

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.02.046

超高性能混凝土钢桥面铺装疲劳性能试验研究

白午龙^{1,2}

(1.上海市市政规划设计研究院有限公司, 上海市 200031; 2.上海城市路域生态工程技术研究中心, 上海市 200031)

摘要: 为研究新型超高性能混凝土钢桥面铺装结构的疲劳性能, 采用五点加载复合梁疲劳试验对其进行测试。参照常规复合梁试验方法, 结合新型铺装结构特点, 对试件尺寸、应力水平和破坏准则进行了修正。试验结果表明, 该新型铺装结构疲劳性能优良, 环氧黏结层首先发生疲劳破坏, 试验过程中复合梁刚度没有明显退化, 试验结束后试件仍保持较高的剩余承载力。通过试验获得了适用于该种新型铺装结构梁的疲劳 $S-N$ 曲线, 可为同类钢桥面铺装设计提供参考。

关键词: 钢桥面铺装; 超高性能混凝土; 复合梁疲劳试验

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)02-0169-04

0 引言

正交异性钢桥面具有构件质量轻、运输与架设方便、施工速度快等特点, 已经成为大跨径钢桥的首选桥面形式^[1-5]。正交异性钢桥面铺装大多采用柔性铺装, 如高温浇注式沥青混凝土、改性沥青混凝土、环氧沥青混凝土等^[6]。

正交异性钢桥面易出现两类病害问题, 即铺装层损坏和钢桥面结构疲劳开裂^[7]。这主要是由于正交异性钢桥面板刚度小, 重载作用下局部变形大, 应力集中现象严重, 在运营过程中, 钢桥面结构处于高应力幅状态, 容易疲劳开裂; 沥青铺装层局部应力和变形过大, 出现裂缝。

为改善桥面系的受力状态, 解决钢桥面疲劳裂纹和铺装易损坏的问题, 有研究者提出在正交异性钢桥面上设置薄层超高性能混凝土(UHPC)层, 其上再铺装上面层, 形成超高性能轻型组合桥面体系(见图1)。该体系大幅度提高了桥面刚度, 有效降低了钢桥面结构的应力及变形、改善了面层的受力状况, 从而基本消除了钢桥面疲劳开裂及铺装层开裂等风险^[8]。

在超高性能轻型组合桥面体系中, 为实现 UHPC 层与钢桥面板整体受力, 在 UHPC 层与钢桥面板之间采用密布剪力键的连接方式。为消除较大的

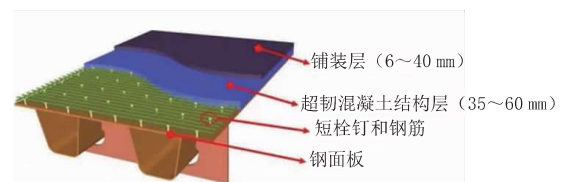


图1 超高性能轻型组合桥面体系

温度、收缩应力, 在 UHPC 层中配置了密集排布的钢筋网。密布剪力键和钢筋网不仅会增加施工和养护维修难度, 而且可能造成浇筑不密实的后果, 影响薄型超高性能混凝土层成型质量。

为降低超高性能混凝土铺装的施工难度, 保证成型质量, 笔者所在研究团队提出具有自主知识产权的新型钢桥面铺装解决方案^[9](见图2), 即: 钢桥面板与 UHPC 层的层间连接采用局部剪力键与环氧粘结的方式, 通过设置变形缝等构造措施消除较大的温度、收缩应力。这种铺装结构取消了超高性能混凝土层中的密布钢筋网, 不仅降低了施工难度, 而且保证了薄型 UHPC 层的成型质量, 具有良好的长期使用性能。

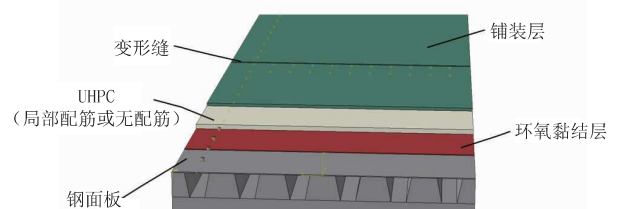


图2 新型超高性能混凝土钢桥面铺装

疲劳破坏是钢桥面铺装主要破坏形式之一^[10], 目前对于钢桥面铺装层疲劳特性的试验方法主要有实桥试验、直环道试验和复合梁试验^[11]。复合梁试验主要用于评价钢桥面沥青混合料铺装体系的疲劳寿

收稿日期: 2020-07-16

基金项目: 上海城投(集团)有限公司科技创新计划项目(CTKY-ZDXM-2018-003)

作者简介: 白午龙(1988—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁研发工作。

命,国内对带密布剪力键和钢筋网的超高性能轻型组合桥面体系有较多研究^[12-16],但尚未有针对新型超高性能混凝土钢桥面铺装结构特点的复合梁疲劳试验研究,也缺乏适用于该种结构复合梁的疲劳S-N曲线。因此,有必要对新型超高性能混凝土钢桥面铺装进行复合梁疲劳性能试验研究。

1 试验方法

1.1 常规复合梁试验方法

目前,国内外常用的钢桥面铺装组合试件疲劳试验方法主要有2种:五点加载复合梁疲劳试验和三点加载复合梁疲劳试验。

五点加载复合梁疲劳试验参考德国《土木工程技术交付条件和技术试验规范》(TL/TP-ING)(2010版)第7部分第4章《用于钢桥铺装防水层试验的技术试验规范》(TPBEL-ST),试验加载模式如图3所示。该试验采用的钢板尺寸为700 mm×200 mm×12 mm,铺装层宽度150 mm,试验温度为20℃,加载频率为10 Hz。

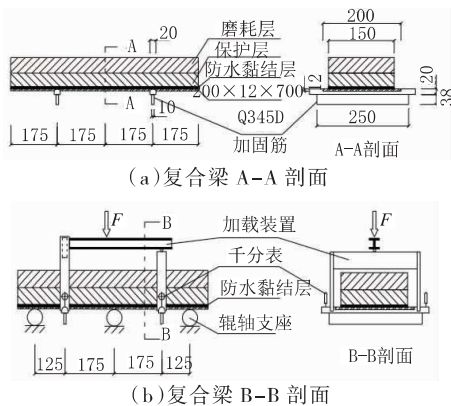


图3 五点加载复合梁疲劳试验加载模式(单位:mm)

三点加载复合梁疲劳试验主要参考了东南大学的疲劳试验方法^[17],类似于五点加载复合梁疲劳试验的简化模型,其复合梁试件尺寸较小,疲劳试验荷载也相对较小,试验加载模式如图4所示。

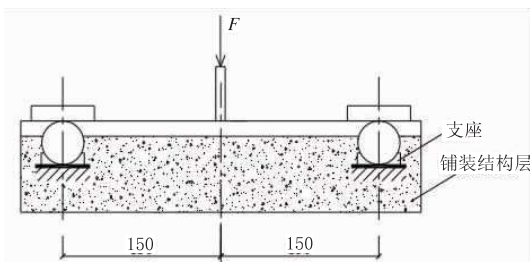


图4 三点加载复合梁疲劳试验加载模式(单位:mm)

1.2 修正后的试验方法

通过大量试验发现,上述2种试验方法的破坏模式有较大区别,五点加载复合梁疲劳试验多为防水黏结层脱层破坏,而三点加载复合梁疲劳试验多

为沥青混合料面层开裂破坏。通过对新型超高性能混凝土钢桥面铺装复合梁进行五点加载静力试验,发现其薄弱部位为环氧黏结层与UHPC层结合位置,对应的破坏类型为脱层。因此,本文采用五点加载复合梁疲劳试验方法,参经常规试验方法,并结合新型铺装特点对试验条件作一定修正。

1.2.1 试件尺寸

参照目前超高性能混凝土钢桥面铺装常用结构形式,UHPC层厚度一般为35~60 mm^[18],确定UHPC层厚为60 mm。试验钢板尺寸为700 mm×150 mm×12 mm,钢板表面除锈,在钢板上铺设环氧黏结层,浇筑UHPC层并常温养护14 d。试件成型过程见图5~图8。



图5 除锈后的钢板



图6 成型环氧黏结层



图7 浇筑UHPC层并养护



图8 成型好的试件

UHPC的力学性能和环氧黏结层主要技术指标见表1、表2。

表1 UHPC力学性能(14 d)

弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
45	120	22

表2 环氧黏结层主要技术指标

拉伸强度 (23℃)/MPa	黏结强度 (25℃,与钢板) /MPa	黏结强度 (25℃,与 UHPC)/MPa	断裂伸长率 (23℃)/%
≥3.0	≥3.0	≥1.5	≥100

1.2.2 应力水平

常规试验中,复合梁试验的最大荷载 F_0 为采用千分表测得的加固筋挠度为 0.5 mm 时的荷载。UHPC 复合梁刚度较沥青类铺装复合梁提高很多,其加载点挠度达到 0.5 mm 时试件已接近承载力极限状态。因此,本文参照文献[19]的试验方法,采用最大应力水平 S_{max} 控制加载。

此处,最大应力水平 S_{max} 是指施加的最大荷载 F_{max} 与试件的静载极限承载力 F_0 之比,即 $S_{max}=F_{max}/F_0$ 。其中 F_0 为五点复合梁静载试验确定的最大荷载,其平均值为 200 kN。最小应力水平 $S_{min}=0.1 S_{max}$ 。采用 3 种应力水平,即 $S_{max}=0.35、0.5、0.7$,来研究不同应力水平下复合梁的抗疲劳性能;载荷历程采用正弦波谱。

1.2.3 破坏准则

德国规范 (TPBEL-ST) 中以混合料出现开裂,或者混合料与防水黏结层间脱层总长度($a、b、c、d$ 处脱层破坏长度相加)达到混合料周长(1 700 mm)的 50%作为破坏准则(如图 9 所示)。但在新型铺装静载试验中,周边脱层很难用肉眼观察到,且内部脱层可能先于周边脱层大面积开展。为提高测试准确性,本试验通过超声波探伤确定是否脱层,测点布置如图 10 所示。本次试验出现以下情况之一时,即认为复合梁破坏,并停止试验:(1)超声波探伤出现明显异常;(2)UHPC 层开裂,并且裂缝宽度达到 0.05 mm;(3)载荷循环次数超过 200 万次^[20]。

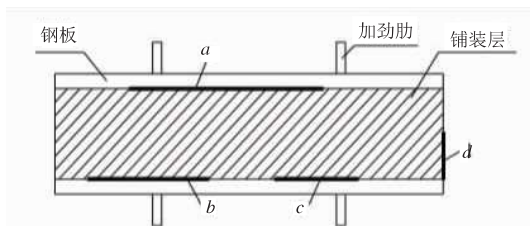


图 9 德国规范 (TPBEL-ST) 疲劳试验破坏终止条件示意图

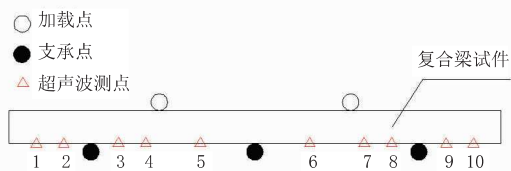


图 10 超声波探伤测点布置图

通过上述修正,新型超高性能混凝土钢桥面铺装复合梁疲劳试验加载装置如图 11 所示。

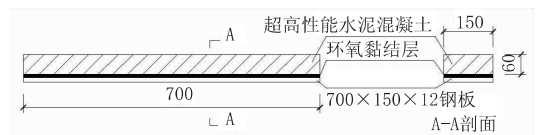
2 试验结果及分析

2.1 疲劳开裂寿命

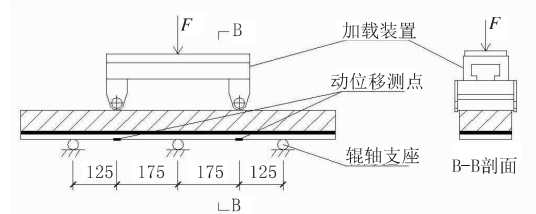
疲劳试验结果见表 3。由表 3 可见:



(a) 试验现场



(b) 试件 A-A 剖面



(c) 试件 B-B 剖面

图 11 复合梁疲劳试验加载装置(单位:mm)

表 3 疲劳试验结果

试件编号	载荷 /kN	最大应力水平 S_{max}	循环次数 / 万次	破坏模式
1	7 ~ 70	0.35	200	无破坏
2	10 ~ 100	0.5	90	超声波测点 3、4 处出现明显异常,支承点附近 UHPC 出现少量裂缝
3	14 ~ 140	0.7	44.59	超声波测点 1、2、9、10 处出现明显异常,加载点处 UHPC 出现贯通斜裂缝

对于试件 1,当 $S_{max}=0.35$ 时,加载 200 万次试件仍未有破坏征兆,表明在此应力水平下,试件可以承受无限次循环而永不破坏。

对于试件 2,当 $S_{max}=0.5$,加载 90 万次时,环氧黏结层靠近边支点处出现脱层,且 UHPC 靠近边支点附近出现细微裂缝。

对于试件 3,当 $S_{max}=0.7$,加载 44.59 万次时,环氧黏结层两端出现脱层,且 UHPC 加载点处出现贯通上下表面的斜裂缝,与加载点接触的 UHPC 上表面被压碎。

由试件 2 和 3 的破坏结果可见,复合梁结构的薄弱部位为环氧黏结层,疲劳试验时首先发生脱层。这是由于环氧黏结剂为脆性材料,结构破坏表现为脆性破坏,破坏之前复合梁没有明显的变形、

开裂和表观脱层等征兆。

试验过程中加载点处复合梁的动位移曲线如图12所示,可见在不同的应力水平下,复合梁刚度没有明显退化。

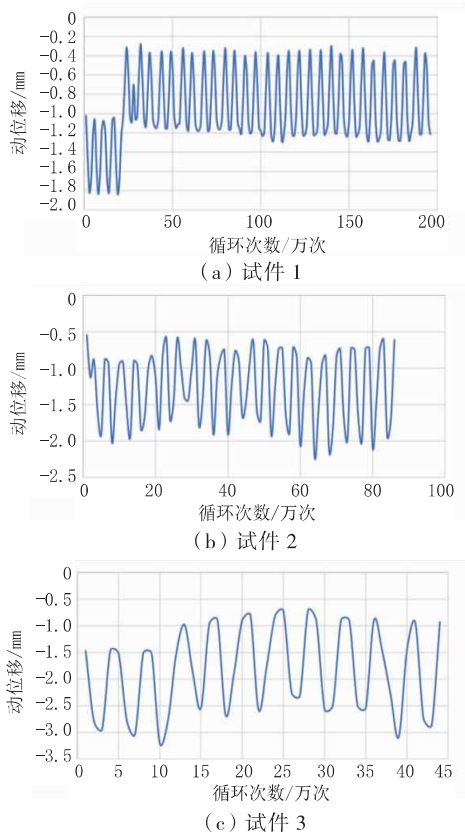


图12 复合梁的动位移曲线

2.2 疲劳 S-N 曲线及方程

根据本文疲劳试验结果,应力水平 S 与疲劳寿命 N 的对数值 $\lg N$ 保持较好的线性关系,符合幂函数模型的特征。经回归分析,得出新型超高性能混凝土钢桥面铺装复合梁 $S-\lg N$ 曲线如图13所示。其疲劳寿命方程为:

$$y = -0.534x + 1.568$$

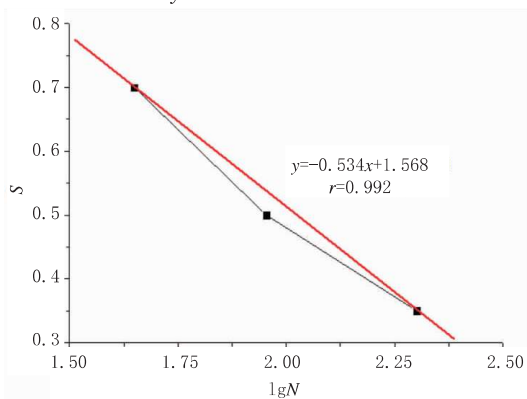


图13 新型铺装结构的疲劳 $S-\lg N$ 曲线

其相关系数 $r=0.992$ 。由该曲线可以估算不同应力水平对应的疲劳寿命,并通过与设计使用年限内当量设计轴载累计作用次数对比,验证新型铺装结构的

疲劳性能是否满足规范要求。

2.3 疲劳剩余承载力

不同荷载循环次数后的剩余弯拉强度能一定程度地反映 UHPC 层的抗弯拉疲劳性能与疲劳累积损伤规律^[21]。为探明复合梁在历经疲劳荷载后的损伤情况,对试件 2、试件 3 进行五点静力弯曲破坏试验,破坏标准为 UHPC 出现贯通斜裂缝或环氧黏结层出现大面积脱层。试验结果见表 4。

表4 五点静力弯曲破坏试验结果

试件编号	加载类型	破坏荷载 /kN	破坏荷载降幅 /%
2	历经疲劳荷载(7~70 kN, 200 万次)	210	0
3	历经疲劳荷载(10~100 kN, 90 万次)	158	24.7

从表 4 可以看出,试件 2、试件 3 经历疲劳荷载循环后,疲劳剩余强度分别为 210 kN 和 158 kN,与静力试验平均最大承载力 200 kN 相比,疲劳试验后整体抗弯强度平均下降 12.3%。这表明,试件在经历疲劳加载后,仍能保持很高的抗弯承载力,该新型铺装体系具有优良的抗弯拉疲劳性能。

3 结论

(1)复合梁结构的薄弱部位为环氧黏结层,疲劳试验时首先发生脱层。由于环氧黏结剂为脆性材料,结构破坏表现为脆性破坏,破坏之前复合梁没有明显的变形、开裂和表观脱层等征兆。

(2)不同应力水平下,复合梁刚度在疲劳试验过程中没有发生明显退化。

(3)应力水平 S 与疲劳寿命 N 的对数值 $\lg N$ 保持较好的线性关系,符合幂函数模型的特征,其疲劳寿命方程直线斜率为 -0.534 ,相关系数 $r=0.992$ 。

(4)试件在经历疲劳加载后,仍能保持很高的抗弯承载力,表明该新型铺装体系具有优良的抗弯拉疲劳性能。

参考文献:

- [1] 黄卫,钱振东.高等级沥青路面设计与理论[M].北京:科学出版社,2000.
- [2] 王春生,冯亚成.正交异性钢桥面板的疲劳研究综述[J].钢结构,2009,24(9):10-13.
- [3] 黄卫,张晓春,胡光伟.大跨径钢桥面铺装理论与设计的研究进展[J].东南大学学报,2002,32(3):480-487.
- [4] 张力,陈仕周.钢桥面铺装技术的研究与发展[J].公路,2001(1):22-25.
- [5] 韩道均,陈仕周.钢桥面铺装技术的研究、实施与总结[J].公路,2001(1):2-8.
- [6] 黄卫.大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J].土木工程学报,2007,40

对于抗渗能力,改性聚氨酯补料修复后的路面试块抗渗能力略强,耐水压力与渗水压力更大。但是两种材料的抗渗等级一致都是 P10 级的抗渗等级。

4 结 论

本文通过对改性聚氨酯与 SBS 改性沥青两种补料的对比试验,比对了两种材料的疲劳特性与抗渗性,并得出了以下几条结论。

(1)改性聚氨酯与 SBS 改性沥青两种材料作为路面裂缝的补料均可满足路面的路用性能需求。

(2)改性聚氨酯材料在修复路面裂缝后的疲劳期相对于 SBS 改性沥青材料的要短,并且 SBS 改性沥青材料的抗疲劳性能更强。

(3)对于抗渗能力,两种材料的抗渗等级一致。

改性聚氨酯材料的耐水压力与渗水压力相对于 SBS 改性沥青材料更大。

参考文献:

- [1] 王兴培,杨帆,李荣鑫,等.新型改性水泥砂浆抗渗和耐磨性能试验研究[J].中外公路,2012,32(4):259-262.
- [2] 李广通.高速公路沥青路面裂缝施工修复中改性聚氨酯的应用[J].交通世界,2019(7):14-15.
- [3] 朱月凤,张洪亮,控制损伤条件下沥青材料的断裂愈合性能[J].中外公路,2016,36(3):258-264.
- [4] 沈志国.浇注式沥青材料生产设备矿粉加热装置研制应用[J].城市道桥与防洪,2017(3):225-227.
- [5] 杨楠,孙全胜.碳纤维-聚氨酯水泥复合材料力学性能试验研究[J].聚氨酯工业,2019,34(4):35-38.
- [6] 刘涛.高速公路沥青路面坑槽快速修复的施工技术及质量控制措施[J].绿色环保建材,2018(7):127,130.
- [7] 杨志强,张玉玲.高速公路半刚性路面裂缝修复技术的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(4):13-14,19.

(上接第 172 页)

- [9]:65-77.
- [7] 邵旭东,曹君辉,易笃韬,等.正交异性钢板-薄层 RPC 组合桥面基本性能研究[J].中国公路学报,2012,25(2):40-45.
- [8] 李嘉,李杰,邵旭东,等.钢板-超薄 UHPC-TPO 组合桥面静力和疲劳试验研究[J].土木工程学报,2017,50(11):98-106.
- [9] 过震文,段昕智,向磊,等.超高性能混凝土钢桥面铺装结构:CN208293416U[P].2018-12-28.
- [10] 周艳,李佩林.双层 SMA 钢桥面铺装复合梁疲劳试验研究[J].公路与汽运,2013,156:181-184.
- [11] 罗桑,钱振东.钢桥面铺装层疲劳试验模型研究综述[J].公路,2010(8):79-82.
- [12] 朱忠,徐发生,周燕强,等.带板肋的钢-UHPC 轻型组合桥面疲劳性能理论与试验研究[J].中外公路,2018,38(6):87-92.
- [13] 刘沐宇,曹玉贵,丁庆军.新型钢桥面铺装结构的力学性能分析[J].华中科技大学学报,2008,25(4):23-26.
- [14] 田启贤,高立强,周尚猛,等.超高性能混凝土-钢正交异性板组合桥面试验研究[J].桥梁建设,2019,49(1):13-19.

- [15] 邓露,鲜亚兰,邵旭东.轻型钢-UHPC 组合桥面板的疲劳可靠性评估[J].中南大学学报,2018,49(3):711-717.
- [16] MURAKOSHI J, YANADORI N, TAKASHI U, et al. Research on steel fiber reinforced concrete pavement on orthotropic steel deck [C]//International Orthotropic Bridge Conference. [S.l.]:[s.n.], 2008:359-371.
- [17] 黄卫,钱振东,程刚,等.大跨径钢桥面环氧沥青混凝土铺装研究[J].科学通报,2002,47(24):1894-1897.
- [18] 邵旭东,胡建华.钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M].北京:人民交通出版社,2015.
- [19] 方志,向宇,匡镇,王常林.碳纤维含量对活性粉末混凝土抗疲劳性能的影响[J].湖南大学学报,2011,38(6):6-12.
- [20] 彭广银.基于复合梁的水泥混凝土桥面铺装疲劳试验研究[D].南京:东南大学,2010.
- [21] 刘梦麟,邵旭东,张哲,等.正交异性钢板-超薄 RPC 组合桥面板结构抗弯疲劳性能试验研究[J].公路交通科技,2012,29(10):46-53.