

# 超高性能混凝土铺装层对钢桥面板 疲劳性能影响

赵秋<sup>1</sup>, 郭杨斌<sup>1</sup>, 陈孔生<sup>1</sup>, 林上顺<sup>1,2</sup>

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 福建工程学院土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要** 目的 以港珠澳大桥钢箱梁为例,在面板上增加一层超高性能混凝土形成钢-UHPC组合桥面板,分析超高性能混凝土层对钢桥面板各细节疲劳性能的影响。  
**方法** 利用有限元软件 ABAQUS 建立带 UHPC 铺装层和不带铺装层的局部钢箱梁节段模型。  
**结果** 对于加了 UHPC 铺装层的正交异性钢桥面板,纵肋与盖板连接处盖板纵向处的最不利细节横向位置及对应的最不利横向加载点均未发生变化;纵肋与盖板连接处纵肋纵向处、纵肋与横隔板连接处纵肋腹板处和纵肋与横隔板连接处横隔板腹板处的最不利细节横向位置未发生变化,但其对应的最不利横向加载点发生变化;横隔板腹板切口自由边和纵肋下缘对接焊缝处的最不利细节横向位置及对应的最不利横向加载位置均发生了变化。  
**结论** UHPC 层大幅度增加了钢桥面板的刚度,进而大大降低了各疲劳细节的应力幅水平,减少了各细节发生疲劳开裂的几率。

**关键词** 钢桥面板;超高性能混凝土;组合桥面板;疲劳应力;有限元模拟

中图分类号 TU318;U442

文献标志码 A

## Influence of Ultra-high Performance Concrete Pavement on Fatigue Performance of Steel Bridge Deck

ZHAO Qiu<sup>1</sup>, GUO Yangbin<sup>1</sup>, CHEN Kongsheng<sup>1</sup>, LIN Shangshun<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, China, 350116; 2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, China, 350108)

**Abstract:** In order to analyze the influence of ultra-high performance concrete layer on the fatigue performance of steel bridge deck, taking the steel box girder of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge as an example, a layer of ultra-high performance concrete was added to the panel to form a steel-UHPC composite deck. A partial steel box girder section model with UHPC pavement and without pavement layer was established by using finite element software ABAQUS. For the orthotropic steel bridge deck with UHPC pavement, the most disadvantageous detail transverse position and corresponding most disadvantageous transverse loading point at the longitudinal rib-to-cover con-

nection have not changed; the most disadvantageous detail transverse position of the longitudinal rib at the longitudinal rib-to-cover connection, the longitudinal rib web and diaphragm web at the longitudinal rib-to-diaphragm connection have not changed, but the corresponding most disadvantageous transverse loading point has changed; the most disadvantageous detail transverse position at the butt weld of the diaphragm web incision free edge and the longitudinal rib lower edge have changed, the corresponding most disadvantageous transverse loading position has also changed. UHPC layer greatly increases the stiffness of steel bridge deck, which greatly reduces the stress amplitude level of each fatigue detail and the probability of fatigue cracking of each detail.

**Key words:** steel bridge deck; ultra-high performance concrete; composite bridge deck; fatigue stress; finite element simulation

公路钢桥的桥面结构主要包括桥面铺装和钢桥面板两部分。而正交异性钢桥面板作为目前大跨径桥梁中一种常用的结构形式,具有自重轻、承载能力好、外形美观等优点<sup>[1-4]</sup>。但由于正交异性钢桥面板的受力十分复杂,疲劳问题较为突出,而正交异性钢桥面板一旦出现疲劳裂纹,将直接影响结构的受力性能和耐久性能<sup>[5]</sup>。且钢桥铺装有别于普通路面结构直接铺筑在半刚性基层之上,而是铺设于刚度较小的钢面板之上,与钢桥面结构共同承重,钢面板的变形与桥面铺装难以协调,导致钢桥面铺装的早期破坏和疲劳病害现象普遍存在<sup>[6-8]</sup>。

为解决钢桥面疲劳开裂和铺装易损坏的问题,国内外学者对正交异性钢桥面板及铺装层的疲劳性能进行了大量研究<sup>[9-10]</sup>。P. A. Tsakopoulos 等<sup>[11]</sup>以 Williamsburg 大桥和 Bronx-Whitestone 桥为背景对钢桥面板的疲劳性能进行了详细研究。翟幕赛等<sup>[12]</sup>研究了 ERS 铺装对钢桥面板疲劳应力的影响,结果表明 ERS 铺装降低了钢桥面板的疲劳应力,且气温和铺装层厚度对不同细节疲劳应力的影响差异显著。吴冲等<sup>[13]</sup>通过带桥面铺装的正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验和有限元模型分析,认为沥青混合料铺装刚度随着温度的升高迅速降低,导致铺装层下的正交异性钢桥面板受力迅速增加。刘世忠等<sup>[14]</sup>通过静载模型试验和疲劳模型试验分析表明,增设剪力钉辅以钢纤维混凝土过渡层的疲劳

性能明显优于沥青混凝土直接摊铺于钢箱梁顶板表面的桥面铺装。

上述研究成果并未完全解决钢桥面疲劳开裂和铺装易损坏的问题,因此,鉴于超高性能混凝土(UHPC)的高强度和高韧性<sup>[15-16]</sup>,在正交异性钢面板上设置 UHPC 层与沥青磨耗层,形成刚度更大的钢-UHPC 组合桥面板结构,桥面刚度的提高可降低结构对铺装的受力性能要求,同时 UHPC 的良好耐久性能和高抗拉强度,可以更好地保护钢桥面板和协调钢面板与铺装沥青磨耗层的变形<sup>[17-18]</sup>,有望解决钢桥面铺装层病害和正交异性钢桥面板疲劳开裂两个钢桥的重大难题<sup>[19]</sup>。

正交异性钢桥面板的受力是系统行为,桥面盖板与纵、横加劲肋和横隔板间相互作用相互影响,不能用简单的分析来解决钢桥面板的疲劳问题。例如,当增加横隔板的板厚时,虽会降低横隔板的面内应力,但同时会增加桥面板顺桥向的转动刚度,进而增加横隔板切口细节的面外应力<sup>[20]</sup>。因此,当采用增加桥面板刚度的 UHPC 铺装层时,是否一定对正交异性钢桥面板所有的疲劳细节产生有利影响,有必要进行系统分析。基于此,笔者以港珠澳大桥钢箱梁为例,采用通用有限元软件 ABAQUS,将超高性能混凝土铺装应用于该桥,分析超高性能混凝土层对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响。结果表明,UHPC 铺装层大幅度增加了钢桥面板的刚度,从而

大大降低了各疲劳细节的应力幅水平,减小了个细节疲劳开裂的几率.

1 有限元建模

1.1 疲劳细节

正交异性钢桥面板结构存在许多焊缝,这些焊缝发生疲劳破坏的薄弱区域,经过国内外学者的一系列研究,总结归纳出 6 个最容易发生疲劳裂纹的构造细节:①纵肋与盖板连接处盖板纵向裂缝;②纵肋与盖板连接处纵肋纵向焊缝;③纵肋与横隔板连接处纵肋腹板裂缝;④纵肋与横隔板连接处横隔板腹板裂缝;⑤横隔板腹板切口自由边裂缝;⑥纵肋下缘对接焊缝处裂缝<sup>[21-22]</sup>.

1.2 有限元模型

在文献[23]局部钢箱梁节段模型的基础上,在桥面板上加一层 50 mm 厚的 UHPC 层,采用实体单元 C3D8R 模拟. 钢材与 UHPC 材料的弹性模量分别为 210 000 MPa 和 42 600 MPa;泊松比分别为 0.3 和 0.2;密度分别为 7 850 kg/m<sup>3</sup> 和 2 700 kg/m<sup>3</sup>. 有限元模型如图 1 所示.

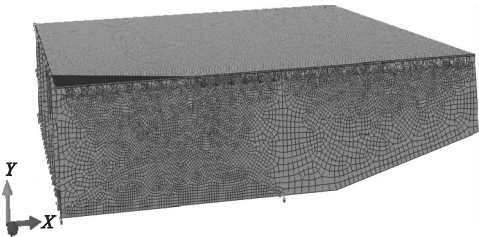


图 1 组合桥面板有限元模型

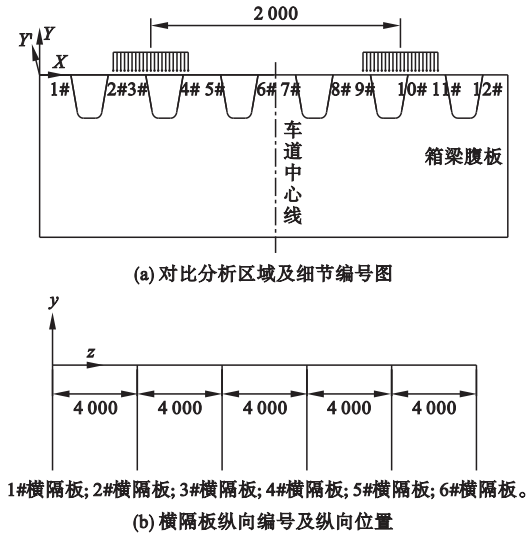
Fig. 1 Finite element model of the composite deck

2 UHPC 层对应力幅影响分析

从文献[24]分析可得,各疲劳细节的最不利细节的应力幅分析过程为:首先确定各个细节应力最大值纵向加载点位置;其次,在该纵向位置进行横向加载确定细节的最不利横向位置及对应的最不利加载位置;最后,在最不利横向加载位置进行纵向加载得到最不

利细节的纵向应力历程曲线,通过应力历程曲线计算该细节的应力幅.

对各细节在纯钢时与桥面板设置 UHPC 时求得的最不利细节应力幅进行对比分析,对比分析区域与各细节在横向上的编号和纵向横隔板编号及纵向位置(从左到右,最左边位置为 0 mm)如图 2 所示.



(a) 对比分析区域及细节编号图

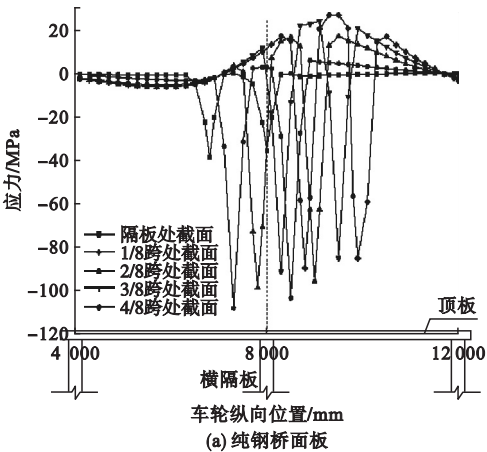
(b) 横隔板纵向编号及纵向位置

图 2 细节编号及横隔板纵向位置

Fig. 2 Detail number and longitudinal position of diaphragm

2.1 纵肋与盖板连接处盖板纵向裂缝

在车道横向车辆经过概率最大的位置(车辆中心线与车道中心线重合位置)进行双轴纵向加载,获得轮载正下方 3#细节应力最大值加载点位置. 细节应力历程如图 3 所示.



(a) 纯钢桥面板

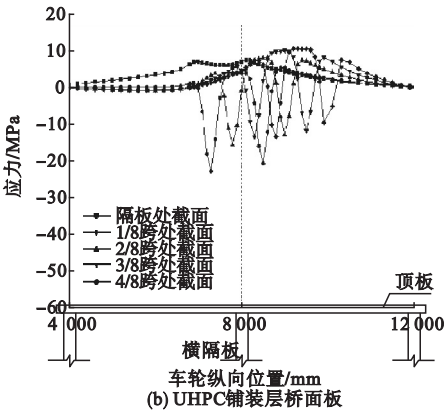


图3 不同情况下盖板细节应力历程曲线  
Fig.3 Stress history curves of the cover plate in different situations

由图3可知,纯钢情况下和设置UHPC铺装层时,纵肋与盖板连接处盖板细节的最不利截面均为1/8跨截面,其对应的最不利纵向加载点均为轮载位于1/8跨截面正上方时。

在最不利截面对应的最不利纵向加载点进行横向移动,确定各细节的横向最不利位置。经过分析,纯钢情况下和设置UHPC铺装层时,纵肋与盖板连接处盖板细节的横向最不利细节均为3#细节,对应的最不利横向加载位置分别为轮载中心位于3#细节所在U肋腹板正上方和3#细节所在U肋腹板正上方左侧50 mm处。

在对应最不利横向加载点位置进行纵向移动加载,得到最不利细节的纵向应力历程如图4所示。

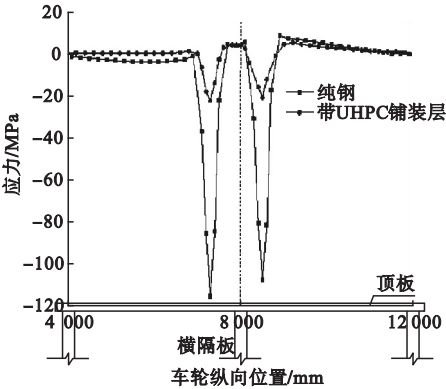


图4 纵肋与盖板连接处盖板最不利细节应力历程曲线  
Fig.4 The most unfavorable detail stress history curves of cover plate at the joint of longitudinal rib and cover plate

由图4可知,UHPC层的设置大幅度降低了纵肋与盖板连接处盖板细节的应力水平,最不利细节的应力幅从119.2MPa降为26.4MPa,降幅达到77.9%。

2.2 纵肋与盖板连接处纵肋纵向裂缝

在车辆中心线与车道中心线重合位置进行双轴纵向加载,获得轮载正下方3#细节应力最大值加载点位置。细节应力历程如图5所示。

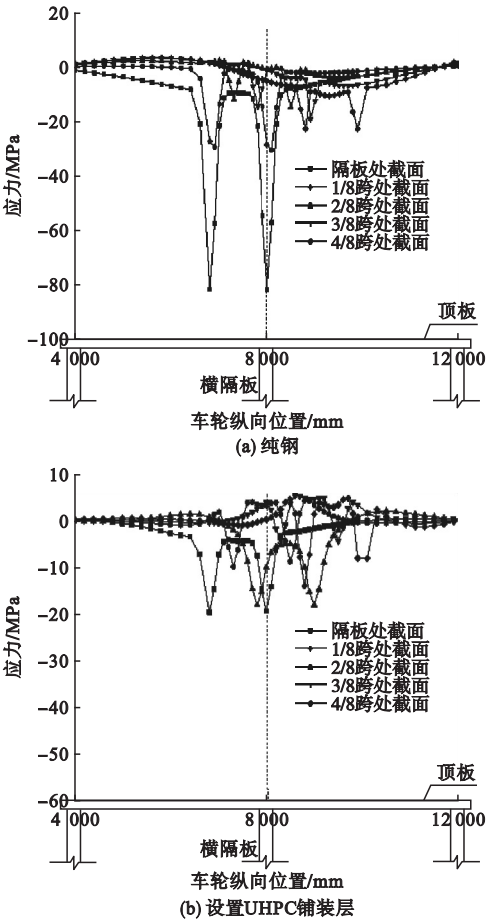


图5 不同情况下盖板细节应力历程曲线  
Fig.5 Stress history curves of the cover plate in different situations

由图5可知,纯钢情况下和设置UHPC铺装层时,纵肋与盖板连接处纵肋细节的最不利截面均为横隔板处截面,其对应的最不利纵向加载点均为轮载位于横隔板正上方时。

在最不利截面对应的最不利纵向加载点进行横向移动,确定各细节的横向最不利位置。经过分析,纯钢情况下和设置UHPC铺



装层时,纵肋与盖板连接处纵肋细节的横向最不利细节均为 10#细节,对应的最不利横向加载位置分别为轮载中心位于 9#细节所在 U 肋腹板正上方和 9#细节所在 U 肋腹板正上方右侧 50 mm 处。

在对应最不利横向加载点位置进行纵向移动加载,得到最不利细节的纵向应力历程如图 6 所示。

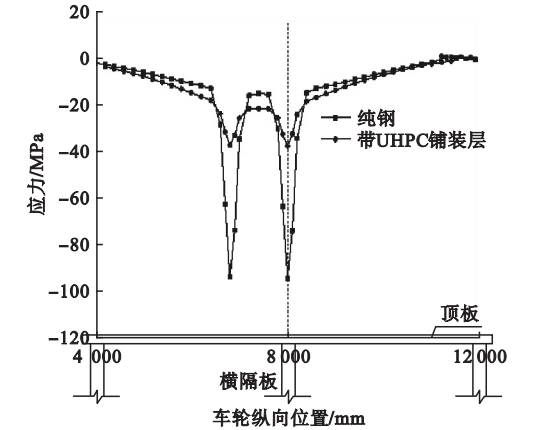


图 6 纵肋与盖板连接处纵肋最不利细节应力历程曲线

Fig. 6 The most unfavorable detail stress history curves of longitudinal rib at the joint of longitudinal rib and cover plate.

由图 6 可知,UHPC 层的设置大幅度降低了纵肋与盖板连接处纵肋细节的应力水平,最不利细节的应力幅从 94.5 MPa 降为 37.8 MPa,降幅达到 60%。

2.3 纵肋与横隔板连接处纵肋腹板裂缝

在车辆中心线与车道中心线重合位置进行双轴纵向加载,获得轮载正下方 3#细节应力最大值加载点位置. 细节应力历程如图 7 所示。

由图 7 可知,纯钢情况下和设置 UHPC 铺装层时,纵肋与横隔板连接处纵肋腹板细节的最不利纵向加载点均为轮载位于横隔板间 1/2 跨处;设置 UHPC 铺装层后,纵肋与隔板连接处纵肋腹板细节的应力幅降幅并不非常明显。

在最不利纵向加载点进行横向移动,确定细节的横向最不利位置. 经分析,纯钢情况

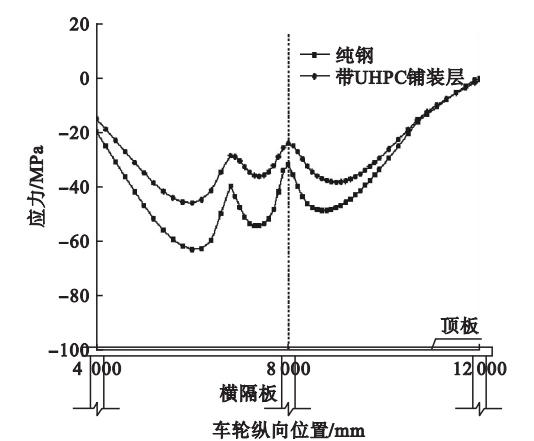


图 7 纵肋与横隔板连接处纵肋细节应力历程曲线

Fig. 7 Detail stress history curves of longitudinal rib at the joint of longitudinal rib and diaphragm

下和设置 UHPC 铺装层时,纵肋与横隔板连接处纵肋腹板细节的横向最不利细节均为 11#细节,对应的最不利横向加载位置分别为 11#细节所在 U 肋腹板正上方左侧 50 mm 处和 10#、11#细节所在 U 肋腹板间正上方。

在对应最不利横向加载点位置进行纵向移动加载,得到最不利细节的纵向应力历程如图 8 所示。

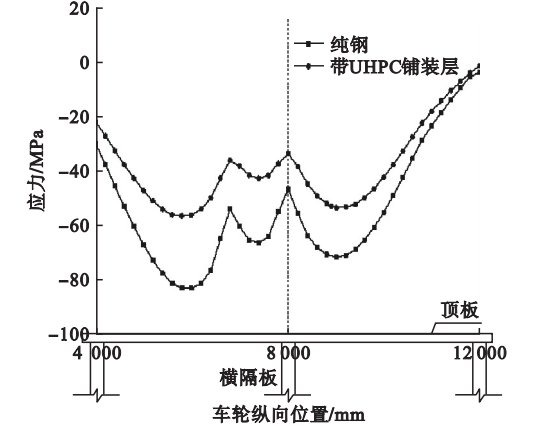


图 8 纵肋与横隔板连接处纵肋最不利细节应力历程曲线

Fig. 8 The most unfavorable detail stress history curves of longitudinal rib at the joint of longitudinal rib and diaphragm

由图 8 可知,UHPC 层对的纵肋与横隔板连接处纵肋腹板细节的应力幅降幅并不是非常显著,最不利细节的应力幅从 83.2MPa

降为 56.7MPa,降幅仅为 31.1%。

2.4 纵肋与横隔板连接处横隔板腹板裂缝

在车辆中心线与车道中心线重合位置进行双轴纵向加载,获得轮载正下方 3#细节应力最大值加载点位置. 细节应力历程如图 9 所示.

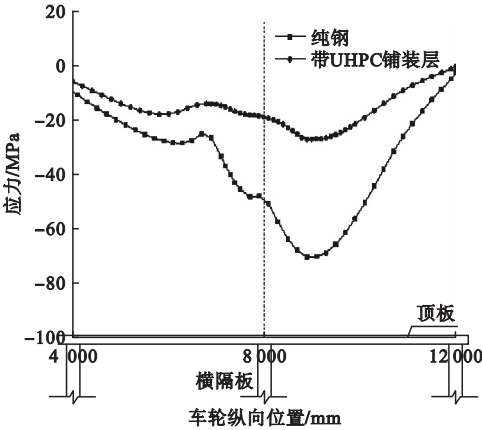


图 9 纵肋与横隔板连接处横隔板细节应力历程曲线

Fig. 9 Detail stress history curves of diaphragm at the joint of longitudinal rib and diaphragm

由图 9 可知,纯钢情况下和设置 UHPC 铺装层时,纵肋与横隔板连接处横隔板腹板细节的最不利纵向加载点均为轮载位于横隔板间 9/40 跨处;设置 UHPC 铺装层后,纵肋与横隔板连接处横隔板腹板细节的应力幅降幅较大.

在最不利截面对应的最不利纵向加载点进行横向移动,确定各细节的横向最不利位置. 经过分析,纯钢情况下和设置 UHPC 铺装层时,纵肋与横隔板连接处横隔板腹板细节的横向最不利细节均为 12#细节,对应的最不利横向加载位置分别为 11#细节所在 U 肋腹板正上方和 10#、11#细节所在 U 肋腹板间正上方.

在对应最不利横向加载点位置进行纵向移动加载,得到最不利细节的纵向应力历程如图 10 所示.

由图 10 可知,UHPC 层对的纵肋与横隔板连接处横隔板腹板细节的应力幅降幅并不是非常显著,最不利细节的应力幅从 78.1 MPa降为 44.8 MPa,降幅仅为 42.6%。

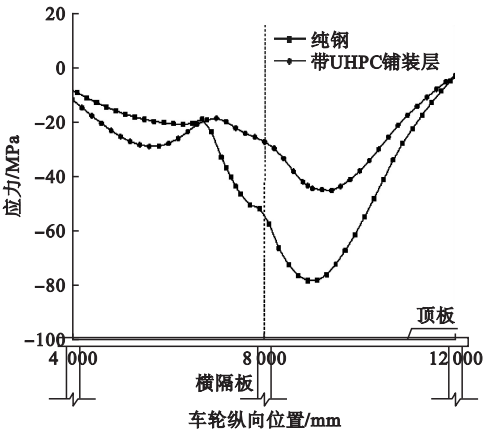


图 10 纵肋与横隔板连接处横隔板最不利细节应力历程曲线

Fig. 10 The most unfavorable detail stress history curves of diaphragm at the joint of longitudinal rib and diaphragm

2.5 横隔板腹板切口自由边裂缝

在车辆中心线与车道中心线重合位置进行双轴纵向加载,获得轮载正下方 3#细节应力最大值加载点位置. 细节应力历程如图 11 所示.

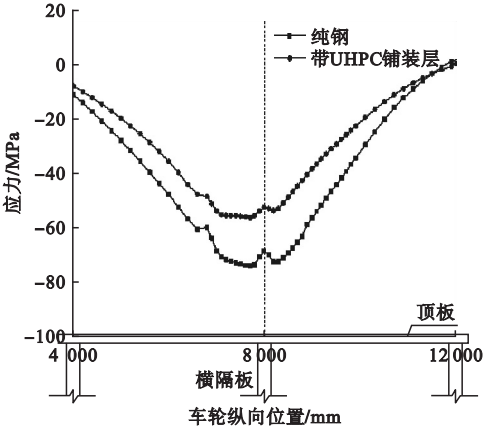


图 11 横隔板腹板切口细节应力历程曲线

Fig. 11 Detail stress history curves of diaphragm web incision

由图 11 可知,纯钢情况下和设置 UHPC 铺装层时,横隔板腹板切口细节的最不利纵向加载点均为轮载位于横隔板间 3/40 跨处;设置 UHPC 铺装层后,横隔板腹板切口细节的应力幅降幅相对较小.

在最不利截面对应的最不利纵向加载点进行横向移动,确定各细节的横向最不利位置. 经分析,纯钢情况下和设置 UHPC 铺装层时,横隔板腹板切口细节的横向最不利细节分别为

11#细节和9#细节,对应的最不利横向加载位置分别为11#细节所在U肋腹板正上方和9#细节所在U肋腹板正上方左侧50 mm处。

在对应最不利横向加载点位置进行纵向移动加载,得到最不利细节的纵向应力历程如图12所示。

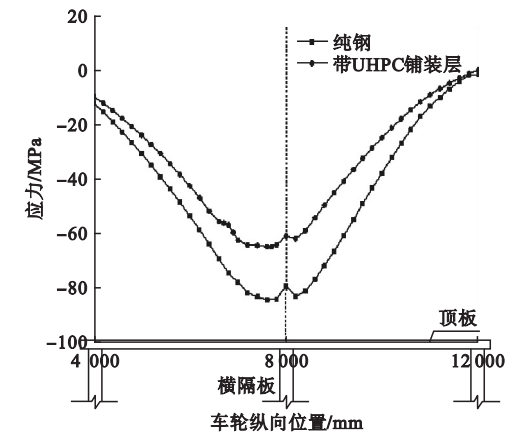


图12 横隔板腹板切口最不利细节应力历程曲线  
Fig. 12 The most unfavorable detail stress history curves of diaphragms web incision

由图12可知,UHPC层对的纵肋与横隔板连接处纵肋腹板细节的应力幅降幅并不是非常显著,最不利细节的应力幅从84.5MPa降为65.1MPa,降幅仅为22.9%。

研究认为,横隔板弧形切口处的面外应力宜控制在面内应力的25%以内,因此分别计算最不利细节的面内外应力历程如图13所示。

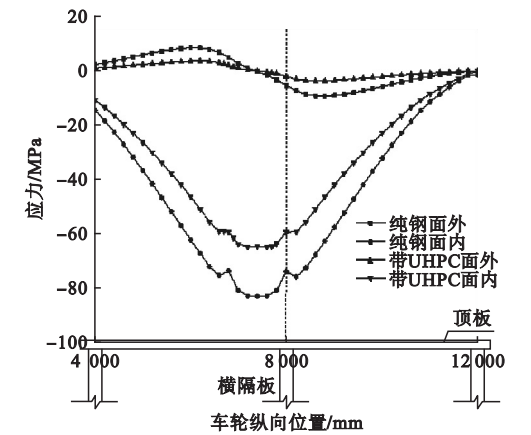


图13 横隔板腹板切口最不利细节面内外应力历程曲线  
Fig. 13 Surfaces internal and external stress history curves of the most unfavorable detail of diaphragms web incision

由图13可知,纯钢情况下和带UHPC铺装层时,横隔板弧形切口处的面外应力均远小于面内应力,其面外应力幅分别为15.8 MPa和7.4 MPa,面内应力幅分别为83 MPa和64.8 MPa,面外应力幅仅为面内应力幅的19%和11.4%,均小于25%。

2.6 纵肋下缘对接焊缝处裂缝

由文献[23]分析可知,纵肋对接细节的对不利截面为跨中处截面。在车辆中心线与车道中心线重合位置进行双轴纵向加载,获得轮载正下方横隔板间跨中处3#细节应力最大值加载点位置。细节应力历程如图14所示。

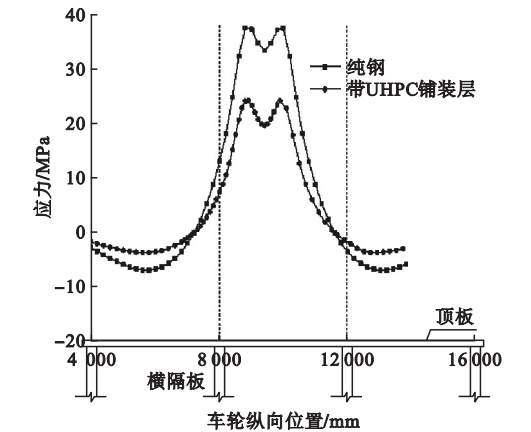


图14 纵肋对接细节应力历程曲线  
Fig. 14 Stress history curves of longitudinal rib butting details

由图14可知,纯钢情况下和设置UHPC铺装层时,纵肋对接细节的最不利纵向加载点均为轮载位于横隔板间3/40跨处;设置UHPC铺装层后,纵肋对接细节的应力幅降幅相对较小,其应力幅从44.3MP降为27.8MPa,降幅仅为37.6%。

在最不利截面对应的最不利纵向加载点进行横向移动,确定各细节的横向最不利位置,横向移动时50 mm为一个荷载步。经过分析,纯钢情况下和设置UHPC铺装层时,纵肋对接细节的横向最不利细节分别为2#细节和1#细节,对应的最不利横向加载位置分别为2#细节所在U肋正上方和1#细节所在U肋腹板正上方。

在对应最不利横向加载点位置进行纵向移动加载,得到最不利细节的纵向应力历程如图 15 所示。

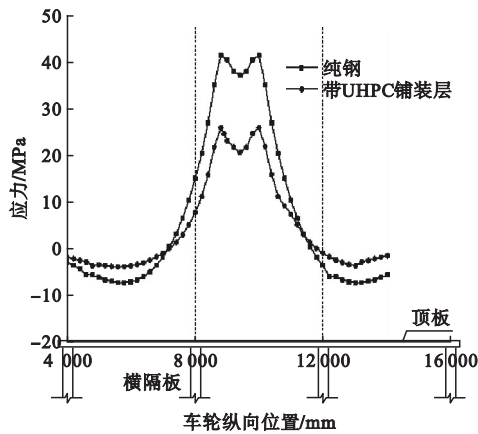


图 15 纵肋对接最不利细节应力历程曲线

Fig. 15 The most unfavorable detail stress history curves of longitudinal ribs butting

由图 15 可知,UHPC 层对纵肋对接细节的应力幅降幅并不是非常显著,最不利细节的应力幅从 48.8 MPa 降为 29.8 MPa,降幅仅为 39.1%。

3 结 论

(1)UHPC 层大幅度增加了钢桥面板的刚度,进而大大降低了各疲劳细节的应力幅水平,降低了各细节发生疲劳开裂的几率.其中对纵肋-盖板连接处细节的疲劳应力幅的影响极大,应力幅降幅在 60%~78%;应力幅降幅最小的是横隔板腹板切口自由边处细节,降幅为 22.9%。

(2)加上 UHPC 层后,细节①的最不利细节横向位置及对应的最不利横向加载点均未发生变化;细节②、③和④的最不利细节横向位置未发生变化,但其对应的最不利横向加载点发生变化;细节⑤和⑥的最不利细节横向位置及对应的最不利横向加载位置均发生了变化。

(3)超高性能混凝土铺装层和正交异性钢桥面板组成的钢-UHPC 组合桥面板结构的疲劳性能有明显的提高,从而显著地提高

了钢桥面板的安全性和耐久性。

参考文献

[1] TSAKOPOULOS P A, FISHER J W. Fatigue performance and design refinements of steel orthotropic deck panels based on full-scale laboratory tests [J]. Steel structures, 2005, (5):211-223.

[2] 王占飞,程浩波,程志彬,等. 桥面铺装对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(2):257-266.  
(WANG Zhanfei, CHENG Haobo, CHENG Zhibin, et al. Influence of pavement on fatigue performance of orthotropic steel deck [J]. Journal of Shenyang jianzhu university( natural science), 2018,34(2):257-266. )

[3] 邵旭东,曲宛桐,曹君辉,等. 带大 U 肋的轻型组合桥面板基本力学性能[J]. 中国公路学报,2018,31(8):94-103.  
(SHAO Xudong, QU Wantong, CAO Junhui, et al. Fundamental mechanical performance of lightweight composite bridge deck with large U-ribs [J]. China journal of highway and transport, 2018,31(8):94-103. )

[4] KONDA N, NISHIO M, ICHIMIYA M, et al. Development of fatigue test method and improvement of fatigue life by new functional steel plates for welding of trough rib and deck plate of orthotropic decks [J]. International journal of steel structures, 2013,13(1):191-197.

[5] 祝志文,文鹏翔,李健鹏,等. UHPC 铺装正交异性钢桥面板纵肋-面板焊缝构造细节的疲劳研究[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(4):926-932.  
(ZHU Zhiwen, WEN Pengxiang, LI Jianpeng, et al. Fatigue evaluation of rib-to-deck with UHPC overlay [J]. Journal of railway science and engineering, 2018,15(4):926-932. )

[6] SHAO X, YI D, HUANG Z, et al. Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultra-thin RPC layer [J]. Journal of bridge engineering, 2011,18(5):417-428.

[7] CONNOR R, FISHER J, GATTI W, et al. Manual for design, construction, and maintenance of orthotropic steel deck bridges [M]. US: US Department of Transportation Federal Highway Administration; FHWA-IF-12-027, 2012.

[8] 黄卫,刘振清. 大跨径钢桥面铺装设计理论与方法研究[J]. 土木工程学报,2005,38(1):51-59.  
(HUANG Wei, LIU Zhenqing. Research on theory and method of long-span steel bridges deck surfacing design [J]. China civil engineering journal, 2005,38(1):51-59. )

[9] 黄卫,林广平,钱振东,等. 正交异性钢桥面铺装层疲劳寿命的断裂力学分析[J]. 土木工程学报,2006,39(9):116-120.



- (HUANG Wei, LIN Guangping, QIAN Zhen-dong, et al. Fracture-mechanics analysis of the fatigue life of the pavement on orthotropic steel bridge deck[J]. China civil engineering journal, 2006, 39(9): 116-120.)
- [10] 李丽娟, 崔闯, 卜一之, 等. 铺装层对正交异性钢桥面板疲劳性能影响效应研究[J]. 世界桥梁, 2016, 44(5): 48-52.  
(LI Lijuan, CUI Chuang, BU Yizhi, et al. Effect of pavement layer on fatigue performance of orthotropic steel bridge deck [J]. World bridge, 2016, 44(5): 48-52.)
- [11] BATTISTA R C, PFEILA M S, CAVALHO E M L. Fatigue life estimates for a slender orthotropic steel deck[J]. Journal of constructional steel research, 2008, 64(1): 134-143.
- [12] 翟幕赛, 王春生, 瞿天宇, 等. ERS 铺装层对钢桥面板疲劳应力影响的测试与分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(2): 69-74.  
(ZHAI Musai, WANG Chunsheng, QU Tianyu, et al. Test and analysis of influence of ERS pavement on fatigue stress of steel bridge deck [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2017, 34(2): 69-74.)
- [13] 吴冲, 刘海燕, 张志宏, 等. 桥面铺装温度对正交异性钢桥面板疲劳的影响[J]. 同济大学学报, 2013, 41(8): 1213-1218.  
(WU Chong, LIU Haiyan, ZHANG Zhihong, et al. Influence of pavements temperature on fatigue life of orthotropic deck of steel bridge [J]. Journal of tongji university (natural science), 2013, 41(8): 1213-1218.)
- [14] 刘世忠, 冀伟, 毛亚娜, 等. 鱼腹式钢箱梁正交异性钢桥面板复合铺装层有限元分析及试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊): 128-134.  
(LIU Shizhong, JI Wei, MAO Yana, et al. Finite element analysis and test research on fish-bellied steel box beam with orthotropic deck and composite pavement[J]. China civil engineering journal, 2011, 44(S): 128-134.)
- [15] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.  
(CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of research on ultra-high performance concrete [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2014, 31(3): 1-24.)
- [16] SHI C J, MO Y L. High-performance construction materials: science and applications [M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2008.
- [17] 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 Jia, FENG Xiaotian, SHAO Xudong, 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.)
- [18] 赵秋, 陈平, 陈宝春, 等. 装配式钢-UHPC 组合桥面板设计研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(1): 94-100.  
(ZHAO Qiu, CHEN Ping, CHEN Baochun, et al. Study of trial design and performance of assembled steel and UHPC composite bridge deck [J]. Bridge construction, 2018, 48(1): 94-100.)
- [19] UNTERWEGER H, NOVAK F. Strengthening of orthotropic steel decks using UHPC-concrete for additional at least 50 years in service[J]. Ce/papers, 2016, 85(10): 686-698.
- [20] AASHTO. AASHTO LRFD bridge design specifications; LRFDUS-5 [S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [21] 钱冬生. 关于正交异性钢桥面板的疲劳-对英国在加固其塞文桥渡时所做的研究的评价[J]. 桥梁建设, 1996(2): 8-10.  
(QIAN Dongsheng. Fatigue of orthotropic steel deck- evaluation of the research done by the UK in strengthening its severn bridge crossing. [J]. Bridge construction, 1996(2): 8-10.)
- [22] 曾志斌. 正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹分类及其原因分析[J]. 钢结构, 2011, 26(2): 9-15.  
(ZENG Zhibin. Classification and reasons of typical fatigue cracks in orthotropic steel deck [J]. Steel construction, 2011, 26(2): 9-15.)
- [23] 赵秋, 陈孔生. 钢桥面板 U 肋-顶板连接焊缝疲劳细节分析方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(1): 53-65.  
(ZHAO Qiu, CHEN Kongsheng. Analysis method for fatigue details of U-rib to deck welded joint in steel bridge deck. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(1): 53-65.)
- [24] NIEMI E. Fatigue analysis of welded components-designer's guide to the structural hot-spot stress approach [M]. Sawston: Woodhead Publishing Limited, 2006.  
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)