抗弯刚度贡献与折减

Tab.7 Reduction and contribution of lateral bending stiffness of models

模型 编号	侧向抗弯刚度折减		侧向抗弯刚度贡献/%		
	K_{B1}/K_{B0}	K_{B2}/K_{B0}	$1-K_{BS}/K_{B0}$	$1-K_{BS}/K_{B1}$	$1-K_{BS}/K_{B2}$
DTN-M	0.52	0.41	57.1	28.9	17.0
DTF-M	0.70	0.51	52.6	41.3	26.8

$$K_b = \frac{M}{\phi} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{|y''|}{(1+y'')^{1.5}} \quad (5)$$

式(4)、(5)中: K_b 为侧向抗弯刚度; M 为弯矩值; ϕ 为侧向变形挠曲线曲率; y 为侧向变形挠曲线方程。

3.2.3 承载力分析

按照式(6)计算钢结构全截面屈服时组合板元承载力,表8列出了试验、有限元分析及理论计算结果。由表8可知,3种方式所得组合板元承载力差值较小,即所得组合板元承载力结果可靠。此外,与DTS-M模型计算结果相比,DTN-M和DTF-M模型在钢结构全截面屈服时所受荷载与其基本一致,这表明在偏拉作用下组合板元结构承载能力由钢结构控制,即组合板中SFRC和C50混凝土板对组合桥面板极限承载力的贡献并不显著。

$$F = f_{sy} A_s + f_{ry} A_r \quad (6)$$

式中: F 为偏拉力; f_{sy} 、 f_{ry} 分别为钢板、钢筋屈服强度; A_s 、 A_r 分别为钢板、钢筋面积。

表8 组合板元极限承载力

Tab.8 Ultimate bearing capacity of composite decks

破坏状态	极限承载力/kN					
	DTN	DTF	DTN-M	DTF-M	DTS-M	理论解
全截面屈服	1 600	1 600	1 598	1 564	1 532	1 659

4 结论

本文通过2个组合桥面板元偏拉荷载试验、有限元模拟及理论推导,考察了钢-SFRC组合桥面板在偏拉荷载作用下的裂缝发展,刚度、承载力及应变发展等力学性能,结论如下:

(1)根据偏拉荷载试验结果,试件破坏形态均表现为混凝土大面积开裂,钢截面屈服。组合板元SFRC承载过程中裂缝分布相比C50混凝土更为密集,但裂缝宽度更小。混凝土板最大裂缝宽度达0.2 mm时,SFRC组合板元试件所受荷载是C50混凝土组合板元试件的2.25倍,SFRC可显著改善组

合桥面板抗裂性能。

(2)根据偏拉荷载试验结果,相比C50混凝土组合板元,SFRC组合板元中钢筋受力更加均匀且应变发展更慢,SFRC材料大应变拉伸硬化特性使其开裂后仍可继续承担外部荷载,这有利于实际设计中优化桥面板配筋方式。

(3)通过对比试验及有限元分析结果,引入材料塑性损伤本构的有限元模型分析可靠。结合试验及有限元分析可知,组合板元开裂后,SFRC对其裂后刚度贡献显著高于C50混凝土。当混凝土板裂缝宽度分别达0.10和0.20 mm时,SFRC对组合板元轴向抗拉刚度贡献为36%和22%,约为C50混凝土贡献值的两倍;SFRC侧向抗弯刚度贡献为41%和27%,显著高于C50混凝土。实际设计时应合理考虑SFRC板受力贡献而非仅将其作为安全储备。

(5)结合偏载试验、有限元分析及理论推导可知,组合桥面板极限承载力主要由钢结构受拉屈服控制,混凝土层对组合桥面板极限承载力贡献并不显著。

作者贡献声明:

徐晨:指导试验设计,数据分析,论文写作与修改。

徐艺:试验数据分析,数值模拟,论文写作与修改。

励晓峰:理论分析。

侯哲豪:参与试验设计与实施。

参考文献:

- [1] 张清华,卜一之,李乔.正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J].中国公路学报,2017,30:14. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.002.
ZHANG Qinghua, BU Yizhi, LI Qiao. Review of fatigue problems of orthotropic steel bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30: 14. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.002.
- [2] 邵旭东,曹君辉,易笃韬,等.正交异性钢板-薄层RPC组合桥面板基本性能研究[J].中国公路学报,2012,25:40. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2012.02.006.
SHAO Xudong, CAO Junhui, YI Duta, *et al.* Research on basic performance of composite bridge deck system with orthotropic steel deck and thin RPC layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25: 40. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2012.02.006.
- [3] 曾明根,武彧,苏庆田.钢纤维混凝土组合桥面板负弯矩区开裂性能试验[J/OL].吉林大学学报(工学版).[2023-04-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20220513.2122.013.html>.
ZENG Minggen, WU Yu, SU Qingtian. Experimental studies

- on cracking behavior of steel fiber reinforced concrete slab in negative moment region of orthotropic composite bridge deck[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition). [2023-04-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20220513.2122.013.html>.
- [4] 吴美艳, 周尚猛. 超高性能混凝土组合钢桥面承载性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(3): 25.
WU Meiyang, ZHOU Shangmeng. Test study of bearing capacity of ultra-high performance concrete and steel composite bridge deck[J]. Bridge Construction, 2017, 47(3): 25.
- [5] 李文光, 邵旭东, 方恒, 等. 钢-UHPC 组合板受弯性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(11): 93. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2015.11.013.
LI Wenguang, SHAO Xudong, FANG Heng, *et al.* Experimental study on flexural behavior of steel-UHPC composite slabs[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(11): 93. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2015.11.013.
- [6] LUO J, SHAO X D, CAO J H, *et al.* Transverse bending behavior of the steel-UHPC lightweight composite deck: orthogonal test and analysis[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162 (105708). DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105708.
- [7] LUO J, SHAO X D, FAN W, *et al.* Flexural cracking behavior and crack width predictions of composite (steel+UHPC) lightweight deck system[J]. Engineering Structures, 2019, 194: 120. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.05.018.
- [8] SU Qingtian, DAI Changyuan, XU Chen. Full-scale experimental study on the negative flexural behavior of orthotropic steel-concrete composite bridge deck[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(12). DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001320.
- [9] 戴昌源, 苏庆田, 冯小毛, 等. 纤维混凝土组合桥面板裂缝宽度计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48: 788.
DAI Changyuan, SU Qingtian, FENG Xiaomao, *et al.* Crack width calculation method of fiber reinforced concrete composite bridge deck [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48: 788.
- [10] 史占崇, 苏庆田, 戴昌源. 钢-钢纤维混凝土组合桥面板轴拉性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(S1): 47. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.S1.006.
SHI Zhanchong, SU Qingtian, DAI Changyuan. Experimental study on axial tension behavior of composite deck system composed of steel plate and steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(S1): 47. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.S1.006.
- [11] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2007-01-01.
China Academy of Building Research. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T50081—2002 [S]. Beijing: China Academy of Building Research, 2007-01-01.
- [12] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13: 2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
China Association for Engineering Construction Standardization. Standard test methods for fiber reinforced concrete: CECS 13: 2009[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [13] 中国钢铁工业协会. 金属材料室温拉伸试验方法: GB/T 228—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
China Iron and Steel Association. Metallic materials-tensile testing at ambient temperature: GB/T 228—2002[S]. Beijing: China Standard Press, 2002.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [15] 吕西林, 张颖, 年学成. 钢纤维高强混凝土在单调和重复荷载作用下轴压应力-应变曲线试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38: 135. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.01.015.
LÜ Xilin, ZHANG Ying, NIAN Xuecheng. Experimental study on stress-strain curves for high-strength steel fiber reinforced concrete under monotonic and repeated compressive loadings [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38: 135. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.01.015.
- [16] LEE J, FENVES G L. Plastic model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892).
- [17] 田连波, 侯建国. ABAQUS 中混凝土塑性损伤因子的合理取值研究[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2015, 37(4): 340. DOI: CNKI:SUN:HDZK.0.2015-04-008.
TIAN Lianbo, HOU Jianguo. Reasonable plastic damaged factor of concrete damaged plastic model of ABAQUS [J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2015, 37(4): 340. DOI: CNKI:SUN:HDZK.0.2015-04-008.
- [18] 张渤雨. 后结合钢-UHPC 组合桥面板收缩效应及静力性能试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2020.
ZHANG Boyu. Experimental study on shrinkage effect and static performance of steel UHPC composite deck [D]. Shanghai: Tongji University, 2020.