

钢-UHPC 轻型组合桥面板实桥试验研究

裴必达¹, 李立峰^{1,2†}, 邵旭东^{1,2}, 王连华^{1,2}, 曾研¹

(1.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2.湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:钢-UHPC 轻型组合桥面板是一种由正交异性桥面与密集配筋的 UHPC 薄层通过剪力钉连接而成的新型桥面结构. 为研究 UHPC 层对钢-UHPC 轻型组合桥面结构性能的影响,以枫溪大桥为工程背景,研究正交异性钢桥面常见疲劳细节在铺设 UHPC 层前、后的应力幅变化.首先通过整体有限元模型确定测点位置以及加载范围,然后根据加载方案分别在铺设 UHPC 层前后采用三轴加载车进行低速加载试验,同时采集并整理正交异性钢桥面常见疲劳细节应力响应试验数据,最后建立了节段有限元模型并与实测结果进行对比分析.试验结果表明:铺设 UHPC 层后,常见疲劳细节应力响应均有明显降低,其中面板上的细节(纵肋-面板焊缝、面板对接焊缝、面板-横隔板-纵肋交叉焊缝面板位置)应力幅降幅比例最大,高达 75%~90%;其次为纵肋上疲劳细节(纵肋底部对接焊缝、纵肋-横隔板焊缝焊缝端部位置、面板-横隔板-纵肋交叉焊缝纵肋位置)应力降幅约为 65%~80%;最后为横隔板上疲劳细节(横隔板弧形切口、横隔板弧形切口起点位置、面板-横隔板-纵肋交叉焊缝横隔板位置)应力降幅约为 20%~50%.同时,随疲劳细节与顶面距离的减小,UHPC 层对细节应力降幅的贡献明显增大.有限元模型结果与实测结果吻合较好,也得出了相似的规律.本文实测结果为推广钢-UHPC 轻型组合桥面的应用提供了最直接的数据参考.

关键词:桥梁工程;轻型组合桥面板;现场试验;疲劳细节;应力幅;UHPC 层

中图分类号:U443.33

文献标志码:A

Research on Field Measurement of Steel-UHPC Lightweight Composite Deck

PEI Bida¹, LI Lifeng^{1,2†}, SHAO Xudong^{1,2}, WANG Lianhua^{1,2}, ZENG Yan¹

(1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2.Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The steel-UHPC lightweight composite deck is a novel bridge deck pattern that consists of an orthotropic steel deck(OSD) and a thin ultra-high performance concrete(UHPC) layer. In order to reveal the effect of UHPC layer on the performance of the OSD, field measurement was performed for Fengxi Bridge to evaluate the

* 收稿日期:2018-03-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278183,51778223),National Natural Science Foundation of China(51278183,51778223);湖南省住房和城乡建设厅科技项目(KY201508),Science and Technology Project 2015 Sponsored by the Ministry of Housing and Urban and Rural Development of Hunan Province(KY201508);陕西省交通厅科研课题(14-18K),Shaanxi Provincial Department of Transportation Research Project(14-18K)

作者简介:裴必达(1988—),男,湖北公安人,湖南大学博士研究生

† 通讯联系人,E-mail:lilifeng@hnu.edu.cn

stress ranges in the typical detail categories of the OSD with/without UHPC layer, respectively. Before the field measurement was conducted, the global finite element model of Fengxi Bridge was developed to determine the instrumented sections. Then, a triaxial loading vehicle, according to the loading scheme, was arranged to run on the bridge deck with/without UHPC layer at a low speed, respectively. The field measurement data of the typical detail categories were collected and sorted. Finally, a local finite element model of Fengxi Bridge was built to compare with the field measured results. The field measurements show that the stress response of the typical detail categories are significantly reduced after installment of UHPC layer. For the detail categories related to the steel deck (i.e., rib-to-deck weld, deck splices, and deck of rib-to-deck at diaphragm joint), the stress range decreased by about 75% ~ 90%; for the detail categories related to the trapezoidal rib (i.e., rib splices, weld end of rib-to-diaphragm joint, and rib of rib-to-deck at diaphragm joint), the stress range decreased by about 65% to 80%; for the detail categories related to the diaphragms (i.e., cut-out on diaphragm, diaphragm base metal at cut-out transition, and diaphragm of rib-to-deck at diaphragm joint), the stress range decreased by about 20% to 50%. Meanwhile, with the decrease of the distance from detail categories to top surface, the contribution of UHPC layer to the stress reduction of the detail categories was significantly increased. The results of the local finite element model agreed well with the measured results, and the similar rules were obtained. The field measured results of this paper provide the reference data for the application of steel-UHPC lightweight composite bridge deck.

Key words: bridge engineering; lightweight composite bridge deck; field test; fatigue details; stress range; UHPC layer

正交异性钢桥面具有自重轻、建造快和承载力大的特点,已广泛应用于大跨钢桥中,然而长期的工程实践表明正交异性钢桥面存在两大顽疾:钢桥面铺装层损坏和钢桥面板疲劳开裂^[1-3]。为综合改善这两类病害的解决方案,文献[4]提出了钢-UHPC 轻型组合桥面体系:该体系采用具有优良力学性能及耐久性的密集配筋超高性能混凝土(UHPC)与传统正交异性钢桥面通过剪力钉连接形成钢-UHPC 轻型组合桥面结构。与传统沥青铺装正交异性钢桥面相比,这种轻型组合桥面结构由于 UHPC 层具有高弹性模量,可大大提高钢桥面板刚度,降低钢结构在局部轮载作用下的应力水平,同时能改善上部沥青磨耗层的工作条件,降低沥青磨耗层的破坏风险^[5]。不少研究人员针对这一新型结构进行了大量的理论与试验研究。文献[6]通过数值仿真研究了组合桥面的疲劳性能,表明铺设 UHPC 层后,车辆荷载作用下钢桥面常见疲劳细节应力峰值大幅降低,从而显著提高了钢桥面的疲劳寿命。文献[7]采用热点应力法对不同厚度的 UHPC 层进行了应力幅分析,并依据足尺模型疲劳试验对 UHPC 层的抗弯拉疲劳性能进行评价。文献[8]对比了 RPC-钢桥面组合结构与柔性铺装的基本力学性能,并对钢桥面-RPC 悬臂梁进行了抗拉疲劳试验,证明了薄层组合桥面

铺装体系良好的受力性能。文献[9]通过足尺条带模型试验,证明钢-UHPC 轻型组合桥面具有优良的抗弯疲劳性能。文献[10]通过实桥试验,研究了正交异性钢桥面疲劳细节的动力冲击响应。文献[11]通过足尺模型试验对开口肋轻型组合桥面的疲劳性能进行了研究。文献 [12] 通过多尺度有限元方法对钢-UHPC 轻型组合桥面进行了疲劳评估,结果表明加薄层 UHPC 后,正交异性板疲劳细节应力降幅明显,剪力钉和 UHPC 层也都能满足疲劳的相关要求。这些理论与试验分析表明了钢-UHPC 轻型组合桥面良好的静力与疲劳性能,然而,这些试验研究几乎都在实验室完成,还需要进一步在实际工程中验证,因此笔者团队选择了株洲市枫溪大桥进行现场测试试验研究。

为进一步探究 UHPC 层对实桥中轻型组合桥面的疲劳寿命的影响,本文以株洲市枫溪大桥为研究对象,通过现场实测试验并结合有限元理论分析,对钢-UHPC 轻型组合桥面板典型疲劳细节进行分析和评估。

1 工程背景

株洲市枫溪大桥是中国首座采用轻型组合桥

的大跨径新建自锚式悬索桥,其跨径布置为45 m×3+300 m+45 m×3,边跨和锚跨为混凝土箱梁,主跨为钢加劲梁,在两边主塔附近设有钢混结合段.桥面

宽32 m,双向六车道.主缆垂跨比为1/5,吊杆32对.图1为枫溪大桥结构布置图.

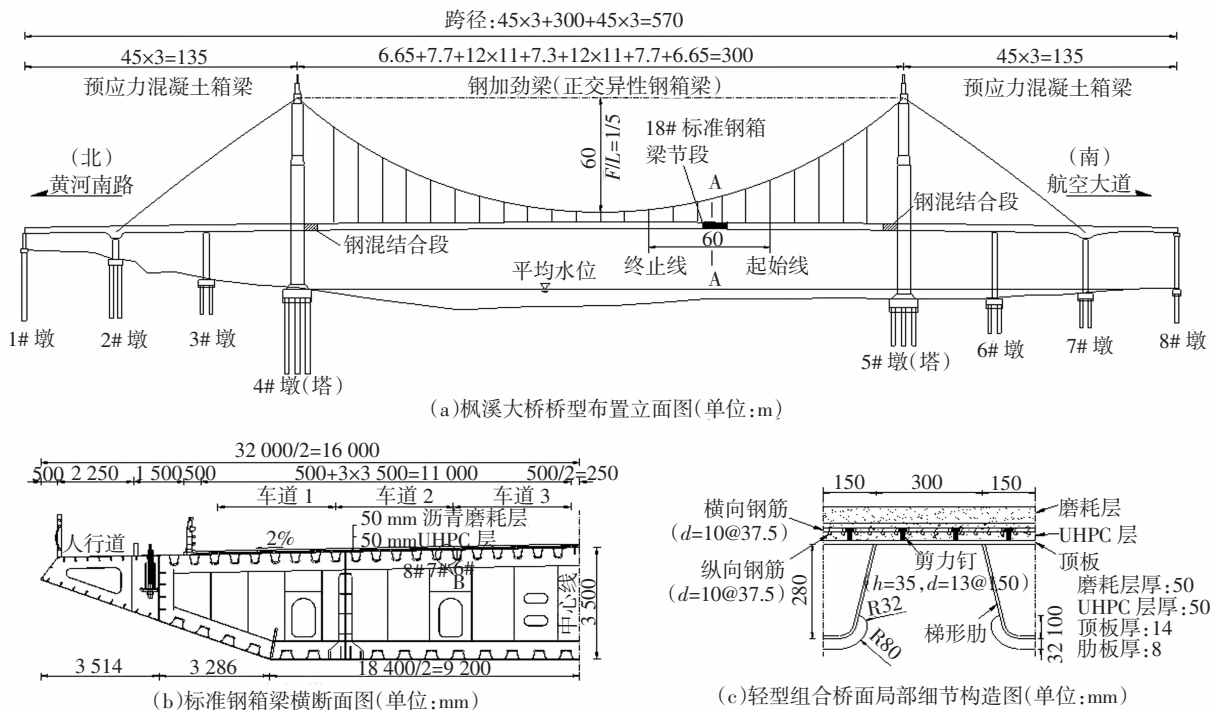


图1 枫溪大桥结构布置图

Fig.1 Overview of the Fengxi Bridge

钢加劲梁采用扁平流线形单箱三室正交异性钢箱梁,梁高3.5 m,顶板厚14 mm,底板厚16 mm,腹板厚24 mm,纵隔板厚16 mm,梯形纵向加劲肋板厚8 mm,间距为600 mm,横隔板厚16 mm/12 mm(有/无吊杆),间距为3 000 mm.

桥面采用钢-UHPC轻型组合结构,面板铺设厚50 mm的UHPC层永久性结构,配置37.5 mm×37.5 mm直径10 mm的HRB400级密集钢筋网,剪力钉高35 mm(焊后高度),直径13 mm,间距为150 mm×150 mm.UHPC层上方铺设50 mm厚的SMA13沥青混凝土磨耗层,如图1(c)所示.

2 轻型组合桥面板疲劳细节

轻型组合钢桥面疲劳验算主要分为UHPC层与钢结构两部分.本文暂不考虑UHPC层的疲劳问题,仅考虑钢结构部分的疲劳.钢结构部分与传统正交异性钢桥面类似,其主要疲劳细节类别如图2所示.①纵肋-面板焊缝;②面板对接焊缝;③纵肋底部对接焊缝;④横隔板弧形切口;⑤纵肋-横隔板焊缝

焊缝端部位置;⑥横隔板弧形切口起点位置;⑦面板-横隔板-纵肋交叉焊缝面板位置;⑧面板-横隔板-纵肋交叉焊缝横隔板位置;⑨面板-横隔板-纵肋交叉焊缝纵肋位置.本文针对上述9类细节进行有限元理论分析计算,同时基于枫溪大桥进行现场试验.

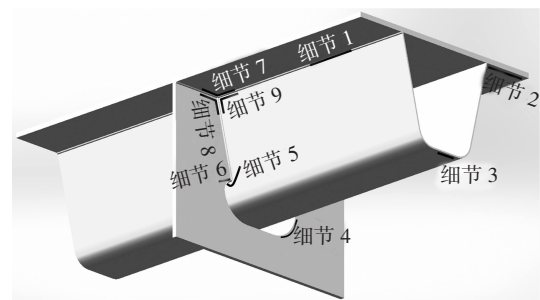


图2 典型疲劳细节

Fig.2 Typical fatigue details categories

3 现场试验研究

为了掌握UHPC层对钢桥面常见疲劳细节的应力改善影响程度,根据桥梁施工进度分两次进行

试验:1)铺设 UHPC 层前,在裸钢桥面上跑车的应力数据采集;2)铺设 UHPC 层后,在轻型组合桥面上跑车的应力数据采集.前后两次数据采集均对同一测试位置采用同一仪器设备和同一加载车辆进行.

3.1 测试位置

为确定车辆荷载作用下纵桥向最不利位置,本文采用 Midas Civil 建立了枫溪大桥全桥有限元模型,根据中国公路桥涵设计通用规范^[13]进行加载分析,得到车辆荷载作用下钢箱梁顶部应力幅最大的位置出现在主跨约 2/3 的地方,位于 18# 标准钢箱梁节段内,因此确定 18# 标准钢箱梁作为测试节段,如图 1(a)所示.

3.2 测点布置

本次试验选取 7# 梯形肋为测试加劲肋,应变片测点位置布置如图 3 所示,同时为保证数据的有效性,于 7# 肋左右两侧对称细节及横隔板正反两面共布置有 44 个测点.为更加精细地捕捉弧形切口处的应力响应,在 6#U 肋横隔板弧形切口处沿弧形切口切线方向,在横隔板正反两面共布置 22 个测点,如图 4 所示.

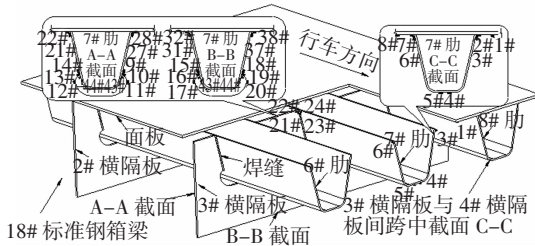


图 3 应变测点位置

Fig.3 Strain gauges layout

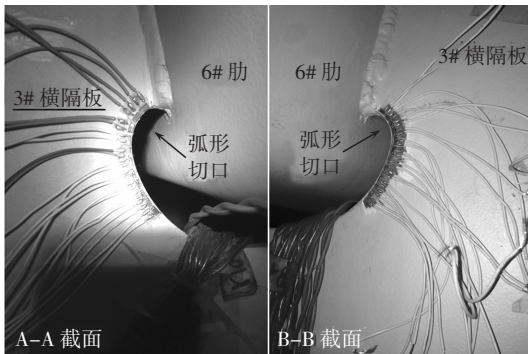


图 4 6# 肋弧形切口应变片布置

Fig.4 Strain gauges layout of the cope hole of 6# rib

3.3 加载车辆

根据正交异性钢桥面板的受力特性,影响钢桥

面疲劳细节应力的主要因素是轴重大小^[14],结合中国实际情况,选用三轴卡车作为加载车辆,并保证车辆轴载达到设计要求.加载车车辆信息如图 5 所示.

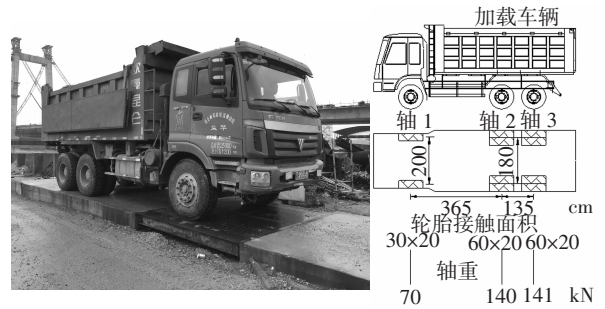


图 5 加载车辆

Fig.5 The loading vehicle

3.4 加载方案

根据正交异性板的局部受力特性,在纵桥向上选取 60 m 的范围作为加载车辆的纵向加载长度,如图 1(a)所示,横桥向选择靠近下游的 3 个车道作为横向加载范围,加载车辆从起始线到终止线按照 5 km/h 的速度匀速直线行驶,每次行驶的横向位置间隔 10 cm,如图 6 所示.现场测试照片如图 7 所示.

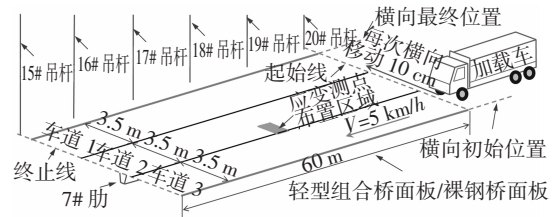


图 6 加载方案

Fig.6 Loading scheme

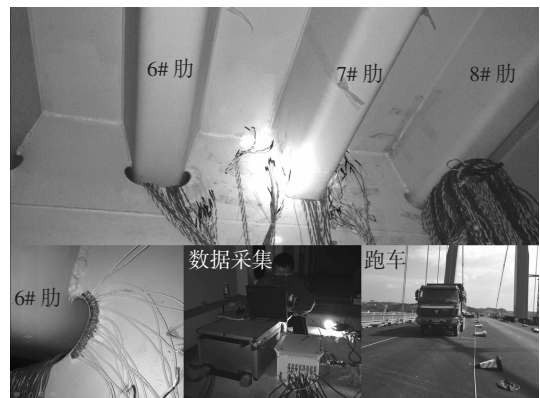


图 7 现场测试照片

Fig.7 Field test photos

4 试验结果与分析

本节对铺设 UHPC 层前后钢箱梁内常见的 9

类细节现场试验数据进行分析,挑选出所有加载中每种细节在铺设 UHPC 层前后的最大拉、压应力,按照较为保守的方式取细节处的应力幅为 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \Delta\sigma_{\min}$.限于篇幅,以下部分仅给出纵肋-面板焊缝、纵肋对接焊缝和弧形切口的应力响应,其他测试结果在本文 4.4 节中给出.

4.1 细节 1:纵肋-面板焊缝位置

纵肋-面板焊缝共布置有 4 个应变测点,两个位于面板,两个位于纵肋,图 8 给出了 4 个测点中响应最为明显的 2# 应变片在铺设 UHPC 层前后的应力响应曲线.同时也说明了对于纵肋-面板焊缝位置面板处的受力比纵肋更为不利.从图中可以看出,虚线代表裸钢桥面的应力时程响应,实线代表轻型组合桥面的应力时程响应,铺设 UHPC 层后,测点的应力时程响应显著降低.每个车轴经过测点截面,都会产生一个对应的峰值信号,由于加载车后轴为双联轴,轴间距较小,峰值信号出现了部分重叠.峰值信号集中在一个相对狭窄的区域,如图中点划线中间,说明该细节纵向影响线较短.此外,在横桥向,远离应变测点的区域,其应力响应相对较小,说明荷载在横桥向的影响范围也较小,纵肋-面板焊缝受力呈现出明显的局部受力特性.

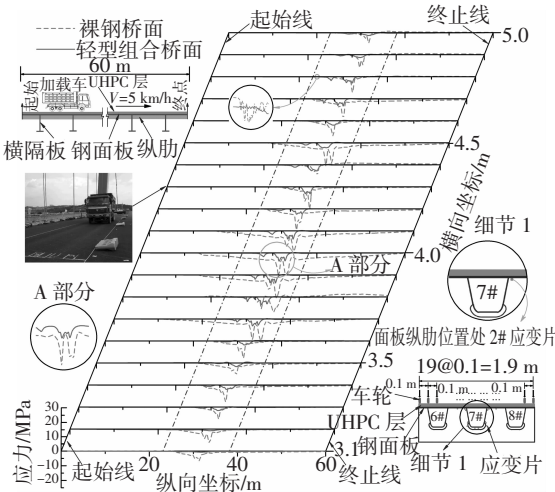


图 8 纵肋-面板焊缝应力响应
Fig.8 Stress response of rib-to-deck weld

4.2 细节 3:纵肋底部对接焊缝位置

在横隔板的约束下,每片梯形肋局部受力体系相当于跨径为横隔板间距的连续梁体系,那么梯形肋底部的最不利位置在两相邻横隔板跨中,因此通过跨中位置来考虑纵肋底部对接焊缝的最不利受力位置.本次实测试验中,在梯形肋底部位置共布置有 2 个应变片,图 9 给出了响应更为明显的 5# 应

变片在铺设 UHPC 层前后的应力响应曲线.从图中可以看出,铺设 UHPC 层后,梯形肋底部的应力响应明显降低.每个车轴经过测点截面,都会产生一个对应的峰值信号,同样对于双联轴峰值信号也出现了部分重叠.沿纵桥向,峰值信号相对集中,说明纵向影响线较短,沿横桥向,峰值信号变化规律和图 8 类似,说明该细节对横向加载位置较敏感,同时也说明梯形肋底部为局部受力行为.

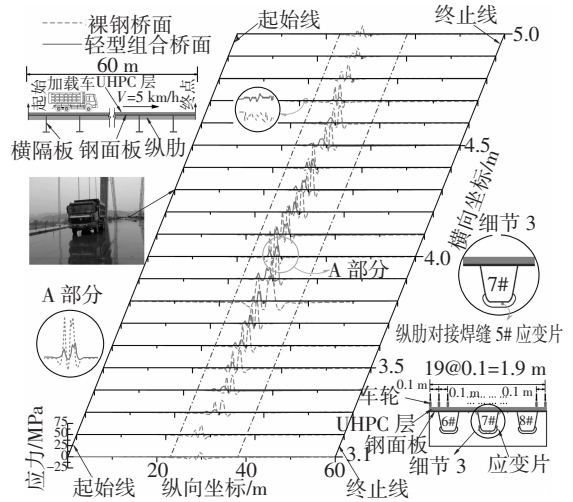


图 9 细节 3 应力时程响应
Fig.9 Stress time history of detail 3

4.3 细节 4:横隔板弧形切口位置

横隔板弧形切口位置布置有多个测点,图 10 中给出了所有测点中应变响应最为明显的 11# 应变片在铺设 UHPC 层前后的应力响应曲线.而布置在 11# 应变片背面的与之对应的 17# 应变片的应变响应与 11# 应变片的影响结果非常接近,说明了该处细节是以面内应力占主导的,面外应力可以忽

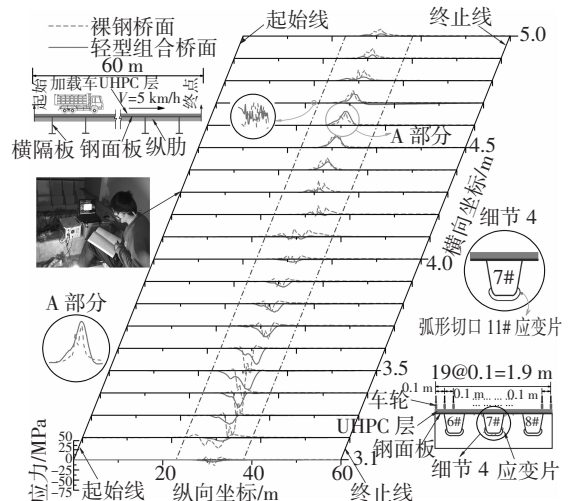


图 10 细节 4 应力时程响应
Fig.10 Stress time history of detail 4

略.此外 6# 纵肋下横隔板弧形切口应变测点最大应变响应的位置出现在和 11# 应变片同一高度的位置,说明横隔板弧形切口的最不利位置可能是两段圆弧相交处.

从图 10 可以看出,横隔板弧形切口的应力响应曲线很特殊,出现了两段受力状态相反的区域,一段为受压区域,此时轮载作用于测点上方区域,另一段为受拉区域,轮载横向偏离测点一定间距,说明横隔板弧形切口的横向影响线相对较长,且荷载的横向作用位置不仅影响应力的大小同时还影响应力的属性.在纵桥向,不管是拉应力峰值还是压应力峰值都集中在相对较窄的区域内,说明这一细节的纵向影响线较短.在受压区段内,可以发现铺设 UHPC 层之后,测点的应力响应明显降低,而在受拉区域,测点的应力响应并没有降低,说明 UHPC 层对横隔板弧形切口这一细节的贡献作用跟轮载荷载横向加载位置密切相关.此外,横隔板弧形切口的测点并不像纵肋-面板焊缝以及纵肋底部对接焊的应变测点类似,每个车轴经过都会产生一个对应的峰值信号,在铺设 UHPC 层之前,只能看到很明显的两个峰值信号,在铺设 UHPC 层之后,尤其是出现拉应力的区域,只能看到一个明显的峰值信号,说明横隔板弧形切口的应力大小不是车辆的总重控制的,而是单轴轴重或者一组轴(双联轴或三联轴)轴重控制的,此外铺设 UHPC 层之后可能改变了横隔板弧形切口的受力属性.

4.4 测试结果讨论

图 8~图 10 给出最为主要的 3 类细节应力响应曲线,并对细节在铺设了 UHPC 层前后的受力特点进行了描述.限于篇幅,其他细节应力响应曲线不一给出,将 9 类细节铺设 UHPC 层前后的应力幅结果以及应力降幅结果绘制于图 11 中.

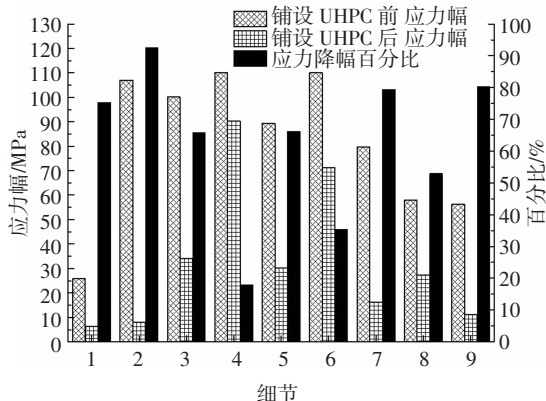


图 11 各细节应力幅及降幅百分比

Fig.11 Stress amplitude and percentage decrease of details

从图 11 可以看出,铺设 UHPC 层后所有细节的应力幅都有明显降低.将面板上 3 处细节:细节 1 (纵肋-面板焊缝)、细节 2(面板对接焊缝)、细节 7 (面板-横隔板-纵肋交叉焊缝面板位置)应力幅结果进行比较,可以发现,铺设 UHPC 层前细节 2 的应力响应最为明显,其次为细节 7,最后为细节 1,对比细节 1 和细节 2 说明细节刚度越小其应力响应越明显,由于细节 7 介于细节 1 与细节 2 之间,说明细节的应力响应还与跨中位置或支点位置有关.而铺设 UHPC 层后应力幅降幅最为明显的是细节 2,降幅高达 92.66%;其次是细节 7,降幅为 79.49%;最后是细节 1,降幅为 75.40%.可以看出,UHPC 层对面板上细节的应力降幅效果显著,应力降幅达 75%~90%,说明了 UHPC 层大大提高了轻型组合桥面的刚度.

将纵肋上 3 处细节:细节 3 (纵肋底部对接焊缝)、细节 5(纵肋-横隔板焊缝焊缝端部位置)、细节 9(面板-横隔板-纵肋交叉焊缝纵肋位置)测试结果进行比较,可以发现,铺设 UHPC 层前细节 3 的应力响应最为明显,其次为细节 5,最后为细节 9.而 UHPC 层对应力幅降幅最为明显的是细节 9,降幅为 80.33%;其次为细节 5,降幅为 66.23%;最后是细节 3,降幅为 65.82%.可以看出,UHPC 层对肋板上细节的应力降幅效果较好,应力降幅约为 65%~80%.从细节到面板的距离来看,细节 9 距离面板最近,其应力降幅也最大,细节 5 和细节 3 离面板的距离相近,二者的应力降幅也相近,说明对于纵肋上的细节,铺设 UHPC 层后细节的应力降幅与细节离面板的位置有关.

将横隔板上 3 处细节:细节 4 (横隔板弧形切口)、细节 6(横隔板弧形切口起点位置)、细节 8(面板-横隔板-纵肋交叉焊缝横隔板位置)测试结果进行比较,可以发现,铺设 UHPC 层前细节 4 和细节 6 的应力响应均非常明显,且两处细节的应力幅基本一样,细节 8 的应力响应最小.而 UHPC 层对应力幅降幅最为明显的是细节 8,降幅为 52.97%;其次是细节 6,降幅为 35.31%;最后是细节 4,降幅为 18.05%.可以看出,UHPC 层对横隔板上细节的应力降幅效果明显,但是不同位置表现出的差异较大,其应力降幅约为 20%~50%.同样也表现出了铺设 UHPC 层后细节的应力降幅与细节离面板的位置有关.

将弧形切口附近 3 处细节:细节 4(横隔板弧形切口)、细节 5(纵肋-横隔板焊缝焊缝端部位置)、细

节6(横隔板弧形切口起点位置)测试结果进行比较,可以发现,铺设UHPC层前细节4的应力响应最为明显,其次为细节6,最后为细节5.而UHPC层对应力幅降幅最为明显的是细节5,降幅为66.23%;其次是细节6,降幅为35.31%,最后是细节4,降幅为18.05%.值得注意的是UHPC层对弧形切口最大拉应力响应的减弱作用较小.另外弧形切口的切口形式,切口尺寸,切口起点深度等都对弧形切口附近的构造细节的应力幅有显著的影响^[2],且相较于其他细节而言,UHPC层对弧形切口附近的构造细节应力降幅较小,因此有必要针对弧形切口附近的构造细节进行深入研究.

纵观9类细节的测试结果,铺设UHPC层后,钢面板与UHPC层形成一个整体,大大提高了桥面板面层刚度,因而所有细节在铺设UHPC层后应力幅均会降低,其中面板上的细节应力幅降幅比例最大,应力降幅高达75%~90%;其次为纵肋上的细节,应力降幅约为65%~80%;最后为横隔板上的细节,应力降幅约为20%~50%.同时应力降幅表现出与细节离面板的距离有关,随着距离的减小,UHPC层对细节应力降幅越明显.

5 有限元模拟研究

5.1 局部有限元模型的建立与加载

从实测结果可以看出,远离应变片的地方应变响应可以忽略不计,因此为了控制计算规模,同时消除局部模型边界条件的影响,建立长30m的局部有限元模型,如图12所示.模型采用通用有限元分析软件ANSYS进行计算分析,钢箱梁的面板、纵肋、横隔板、纵隔板等构件均采用四节点壳单元SHELL181模拟,UHPC层采用八节点实体单元SOLID185模拟,剪力钉采用弹簧单元COMBIN14模拟,弹簧刚度取值为120 kN/mm^[1],UHPC层与钢面板交界面上非栓钉处,耦合UHPC底面与钢面板顶面的竖向位移以符合真实受力.材料参数取值:钢结构弹性模量取206 GPa,泊松比取0.3;UHPC层弹性模量取40.3 GPa,泊松比取0.2.为精确捕捉横桥向与纵桥向最不利加载位置,控制单元长度为50 mm,模型中共有1 116 586个节点,1 132 152个单元.约束钢箱梁节段模型两端截面所有自由度,箱梁中心线处的对称面采用对称约束,吊杆处的节点仅约束竖桥向的平动自由度,根据实测加载车辆轴重进行加载,采用瞬态分析方法,按5 km/h的速度从

模型一端匀速移动到另一端,每次横向移动100 mm.

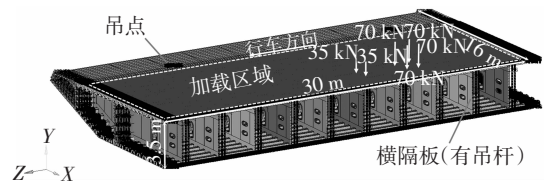


图12 局部有限元模型

Fig.12 Local finite element model

为更精细地模拟关注细节的应力状态,本文采用子模型技术建立了关注区域的实体单元模型,采用切割边界插值处理子模型的边界条件,并模拟了焊缝,根据局部模型跑车结果确定的最不利加载位置对子模型进行加载.子模型如图13所示.

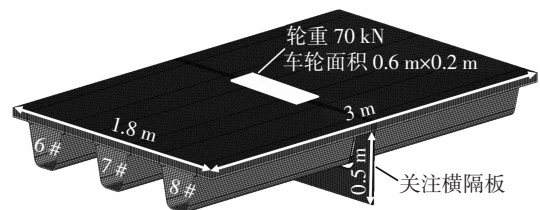


图13 子模型

Fig.13 Submodel

5.2 模型计算结果与对比分析

按照建立的分析模型和空间加载位置,从而获得了相应的应力结果,根据关注细节出现的最大最小应力值得到关注细节的应力幅结果,如表1所示.

表1 实测结果与有限元分析结果

Tab.1 Measured results and finite

| 细节 | 有限元模型计算结果 | | | 实测结果 | | |
|----|-------------------------------|------------------------------|------|-------------------------------|------------------------------|------|
| | $\Delta\sigma_{\text{steel}}$ | $\Delta\sigma_{\text{UHPC}}$ | 降幅/% | $\Delta\sigma_{\text{steel}}$ | $\Delta\sigma_{\text{UHPC}}$ | 降幅/% |
| ① | 33.4 | 10.6 | 68.3 | 25.8 | 6.4 | 75.4 |
| ② | 77.3 | 16.9 | 78.1 | 107.1 | 7.9 | 92.7 |
| ③ | 67.3 | 32.2 | 52.2 | 100.1 | 34.2 | 65.8 |
| ④ | 114.8 | 87.8 | 23.5 | 110.1 | 90.2 | 18.1 |
| ⑤ | 101.9 | 42.7 | 58.1 | 89.3 | 30.2 | 66.2 |
| ⑥ | 89.3 | 52.1 | 41.6 | 110.1 | 71.0 | 35.3 |
| ⑦ | 93.4 | 27.5 | 70.6 | 79.6 | 16.3 | 79.5 |
| ⑧ | 51.3 | 25.8 | 49.7 | 58.1 | 27.3 | 53.0 |
| ⑨ | 69.1 | 17.6 | 74.5 | 56.2 | 11.0 | 80.3 |

注:表中 $\Delta\sigma_{\text{steel}}$ 为铺设UHPC层前的细节疲劳应力幅; $\Delta\sigma_{\text{UHPC}}$ 为铺设UHPC层后的细节疲劳应力幅.

从表 1 中可以看出,对于面板上细节(1、2、7)铺设 UHPC 层后,无论是有限元结果还是实测结果,面板应力幅下降均较为明显;只是有限元分析的应力降幅比实测应力降幅略小,其原因可能是:由于沥青的弹性模量对温度很敏感,按偏保守的方式考虑,有限元模型中没有考虑 50 mm 沥青磨耗层的刚度贡献以及其对轮载的扩散作用,这样使得有限元计算结果略微偏大.对于肋板上细节,铺设 UHPC 层后细节 3 计算结果与实测结果比较吻合;细节 5 反映出的应力降幅与实测结果也比较相近;细节 9 应力幅计算结果比实测结果大,该处细节距离顶面较近,与面板上的细节类似,磨耗层的刚度贡献以及对轮载的扩散作用会影响该细节的计算应力.对于横隔板上细节,细节 4 计算结果与实测结果比较吻合;细节 6 计算结果比实测结果小,但是其降幅比例与实测比较一致;细节 8 应力幅计算结果比实测结果大,该处细节距离顶面较近,其原因与细节 9 类似.根据以上分析,节段有限元模型计算结果表现出与实测结果相同的趋势,进一步说明了 UHPC 层对轻型组合桥面各细节的应力响应的影响,同时随着细节离顶面距离越小,UHPC 层对细节应力的影响越大.

6 疲劳评估

根据 JTG D64-2015 《公路钢结构桥梁设计规范》对铺设 UHPC 层之后的轻型组合桥面进行疲劳评估^[15],需满足以下验算公式:

$$\gamma_{\text{Ft}}\Delta\sigma_{\text{E2}} \leq \frac{k_s\Delta\sigma_{\text{C}}}{\gamma_{\text{Mf}}} \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_{\text{E2}} = (1 + \Delta\phi)\gamma\Delta\sigma_{\text{p}} \quad (2)$$

式中: γ_{Ft} 为疲劳荷载分项系数,取 1.0; γ_{Mf} 为疲劳抗力分项系数,此处取 1.15; k_s 为尺寸效应折减系数,取 1.0; $\Delta\phi$ 为放大系数,取 1.0; $\Delta\sigma_{\text{p}}$ 将疲劳荷载按最不利情况加载于影响线得的应力幅(MPa),可通过实测 $\Delta\sigma_{\text{UHPC}}$ 根据加载车轴重和疲劳车轴重按比例折算得出; $\Delta\sigma_{\text{C}}$ 为疲劳细节对应于 2.0×10^6 次常幅疲劳循环的疲劳应力强度; $\Delta\sigma_{\text{E2}}$ 为按 2.0×10^6 次常幅疲劳循环换算得到的等效常值应力幅(MPa); γ 为损伤等效系数,对于本桥跨中细节 γ 取 1.935,对于本桥支座细节 γ 取 1.518.疲劳评估结果如表 2 所示.

表 2 疲劳评估结果表

| 细节 | 疲劳评估 | | | | 是否满足规范要求 |
|----|------------------------------|---------------------------|----------------------------|---|----------|
| | $\Delta\sigma_{\text{UHPC}}$ | $\Delta\sigma_{\text{p}}$ | $\Delta\sigma_{\text{E2}}$ | $k_s\Delta\sigma_{\text{C}}/\gamma_{\text{Mf}}$ | |
| ① | 6.4 | 5.5 | 10.5 | 74.1 | 是 |
| ② | 7.9 | 6.8 | 13.0 | 66.7 | 是 |
| ③ | 34.2 | 29.3 | 56.7 | 66.7 | 是 |
| ④ | 90.2 | 58.0 | 88.1 | 118.5 | 是 |
| ⑤ | 30.2 | 25.8 | 39.2 | 66.7 | 是 |
| ⑥ | 71.0 | 60.9 | 92.4 | 66.7 | 否 |
| ⑦ | 16.3 | 14.0 | 21.2 | 66.7 | 是 |
| ⑧ | 27.3 | 23.4 | 35.5 | 66.7 | 是 |
| ⑨ | 11.0 | 9.4 | 14.4 | 66.7 | 是 |

注:表中 $\Delta\sigma_{\text{p}}$ 对于非焊细节考虑了压应力 60%的折减.

从表 2 的结果可以看出,对于大部分疲劳细节能够满足规范疲劳强度的要求,但是对于离顶板稍远的细节(横隔板弧形切口起点位置)不满足规范要求.说明 UHPC 层对面板上疲劳细节的应力降幅有明显改善,但是对于离 UHPC 层较远的细节,其改善程度有限,需要进一步优化横隔板弧形切口的构造细节,以进一步提高横隔板弧形切口附近疲劳细节的抗疲劳性能.

7 结论

1)铺设 UHPC 层后,面板上疲劳细节应力幅降幅比例最大,高达 75%~90%,纵肋上疲劳细节应力降幅约为 65%~80%,横隔板上疲劳细节应力降幅约为 20%~50%,说明 UHPC 层对钢桥面典型细节疲劳应力幅降幅明显.

2)实测结果表明:随疲劳细节与顶面距离的减小,UHPC 层对细节应力降幅的贡献明显增大.节段有限元计算结果也较好地反映出这一趋势.

3)铺 UHPC 层后,横隔板弧形切口处的应力幅有所降低,但是其最大拉应力没有明显降低.另外,弧形切口起点位置细节是值得关注的细节,根据实测应力结果,该位置处的应力幅是焊接细节中最大

的,而规范中该处细节的允许应力幅又较低,因此该处细节为最危险细节.弧形切口附近影响细节应力幅大小的因素较多,因此有必要针对钢-UHPC 轻型组合桥面结构中弧形切口、弧形切口起点位置以及横隔板-纵肋焊缝端部这 3 类与弧形切口相关的细节进行深入研究.

本文虽对轻型组合桥面通过实测分析,表明了 UHPC 层能大大改善正交异性钢箱梁常规细节的疲劳寿命,但对于轻型组合桥面结构仍缺乏实桥长期监测数据,因此需要进一步研究.

参考文献

- [1] 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,2015:10—14,80—95.
SHAO X D, HU J H. The steel-UHPC lightweight composite bridge structure [M]. Beijing: China Communications Press,2015:10—14,80—95.(In Chinese)
- [2] KOLSTEIN M H. Fatigue classification of welded joints in orthotropic steel bridge decks [D]. Delft:Civil Engineering and Geosciences,Delft University of Technology,2007:1—12.
- [3] JONG F B P. Overview fatigue phenomenon in orthotropic bridge decks in the Netherlands [C]//Proceeding of 1st International Orthotropic Bridge Conference.Sacramento:IABSE,2004:489—512.
- [4] SHAO X D, YI D T, HUANG Z Y, *et al.* Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin RPC layer [J]. Journal of Bridge Engineering,2013,18(5):417—428.
- [5] 丁楠. 超高性能混凝土对轻型组合桥面结构疲劳寿命的影响研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院,2014:6—10.
DING N. Study on influence of ultra-high performance concrete on light-weighted composite bridge deck [D]. Changsha:College of Civil Engineering, Hunan University,2014:6—10.(In Chinese)
- [6] 陈斌,邵旭东,曹君辉.正交异性钢桥面疲劳开裂研究[J].工程力学,2012,29(12):170—174.
CHEN B, SHAO X D, CAO J H. Study of fatigue cracking for orthotropic steel bridge deck [J]. Engineering Mechanics,2012,29(12):170—174.(In Chinese)
- [7] 丁楠,邵旭东.轻型组合桥面板的疲劳性能研究[J]. 土木工程学报,2015,48(1):74—81.
DING N, SHAO X D. Study on fatigue performance of lightweight composite bridge deck [J]. China Civil Engineering Journal,2015,48(1):74—81.(In Chinese)
- [8] 李嘉,冯啸天,邵旭东,等.正交异性钢桥面-RPC薄层组合铺装体系研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2012,39(12):7—12.
LI J, FENG X T, SHAO X D, *et al.* Research on composite paving system with orthotropic steel bridge deck and thin RPC layer [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2012,39(12):7—12.(In Chinese)
- [9] 刘梦麟,邵旭东,张哲,等.正交异性钢板-超薄RPC组合桥面板结构的抗弯疲劳性能试验[J].公路交通科技,2012,29(10):46—53.
LIU M L, SHAO X D, ZHANG Z, *et al.* Experiment on flexural fatigue performance of composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultra-thin RPC layer [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2012,29(10):46—53.(In Chinese)
- [10] 张龙威,赵华,邵旭东.钢桥面疲劳细节的车辆动力冲击响应研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(11):26—32.
ZHANG L W, ZHAO H, SHAO X D. Vehicle-bridge interaction analysis of orthotropic steel deck bridge in fatigue details [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2016,43(11):26—32.(In Chinese)
- [11] ZHANG S H, SHAO X D, CAO J H, *et al.* Fatigue performance of a lightweight composite bridge deck with open ribs [J]. Journal of Bridge Engineering,2016,21(7):04016039.
- [12] SHAO X D, CAO J H. Fatigue assessment of steel-UHPC lightweight composite deck based on multi-scale FE analysis:case study [J]. Journal of Bridge Engineering,2018,23(1):05017015.
- [13] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].北京:人民交通出版社,2015:1—52.
JTG D60—2015 General specifications for design of highway bridges and culverts [S]. Beijing:China Communications Press,2015:1—52.(In Chinese)
- [14] CONNOR R, FISHER J, GATTI W, *et al.* Manual for design, construction, and maintenance of orthotropic steel deck bridges [R]. Washington DC: Department of Transportation Federal Highway Administration,2012:30—44,106—110.
- [15] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S].北京:人民交通出版社,2015:28—32.
JTG D64—2015 Specifications for design of highway steel bridge [S]. Beijing:China Communications Press,2015:28—32.(In Chinese)