

钢顶板-纤维混凝土组合桥面板抗弯性能试验分析

卢建福

(厦门路桥百城建设投资有限公司, 厦门 福建 361200)

摘要: 为研究纤维混凝土组合桥面板的抗弯性能, 了解其受力过程及破坏模式, 基于某座采用钢顶板-纤维混凝土组合桥面板的钢箱梁桥, 设计并制作局部足尺模型, 开展正弯矩和负弯矩抗弯性能试验, 分析该组合桥面板的抗弯全过程工作曲线、破坏模式、受力机理与裂缝发展分布情况。研究表明: 正弯矩试件受力分为弹性段、弹塑性段和破坏段; 负弯矩试件受力分为弹性段、带裂缝工作阶段和钢筋屈服阶段; 在正弯矩试件的弹塑性段或负弯矩试件的带裂缝工作阶段, T肋翼缘板底缘和腹板均发生屈服, 由于T肋刚度占整体结构刚度较小, 组合板结构刚度并未发生显著削弱; 正弯矩试件破坏是由于纤维混凝土顶缘压溃所导致的, 而负弯矩试件破坏是由于塑性铰发展产生较大的塑性变形引起的。

关键词: 组合桥面板; 纤维混凝土; 正弯矩; 负弯矩; 足尺模型; 抗弯试验

中图分类号: U443.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)05-0153-07

Experimental Study on Flexural Behavior of Steel Plate and Fiber Reinforced Concrete Composite Slab

LU Jianfu

(Xiamen R&B Baicheng Construction Investment Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361200, China)

Abstract: In order to analyze the flexural performance of the fiber reinforced concrete composite deck and understand its stress process and failure mode, based on a steel box girder bridge with a steel roof-fiber reinforced concrete composite deck, a local full-scale model was designed and fabricated to carry out the bending performance test of positive bending moment and negative bending moment, and analyze the working curve, failure mode, stress mechanism and crack development and distribution of the composite bridge deck in the whole bending process. The research shows that the positive bending moment specimen is divided into elastic section, elastic-plastic section and failure section; the negative bending moment specimen is divided into elastic section, working stage with cracks and steel yield stage. In the cracked working stage of the elastic-plastic section or the negative bending moment specimen, both the bottom edge and the web of the T-rib flange plate yield. Since the stiffness of the T-rib is small in the overall structural stiffness, the structural stiffness of the composite plate is not significantly weakened. The failure of the positive moment specimen was caused by the crushing of the top edge of the fiber reinforced concrete, while the failure of the negative moment specimen was caused by the yielding of the steel bars in the fiber reinforced concrete slab.

Keywords: composite deck; fiber-reinforced concrete; positive bending; negative bending; full-scale model; bending test

国内外常以沥青混凝土柔性铺装材料作为钢桥面铺装, 但传统钢桥面采用柔性铺装存在着两个工程难题, 一是因其需承受车轮荷载的直接作用, 再加上局部效应明显, 结构构造复杂等因素, 导致钢桥面

板疲劳损伤问题突出, 较易发生疲劳开裂^[1-2]; 二是钢桥面板和柔性铺装材料间的弹性模量差异较大, 荷载作用下变形协调性差, 导致沥青铺装层极易开裂破损需定期修复, 给社会经济造成严重的影响。如何解决或改善钢桥面的两大问题, 提高其使用寿命和

降低维护成本,已成为桥梁工程的研究热点之一^[3]。

针对钢桥面出现的这两类难题,相关学者提出采用纤维混凝土代替部分沥青铺装,与钢顶板组成组合桥面板,主要目的是通过提高桥面的局部刚度以降低钢桥面的疲劳应力幅,从而改善钢桥面的疲劳破坏程度^[4]。Hshii 等^[5]通过开展钢纤维混凝土加固钢桥面研究,发现采用钢纤维混凝土加固钢桥面可以提升桥面刚度,使钢桥面与加劲肋之间焊接部位的局部变形得到显著改善;邵旭东等^[6]通过采用超高性能混凝土(UHPC)的轻型组合桥面结构的相关试验研究,结合有限元模拟分析发现:增加 UHPC 层对桥面局部刚度改善效果十分显著,钢结构应力幅得到明显降低,钢桥面结构疲劳开裂风险大幅降低;此外邵旭东等^[7]以虎门大桥为背景,分别开展了正交异性钢板-薄层超高性能活性粉末混凝土组合桥面纵向和横向的抗弯试验,研究发现该组合桥面板结构体系的受力性能得到显著改善,能够显著减少组合桥面结构开裂的发生概率;李文光等^[8]通过钢-UHPC 轻型组合桥面的抗弯性能试验发现:合适的保护层厚度和配筋率可以有效抑制 UHPC 层开裂,并随着配筋率的增加,其疲劳开裂寿命明显提高,横桥向钢筋的布置形式对组合桥面系的横向抗弯性能有一定增强作用,并给出了裂缝宽度的发展趋势;李玮等^[9]针对桥面板中刚性铺装材料补强效果的研究得出刚性铺装对桥面刚度补强效果显著,可明显改善纵向加劲肋和桥面顶板焊接部位的疲劳应力,有效降低发生疲劳裂缝的危险;邓鸣等^[10]针对天津海河大桥提出了采用 UHPC 加固钢桥面的方法,通过有限元分析和实桥试验,发现在长期重载作用下,桥梁刚度不足易导致钢桥面出现铺装层破坏和疲劳开裂,采用 UHPC 铺装加固,可大幅度提高桥面板刚度,显著降低其应力水平,减少新增裂缝的产生;Su 等^[11]对 4 个足尺桥面板试件展开负弯矩抗弯试验的研究表明,配筋率和剪力连接件类型对组合桥面板的抗弯刚度的影响较为明显,组合桥面板承载能力受配筋率影响,而钢纤维对裂缝宽度的发展起到抑制作用。

综上所述,采用纤维混凝土替代部分沥青混凝土形成复合铺装体系,可以提高桥面板刚度,从而提高其承载能力,降低出现裂缝的风险。现有的研究主要集中于大跨径或超大跨径钢桥面板,为了承担较大自重和荷载的作用,通常采用 UHPC 作为铺装层材料及 U 肋作为纵向加劲肋^[12-13];而在中等跨径钢箱梁桥中,出于减少用钢量及建设成本的角度

考量,以纤维混凝土作为铺装材料,纵向加劲肋采用 T 型加劲肋则更为经济适用,但这方面研究目前相对较少。为此本文以实际工程为背景,设计并制作钢顶板-纤维混凝土组合桥面板局部足尺模型,开展正弯矩和负弯矩抗弯性能试验,分析该组合桥面板的抗弯全过程工作曲线、破坏模式、受力机理与裂缝发展分布情况,为后续实际工程的应用和推广提供参考。

1 试验设计

1.1 工程背景

工程为某座采用 T 型加劲肋钢顶板-纤维混凝土组合桥面板体系的连续钢箱梁桥,全桥共计 3 联,跨径布置为 $(3 \times 30 \text{ m}) + (3 \times 30 \text{ m}) + (3 \times 30 \text{ m})$,桥梁长度为 270 m,桥面宽度为 28 m,梁高为 1.8 m,横隔板间距为 1.5 m,全桥立面图和标准横断面如图 1 和图 2 所示。

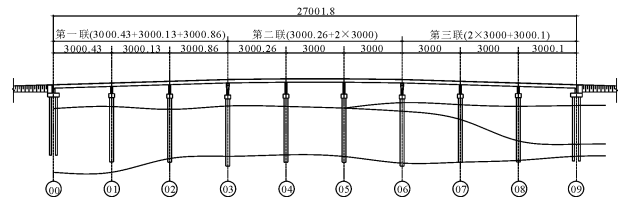


图 1 全桥立面图(单位:cm)

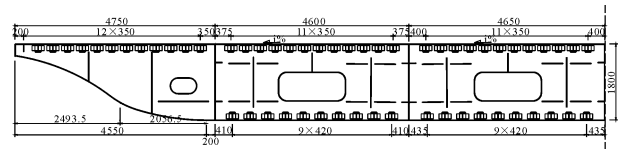


图 2 桥梁横断面图(单位:mm)

1.2 试件设计

由于试验场地和设备的限制,仅选取背景桥梁局部进行足尺试验研究,其中正弯矩抗弯试件 ZW-1(下文简称为“正弯矩试件”)和负弯矩抗弯试件 FW-1(下文简称为“负弯矩试件”)尺寸总长为 2 300 mm,净跨为 2 100 mm,宽为 700 mm,高度为 376 mm。钢顶板厚度为 14 mm,纤维混凝土板厚度为 100 mm;在试件宽度方向布置三排 D13 × 60 栓钉,间距为 300 mm;T 肋翼缘板尺寸为 12 mm × 120 mm,T 肋腹板尺寸为 12 mm × 160 mm。纤维混凝土板中布置有 $\phi 10 \text{ mm} @ 150 \text{ mm}$ 单层纵横向钢筋网。正弯矩试件布置有两个横隔板,间距为 2 100 mm,横隔板高度和厚度分别为 262 mm 和 20 mm,支承于两端横隔板上;负弯矩试件仅一个横隔板,布置在跨中位置。具体尺寸详见图 3,试验参数详见表 1。

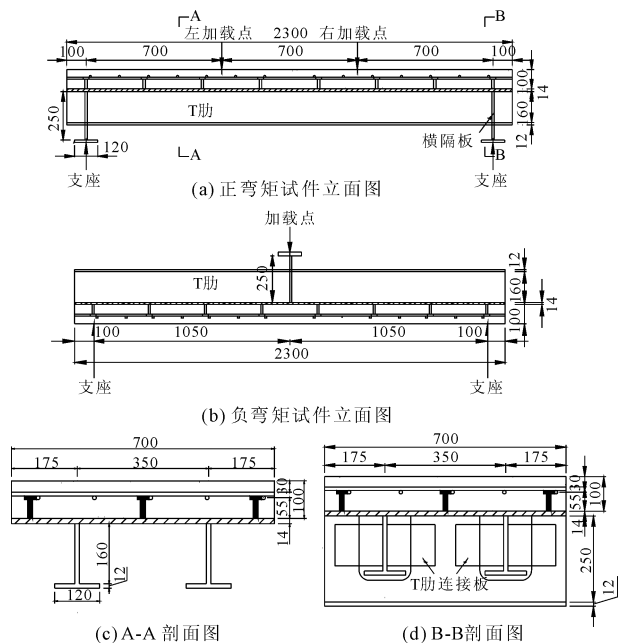


图3 抗弯试件整体布置图(单位:mm)

表1 试验参数表

单位:mm

编号	试件尺寸	T肋间距	跨径	加载方式
ZW-1	2300 × 700 × 376	350	2100	两点加载
FW-1	2300 × 700 × 376	350	2100	单点加载

1.3 材性试验结果

试件由 Q235 钢板、HRB400 钢筋、C50 纤维混凝土等材料组成。根据规范^[14-15]对上述材料进行材性试验,其试验结果汇总于表 2 和表 3。

表2 钢板和钢筋材性试验结果

材料	弹性模量 /GPa	屈服强度 /MPa	屈服应变 / $\mu\epsilon$	极限强度 /MPa
T肋	206.2	274.6	1332	443.7
钢筋	210.0	460.3	2192	687.0

表3 纤维混凝土材性试验结果

混凝土抗压强度/MPa	极限压应变 / $\mu\epsilon$	抗拉强度 /MPa	抗拉应变 / $\mu\epsilon$	弹性模量 /GPa
51.1	1851	4.5	161	32.0

1.4 测点布置

试验位移测点布置如图 4 所示,竖向位移测点布置于试件跨中(2#截面)和加载位置处(1#和3#截面),并在左右支座下方布置竖向位移测点以消除支座下降影响;侧面布置纵向位移计,测量加载过程中钢板与纤维混凝土界面滑移。

正、负弯矩试验的纤维混凝土板应变测点如图

5 所示,混凝土顶面应变测点排布成 3 × 3 形式,分别位于跨中位置和左、右距跨中 200 mm 位置处,并在纤维混凝土板侧面沿高度方向布置 3 个应变。负弯矩试验钢筋应变测点布置于跨中纵向钢筋位置处,详见图 6。

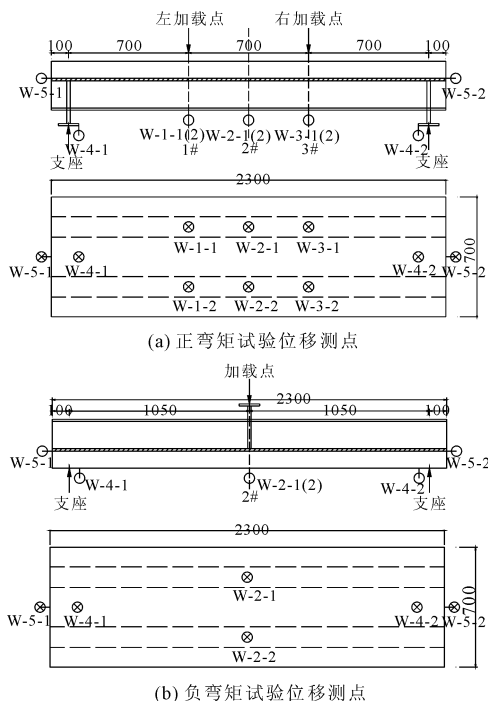


图4 试验位移测点布置图(单位:mm)

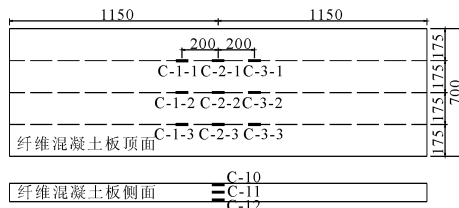


图5 纤维混凝土板应变测点布置图(单位:mm)

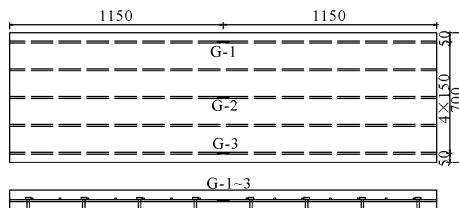


图6 负弯矩试验钢筋应变测点布置图(单位:mm)

钢板应变测点布置如图 7 和图 8 所示,正弯矩试验在试件加载点处(1#和3#截面)和跨中位置(2#截面)每根 T 肋翼缘板底各布置 3 个纵向应变测点,同时在跨中位置(2#截面)的 T 肋腹板和钢顶板底面布置纵向应变测点;负弯矩试件仅在跨中位置(2#截面)每根 T 肋翼缘板底布置纵向应变测点。

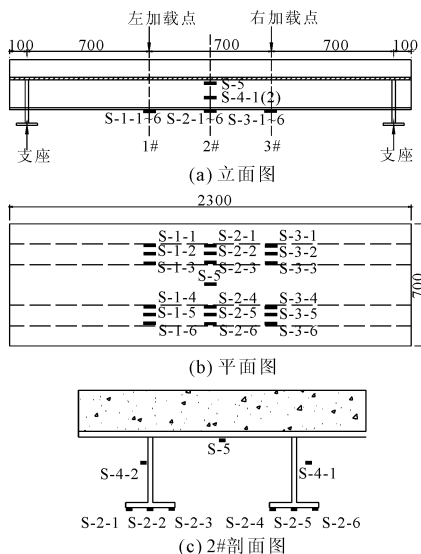


图 7 正弯矩试验钢板应变测点布置图(单位:mm)

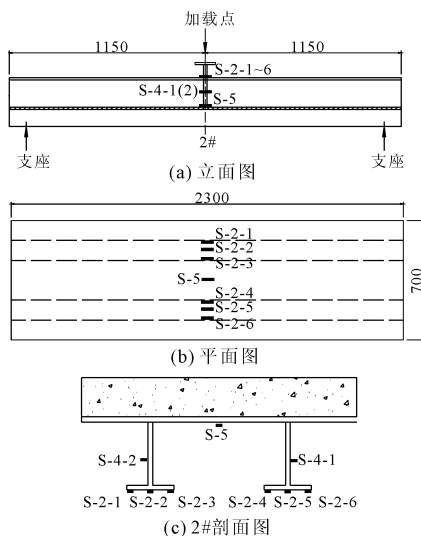


图 8 负弯矩试验钢板应变测点布置图(单位:mm)

1.5 试验制作与加载

为保证本试验的钢构件制作工艺达到试验要求,提高试验结果的准确性,所有的试件钢构件均在钢构厂内采用高精度自动化数控切割设备进行加工。制作时钢板预先组装成型,先点焊后整体焊接,并采用对称焊接工艺,加载示意图如图 9 所示。

2 正弯矩试验结果分析

2.1 试验全过程概述

图 10、图 11 和图 12 分别为试件 ZW-1 的荷载-位移曲线、荷载-界面滑移曲线和破坏照片。由图可知,正弯矩作用下,试件的受力过程可分为弹性段、弹塑性段和破坏段。在弹性受力阶段,试件的钢顶板与纤维混凝土板界面粘结良好,钢板与纤维混

凝土板共同受力,位移随荷载施加呈线性增长;当加载至 600 kN(极限荷载的 67.7%),T 肋翼缘板底缘应变达到屈服,结构进入弹塑性受力阶段,由于 T 肋翼缘板刚度占整体结构刚度较小,位移增长速率并未发生明显变化;当荷载临近 900 kN(极限荷载),荷载-位移曲线逐渐趋近于水平,试件无法继续承受荷载,位移急剧增大,同时界面的荷载-滑移曲线进入水平发展阶段,滑移量迅速增加而荷载基本保持不变,直至试验停止加载。加载结束时最大相对滑移达到 3.75 mm,裂缝宽度和沿高度方向的投影长度分别为 3.1 mm 和 70.0 mm。

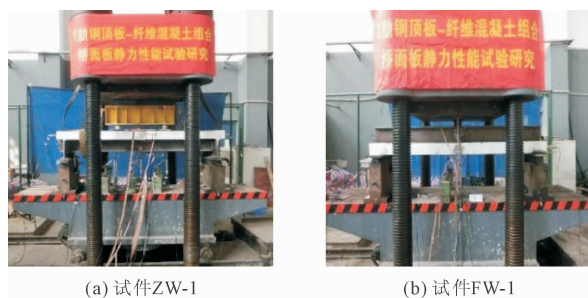


图 9 抗弯试件加载照片

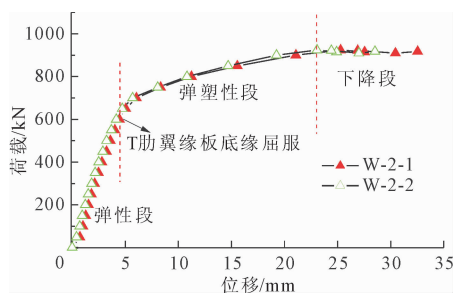


图 10 试件 ZW-1 荷载-位移曲线

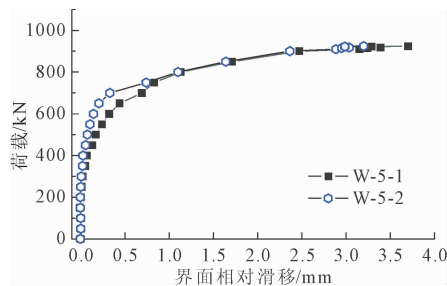


图 11 试件 ZW-1 荷载-界面滑移曲线图

2.2 应变分析

图 13 给出典型荷载作用下试件 ZW-1 截面不同高度的应变。由图 13 可知,在弹性阶段内,截面各位置的应变分布大致为线性关系。当加载至 650 kN 后,钢板与纤维混凝土界面应变呈锯齿状分布,表明此时截面不满足平截面假定。

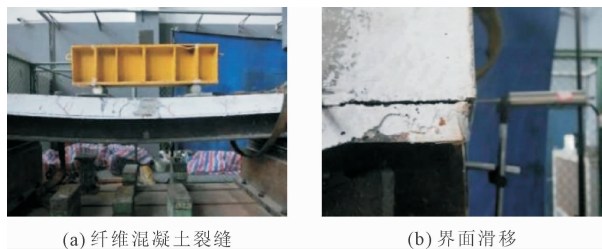


图 12 试件 ZW-1 破坏照片

图 14 给出正弯矩作用下试件 ZW-1 各测点的荷载-应变曲线。由图 14 可知,在弹性段内,试件各测点的应变大致为线性增长;当加载至 600 kN 时,T 肋翼缘板底缘达到屈服 ($1\ 332\ \mu\epsilon$),即试件进入弹塑性阶段,此时各测点的荷载-应变曲线斜率出现减小;当加载至 650 kN 时,T 肋腹板中截面同样达到屈服,但由于 T 肋刚度占整体结构刚度较小,组合板结构刚度并未发生显著削弱,而钢板顶板与纤维混凝土界面开始产生细微缝隙,结合面局部出

现损伤,两者组合作用遭到削弱;加载至 700 kN,界面发生局部损伤,各测点应变出现显著增大;加载至试验结束时,加载位置附近的测点陆续达到极限压应变,纤维混凝土达到压溃状态,而钢顶板的应变到加载结束时仍远小于屈服应变,说明正弯矩作用下试验试件的破坏是由于纤维混凝土顶缘压溃而导致的。

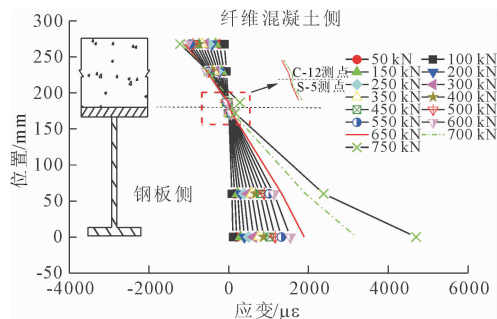
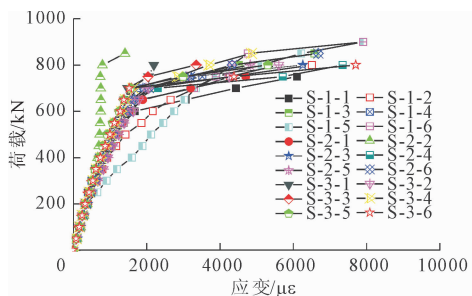
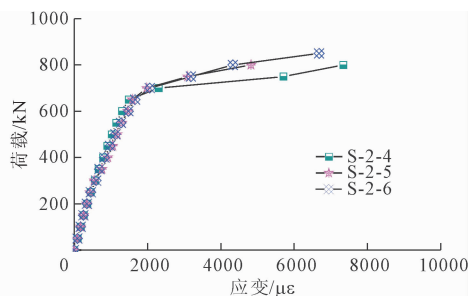


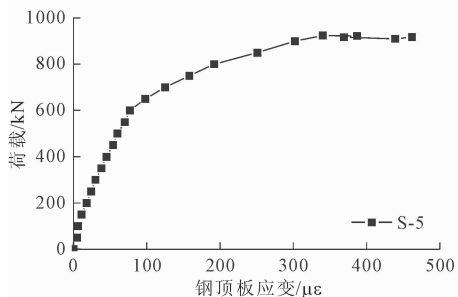
图 13 典型荷载作用下试件 ZW-1 截面应变



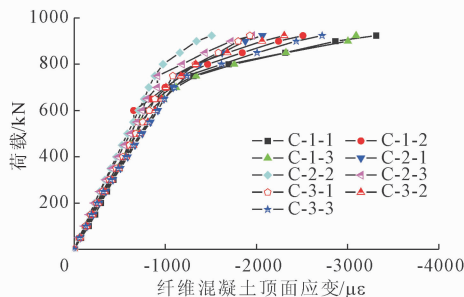
(a) 跨中截面 T 肋翼缘板测点



(b) T 肋翼缘板所有测点



(c) 荷载-钢顶板应变曲线



(d) 荷载-混凝土应变曲线

图 14 试件 ZW-1 各测点的荷载-应变曲线

3 负弯矩试验结果分析

3.1 试验全过程概述

图 15 和图 16 给出试件 FW-1 的荷载-位移曲线和裂缝发展形态。从图 15、图 16 可以看出,试件 FW-1 在负弯矩作用下的受力过程可分为弹性段、带裂缝工作阶段和钢筋屈服阶段。在弹性受力阶段,组合板截面并未发生开裂,位移与荷载基本呈线性关系;当荷载加至 50 kN (极限荷载的 8.1%) 时,跨中截面纤维混凝土板顶面出现微裂缝,此时试件进

入带裂缝工作阶段,其荷载-位移曲线斜率略微减小但并不明显;当荷载分别增加到 240 kN 和 400 kN 时,T 肋翼缘板和腹板中截面应变先后达到屈服压应变,但由于 T 肋刚度占整体结构刚度较小,组合板结构刚度并未发生显著削弱,此时荷载-位移曲线斜率并未发生明显变化;当荷载达到 440 kN (极限荷载的 71.2%) 时,跨中截面钢筋应变达到屈服应变 ($2\ 192\ \mu\epsilon$),表明试件达到钢筋屈服阶段,此时结构刚度明显降低,位移增长趋势变快;加载至 500 kN 时,初始裂缝由顶面位置发展到钢顶板与纤维混

凝土界面,跨中截面附近纤维混凝土顶面形成 8 条贯通裂缝,相邻贯通裂缝间距约为横向钢筋间距,主裂缝宽度达到 10 mm。加载至 618 kN(极限荷载)后,试件跨中位移达到 45 mm(约为 $L/46.7$),已不适合承载而停止加载。

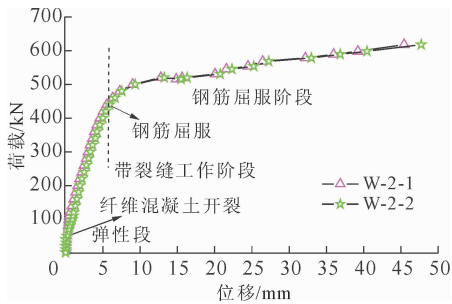


图 15 试件 FW-1 荷载-位移曲线



图 16 试件 FW-1 裂缝发展形态

3.2 应变分析

图 17 给出典型荷载作用下试件 FW-1 截面不同高度的应变,从图 17 可知,在加载过程中,除了纤维混凝土顶缘应变因开裂退出工作外,钢顶板底、T 肋腹板和翼缘板的应变近似线性分布。

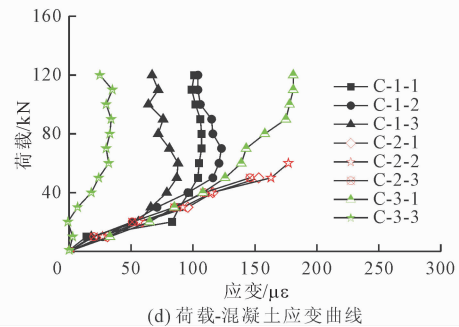
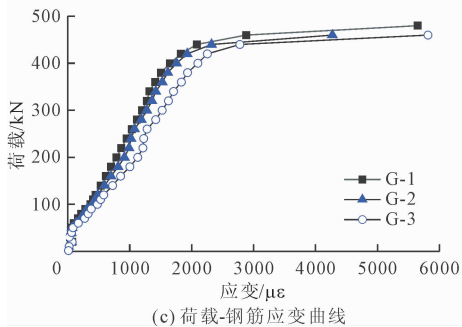
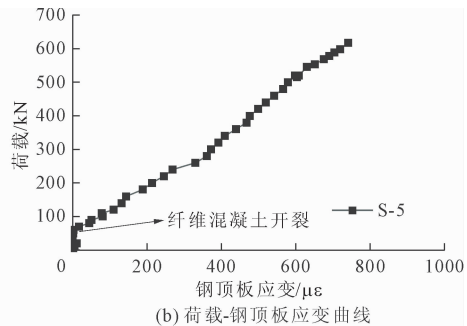
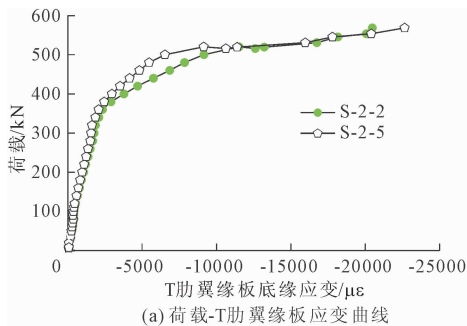


图 18 试件 FW-1 各测点的荷载-应变曲线

3.3 对比分析

表 4 和表 5 给出正弯矩和负弯矩作用下组合板构件关键荷载值。正弯矩与负弯矩作用下的组合板

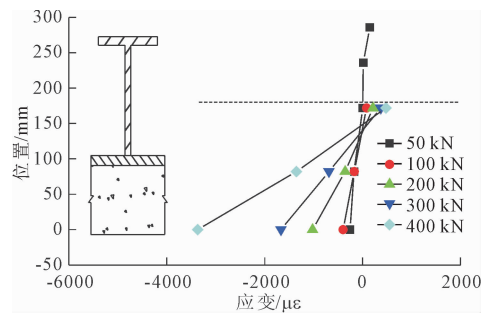


图 17 典型荷载作用下试件 FW-1 截面应变

图 18 给出负弯矩作用下试件 FW-1 各测点的荷载-应变曲线。由图 18 可知,在弹性段内,试件各测点的应变大致为线性增长;当荷载达到 50 kN 后,纤维混凝土板出现裂缝后,此时跨中位置的纤维混凝土应变测点过载失效,钢顶板和钢筋应变开始逐渐增长;当荷载增大到 240 kN 时,试件的 T 肋翼缘板底缘应变测点(S-2-2 和 S-2-5)达到屈服应变,此时荷载-T 肋翼缘板底缘应变曲线开始呈非线性发展;当荷载增长至 440 kN,跨中钢筋达到屈服应变,随着荷载施加,钢筋应变基本呈水平快速增长,而直至加载结束,钢顶板的应变还远未达到屈服,但 T 肋翼缘板底缘已经屈服,截面中形成了塑性铰,说明负弯矩作用下试验试件的破坏是由于塑性铰发展产生较大的塑性变形引起的。

构件在加载过程中的破坏模式、受力机理与裂缝发展分布情况有较大差异。在加载初期,负弯矩组合板构件中的纤维混凝土出现拉应力,进入带裂缝工

作阶段。而对于正弯矩组合板构件,纤维混凝土截面最外缘受压,在加载过程中不会出现此情形;在加载中期,正弯矩组合板构件中的T肋翼缘板底缘受拉发生屈服,进入弹塑性阶段。对于负弯矩组合板构件,T肋翼缘板底缘受压发生屈服;在加载末期,正弯矩组合板构件的破坏是由于纤维混凝土顶缘压溃而导致的,而负弯矩组合板构件的破坏是由于塑性铰发展产生较大的塑性变形引起的。

表4 正弯矩组合板构件关键荷载值

序号	荷载值/kN	与极限荷载之比/%	试验现象描述
1	600	66.7	T肋翼缘板底缘应变达到屈服,试件进入弹塑性段
2	650	72.2	T肋腹板中截面应变达到屈服
3	700	77.8	界面局部出现损伤
4	900	100.0	试件顶面混凝土达到极限压应变,试件进入破坏段

表5 负弯矩组合板构件关键荷载值

序号	荷载值/kN	与极限荷载之比/%	试验现象描述
1	50	8.1	纤维混凝土层开裂,试件进入带裂缝工作阶段
2	240	38.8	T肋翼缘板底缘达到屈服压应变
3	400	64.7	T肋腹板中截面达到屈服压应变
4	440	71.2	钢筋屈服,试件进入钢筋屈服阶段
5	618	100.0	试件位移达到 $L/46.7$,已不适合承载

4 结论

(1) 在正弯矩试件的弹塑性段或负弯矩试件的带裂缝工作阶段,T肋翼缘板底缘和腹板均发生屈服,由于T肋刚度占整体结构刚度较小,组合板结构刚度并未发生显著削弱;正弯矩试件破坏是由于纤维混凝土顶缘压溃所导致的,而负弯矩试件破坏是由于塑性铰发展产生较大的塑性变形引起的。

(2) 正弯矩加载初期钢板与纤维混凝土层连接紧密,能共同作用;当加载至极限荷载的67.7%,T肋翼缘板底缘应变达到屈服,结构进入弹塑性受力阶段,由于T肋翼缘板刚度占整体结构刚度较小,位移增长速率并未发生明显变化;当荷载临近极限荷载,荷载-位移曲线逐渐趋近于水平,同时界面的荷载-滑移曲线进入水平发展阶段;加载结束时相对滑移达到3.75 mm,裂缝宽度和沿高度方向的投影长度分别为3.1 mm和70.0 mm。

(3) 在弹性受力阶段,负弯矩试件的位移与荷载基本呈线性关系;当加载至极限荷载的8.1%,结构进

入带裂缝工作阶段,由于钢筋和纤维存在,混凝土开裂后的结构刚度并未出现显著下降;当加载至极限荷载的71.2%,结构进入钢筋屈服阶段,裂缝宽度迅速增加,纤维混凝土板侧面裂缝扩展至钢与混凝土的界面处,结构刚度出现明显降低,跨中截面附近纤维混凝土顶面形成8条贯通裂缝,最大裂缝宽度达到10 mm;加载至极限荷载后,试件跨中位移达到45 mm。

参考文献:

- [1] 黄卫.大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J].土木工程学报,2007,40(9):65-77.
- [2] 郭伟峰.新型大纵肋正交异性钢板-混凝土组合桥面板优化设计及适用性研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [3] 王成坤.正交异性钢板-混凝土组合铺装体系适用性研究[D].西安:长安大学,2017.
- [4] De Jong F B P. Renovation techniques for fatigue cracked orthotropic steel bridge decks[D]. Delft: Delft University of Technology, 2007.
- [5] Ishii H, Inokuchi S, Kasugai T, et al. Study on fracture behavior of steel fiber reinforced concrete pavement for orthotropic steel deck[J]. Journal of Structural Engineering A, 2013, 59:1138-1149.
- [6] 邵旭东,吴佳佳,榕刘,等.钢-UHPC轻型组合桥梁结构华夫桥面板的基本性能[J].中国公路学报,2017,30(3):218-225,245.
- [7] 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(2):40-45.
- [8] 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):93-102.
- [9] 李玮,赵国云.刚性铺装桥面正交异性板补强中的应用[J].中外公路,2016,36(3):122-126.
- [10] 邓鸣,张建仁,王蕊,等.UHPC铺装加固斜拉桥正交异性钢桥面板[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(1):67-74.
- [11] Su Q, Dai C, Xu C. Full-scale experimental study on the negative flexural behavior of orthotropic steel-concrete composite bridge deck[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(12):04018097.
- [12] 史占崇,苏庆田,陈亮.钢-UHPC组合桥面板中焊接栓钉的疲劳性能及设计布置方法[J].中国公路学报,2023,36(6):107-122.
- [13] 向泽.钢-UHPC组合正交异性桥面板的合理构造研究[D].长沙:湖南大学,2020.
- [14] 金属材料拉伸试验第一部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [15] 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.