

实桥加载下钢桥面超高性能混凝土铺装力学响应

叶 奋, 宋卿卿

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为获取钢桥面超高性能混凝土铺装真实力学响应情况,对上海市同济路钢桥进行现场加载试验,分析铺装层在静载、动载以及运营期下的应变响应特征。结果表明,静载下铺装层最大拉应变在U型肋侧边上方铺装层顶,纵向距横隔板0.25 m处,方向为横向,值为 25.1×10^{-6} ;动载下铺装层的动态响应特征与钢桥沥青铺装的特征不同,超高性能混凝土铺装仅拉应变随加载速度增加而减小,且应变动态响应曲线具有3种波形,并随速度增加呈现3类变化特征;运营期铺装层拉应变极值明显大于静载结果,但动态响应特征与动载结果一致。

关键词: 钢桥面铺装;超高性能混凝土;现场试验;力学响应;动态响应

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

pavement under dynamic load are different from those of steel bridge asphalt pavement. The tensile strain value of UHPC pavement only decreases with the increase of loading speed. And the dynamic response curve of strain has three kinds of waveforms, and shows three kinds of changing characteristics with the increase of velocity. During operation period, the extreme value of the tensile strain of UHPC pavement is obviously larger than that of static load, but the dynamic response characteristics are consistent with those of dynamic load.

Key words: steel bridge pavement; ultra-high performance concrete; field test; mechanical response; dynamic response

Mechanical Response of Ultra-high Performance Concrete Pavement for Steel Bridge Deck Under Real Bridge Loading

YE Fen, SONG Qingqing

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to obtain the true mechanical response of UHPC (ultra-high performance concrete) pavement of steel bridge deck, a field loading test was carried out on Tongji Road steel bridge in Shanghai. The strain response characteristics of pavement under static load, dynamic load and in operation period were analyzed. Results show that the maximum tensile strain area of the pavement layer is on the top of the pavement layer which is above the U-shaped rib side, and 0.25 m from the diaphragm plate longitudinally. The direction of the maximum tensile strain, with a value of 25.1×10^{-6} , is transverse. The dynamic response characteristics of UHPC

钢桥面铺装,在轮载下需要追随桥面板的变形,因此容易发生变形过大,从而出现病害^[1]。相较于道路铺装,钢桥面铺装的受力更加复杂,因此对钢桥面铺装的真实力学响应研究成为桥面铺装设计体系中的重点^[2]。近些年超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)在钢桥铺装中得到了应用,它在满足钢桥面铺装性能要求的同时还能增强桥面板的抗疲劳性能^[3-4]。对UHPC铺装的真实力学响应进行研究,有助于钢桥面UHPC铺装的设计与推广。

目前对钢桥面铺装力学响应的研究主要有三种方式:一是采用力学计算或数值模拟^[5],缺点是缺少与铺装实际内力的对比,为理论计算结果;二是采用室内加速加载进行缩尺模型试验^[6-7],缺点是受力与实际受力存在一定差距;三是通过实桥加载,采用埋入传感器获取实桥的力学响应特征,该方法需要现场试验,因此研究结果相对较少。2013年,张德佳等^[8]在上海蕴藻浜大桥中通过埋入光纤传感器对钢桥面沥青铺装的静载

收稿日期: 2019-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(51568064);乌鲁木齐市建设科技项目(201803)

第一作者: 叶 奋(1970—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为道路铺装材料研发与桥面铺装技术。

E-mail: yefen@tongji.edu.cn

通信作者: 宋卿卿(1987—),男,博士生,主要研究方向为道路铺装材料研发与桥面铺装技术。

E-mail: 1410733@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

力学响应特征进行了研究,并据此修正了数值计算模型。2014年,武金婷等^[9]在上海昌吉东路钢桥铺装上埋入光纤传感器,分析了钢桥沥青铺装的动态力学响应特征。2018年,程怀磊等^[2]通过在铺装中埋入电阻式传感器,总结了钢桥沥青铺装在不同工作温度下的动态力学响应特征,发现温度会改变沥青铺装的动态力学响应特征,从而为钢桥沥青铺装室内加载试验参数的确定提供依据。

综合来看,基于实桥加载试验对钢桥面铺装力学响应特征的研究相对较少,并且这些研究主要集中在钢桥面沥青铺装,而钢桥面UHPC铺装与钢桥面沥青铺装的受力响应特征可能并不相同。针对这些问题,本文在上海市同济路立交钢桥面铺装大修过程中,通过在铺装层预先埋入光纤应变传感器并进行现场加载试验,实测获取钢桥面UHPC铺装的应变响应数据。根据这些数据,对钢桥面UHPC铺装的静动载下的力学响应特征进行分析。

1 试验概况

同济路立交钢桥为连续钢箱梁桥,宽9.05 m,单跨长24.50 m。桥面板为正交异性结构,板厚16 mm;横隔板间距4 m,板厚10 mm;U型肋间距60 mm,厚8 mm。

1.1 UHPC铺装以及材料简介

铺装方案为80 mm厚的UHPC铺装,内设抗剪钉(直径16 mm、长45 mm),间距为400 mm×400 mm;铺设钢筋直径为12 mm的钢筋网,钢筋网间距40 mm×40 mm;表面刻痕,刻痕深5 mm、宽5 mm,槽中心距22 mm,如图1所示。UHPC的基体配合比如表1所示,钢纤维的体积掺量为2.5%。所用UHPC表观为粉体,具有类自流平的流动性能,无需高压蒸汽养护。采用GB/T17671—1999测得1 d抗压强度大于60 MPa,3 d抗压强度大于131 MPa,28 d抗压强度大于192 MPa。采用GB/T31387—2015测得其抗弯拉强度大于25 MPa。采用DL/T5193—2004测得其轴拉强度大于11 MPa。采用GB/T31387测得其弹性模量为48 GPa。

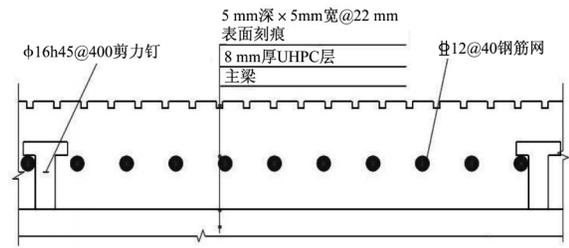


图1 钢桥面UHPC铺装结构示意图

Fig.1 Structure diagram of UHPC pavement on steel bridge deck

表1 UHPC材料基体的配合比

Tab.1 Mix proportions of UHPC material matrix

原材料	水泥/kg	硅灰/kg	石英砂/kg	活性填料/kg	减水减缩剂/kg	水/kg
配合比	1	0.3	1.34	0.3	0.005	0.2

1.2 传感器的埋设与实桥加载试验方案

1.2.1 传感器埋设位置的确定步骤

(1)有限元建模确定铺装层应变极值分布。采用有限元软件ANSYS进行实桥局部建模分析。建模时假设铺装层为连续均匀各向同性的弹性体,层间为完全连续接触。荷载采用等效双轮矩形荷载模拟,大小为0.7 MPa,如图2所示。为了保证计算精度,横断面尺寸与实桥断面尺寸一致,同时根据本课题组研究成果^[8],纵向上取3个横隔板跨度,加载位置网格尺寸取为0.01 m。边界条件为腹板底部、横隔板底部全约束,端部简支约束。采用壳单元(shell 63)模拟钢桥面板,实体单元(solid 45)模拟UHPC铺装层。不考虑层间的相对滑动,通过耦合两个单元界面处的位移模拟层间连接。模型参数如表2所示,建立的模型如图3所示。

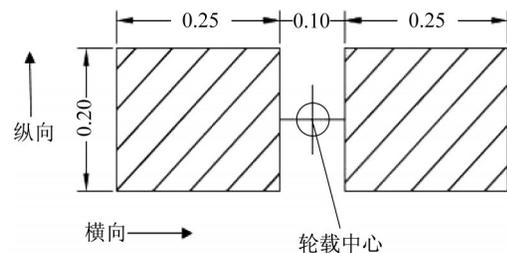


图2 等效双轮均布荷载平面图(单位:m)

Fig.2 Equivalent double-type uniform load(unit:m)

表2 有限元模型计算参数

Tab.2 Calculation parameters of finite element model

计算参数	钢桥面板厚/mm	钢弹性模量/GPa	钢泊松比	横隔板间距/mm	横隔板厚/mm	U型肋上口宽/mm	U型肋高/mm	U型肋厚/mm	U型肋间距/mm	铺装层厚/mm	UHPC弹性模量/GPa	UHPC泊松比
数值	16	210	0.3	4000	10	320	280	8	600	80	48	0.25

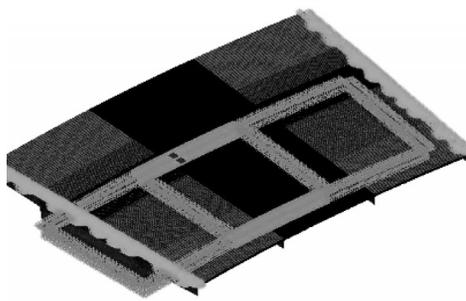


图3 三维有限元模型

Fig.3 3D finite element model

(2)最不利加载位置确定。变换荷载在横断面的横向位置(此时纵向为横隔板正上方),如图4所示,共13种位置。对比各位置结果,得到横向最不利加载为位置5。横向保持该位置,纵向从距第3横隔板800 mm处开始,间隔350 mm向前递增,至距第4横隔板1150 mm处结束(图5),共12个位置,得到纵向最不利加载为位置4。

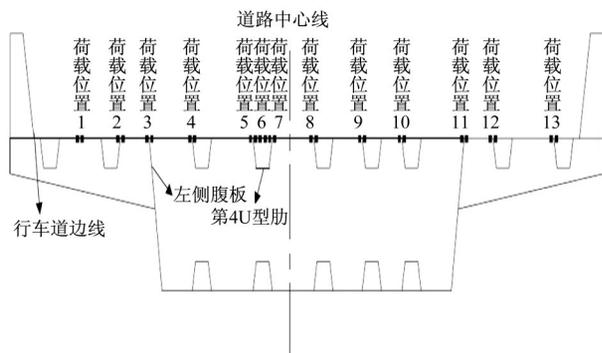


图4 有限元模拟的横向加载位置

Fig.4 Transverse loading position of finite element simulation

(3)传感器埋设方案。最不利位置加载下有限元计算得到铺装层最大拉应变为横向,值为 25.7×10^{-6} ,出现在纵向距横隔板的0.25 m横断面处(记作断面A)、双轮矩形荷载中间正下方铺装层顶;最大挠度(0.479 mm)出现在两横隔板跨中横断面处(记为断面B)。因此选取断面A与断面B作为传感器埋设断面,传感器布设于轮载下方的铺装层内,每个断面上埋设6个传感器(1#~6#),两断面共计12个传感器,横向、竖向布置示意如图6所示、纵向布置

如图7所示。

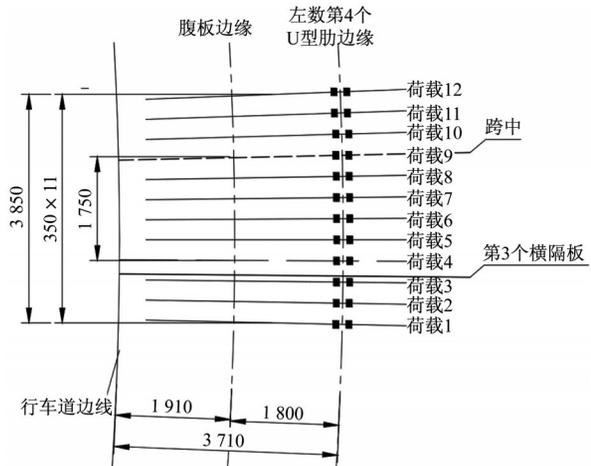


图5 有限元模拟的纵向加载位置(单位:mm)

Fig.5 Longitudinal loading position of finite element simulation(unit: mm)

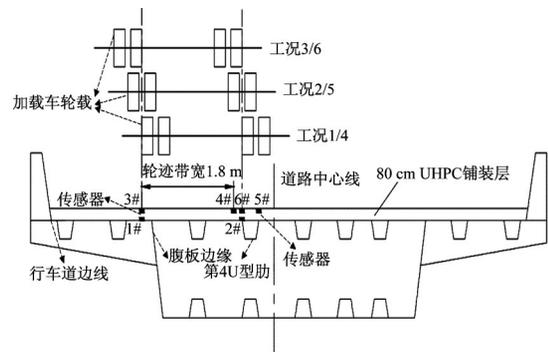


图6 横向与竖向传感器布置及横向实桥加载试验方案

Fig.6 Arrangement of transverse and longitudinal sensors and scheme of transverse real bridge loading test

(4)传感器选用光纤应变传感器,采集频率为100 Hz。传感器的应变计算公式如下:

$$\epsilon = \frac{(\lambda_1 - \lambda_0)}{\alpha} \times 1000 \quad (1)$$

式中: ϵ 为应变值; λ_0 为传感器初始波长,m; λ_1 为传感器实测波长,m; α 应变灵敏度, $10^{-12} \text{ m} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ 。

1.2.2 实桥加载试验方案

试验分为静载、动载、运营期三种加载方案,加载车为东风牌中型货车,通过装载沙袋控制后轮双轮组接地压强为0.7 MPa,加载车参数见表3。

表3 加载车辆参数表

Tab.3 Parameters of loading vehicle

位置	左轮轴重/kg	右轮轴重/kg	轮胎接地面积/(cm×cm)	轮胎压强/MPa	前后轴距/m	左右轮间距/m
前	790	840	22×12	0.31	4	1.8
后	5 010	5 020	22×16	0.71		

(1)静载加载试验方案。静载加载分为横向、纵向两种加载方案。横向加载时每断面上各有三种加载工况,分别为加载车的右侧双轮组轮隙中心位于第4U型肋左100 mm、U型肋左上方和U型肋右100 mm。A断面工况记为工况1、2、3,B断面工况记为工况4、5、6,如图6所示。纵向加载与有限元加载方法保持一致,即横向上保持加载车辆右侧双轮轮隙中心位于第4U型肋边缘,纵向上加载车行驶至距横隔板800 mm处熄火停止,记为工况1,之后加载车以间隔350 mm沿U型肋左边缘向前递增前进并熄火进行试验,至距下个横隔板1 150 mm处完毕,共12种工况,如图7所示,试验时每工况采集3 min。

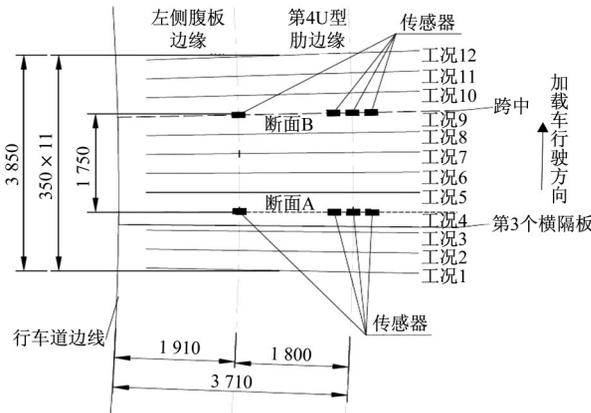


图7 纵向传感器布置与纵向实桥加载试验方案(单位:mm)
Fig.7 Arrangement of longitudinal sensors and scheme of longitudinal real bridge loading test (unit: mm)

(2)动载加载试验方案。加载速度分别选择20、30和40 km·h⁻¹进行试验,车辆沿静载纵桥向加载的轮迹线行驶,匀速通过两个断面,为降低变异性,每种车速加载三次取均值进行分析。

(3)运营期加载。获取运营状态下的数据,选择某工作日的13:00~15:00连续测取。

2 试验结果分析

2.1 铺装静载力学响应结果分析

2.1.1 传感器实测的有效性与可行性验证

为验证传感器数据的有效性与可行性,将最不利加载位置下A断面的实测结果与有限元结果进行对比,并计算误差 Δ ,如表4所示。结果显示,实测结果与有限元计算结果接近,最大拉应变结果误差仅为1.9%,因此采用应变传感器进行实测是有效可行的。

$$\Delta = \left| \frac{\text{实测值} - \text{计算值}}{\text{计算值}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

表4 数值分析结果与实测结果对比

Tab.4 Comparison between numerical analysis result and field test result

传感器编号	拉应变/ 10^{-6}		$\Delta/\%$
	有限元结果	实测结果	
1#	-0.9	-0.8	11.1
2#	1.6	1.5	6.3
3#	-1.3	-1.1	15.4
4#	-4.3	-3.9	9.3
5#	13.5	13.3	1.5
6#	25.6	25.1	1.9

2.1.2 横向静载加载试验结果分析

横向静载加载下断面A、B的实测结果如图8、9所示。结果表明,断面A的6#传感器在工况2测得最大拉应变(25.1×10^{-6}),该处为铺装层拉应变峰值所在位置。断面B的6#传感器在工况5时也为该断面拉应变极值,这表明横向加载时双轮荷载骑跨U型肋边为最不利加载方式。

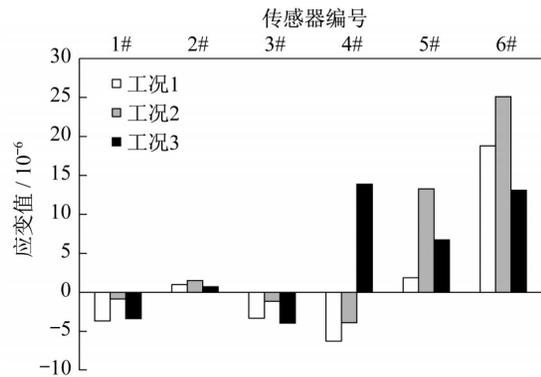


图8 A断面处横向静载试验结果
Fig.8 Results of transverse static load test at section A

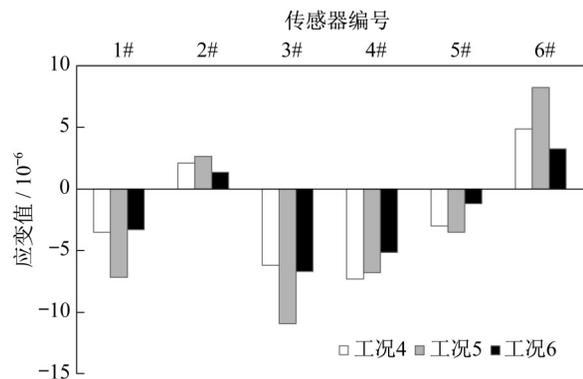


图9 B断面处横向静载试验结果
Fig.9 Results of transverse static load test at section B

2.1.3 纵向静载加载结果分析

纵向静载加载下断面A、B的实测结果分别如图10、11所示。结果表明,断面A在工况4产生最大拉应变(6#传感器, 25.1×10^{-6})。断面B在工况10产生该断面的最大拉应变(6#传感器, 8.2×10^{-6})。结合两断面的位置,对比两断面的结果可知,断面A的应变结果大于断面B的,因此纵向上距横隔板0.25 m为纵向最不利加载位置。

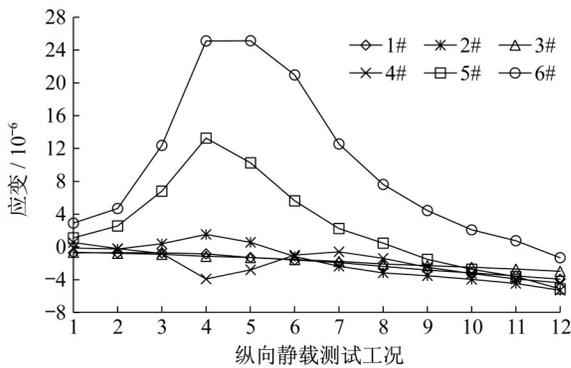


图10 A断面处纵向静载试验结果

Fig.10 Results of longitudinal static load test at section A

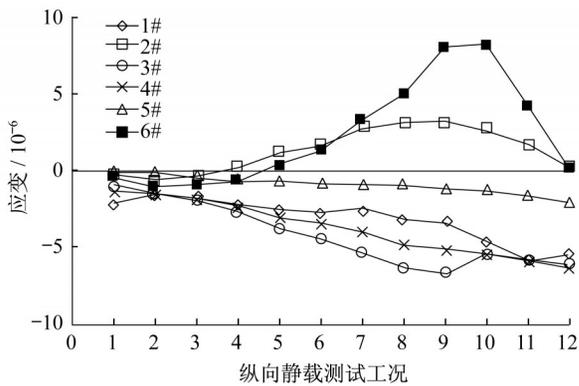


图11 B断面处纵向静载试验结果

Fig.11 Results of longitudinal static load test at section B

2.1.4 静载结果综合分析

- (1)UHPC 铺装静载最不利加载为双轮荷载横向骑跨U型肋边,纵向上距横隔板0.25 m。
- (2)最不利加载下铺装最大横向拉应变为 25.1×10^{-6} ,位于双轮荷载中心下方、铺装层顶。
- (3)横隔板处铺装层的拉应变区域大于跨中断面处拉应变区域。
- (4)最大拉应变实测结果与有限元结果接近、位置相同。

2.2 铺装动载力学响应结果分析

2.2.1 加载速度对铺装受力影响

不同加载速度下断面A、B的试验结果如图12、13所示。由图12、13可知:

(1)实测拉应变值均随加载速度的增加而减小,且拉应变值越大该规律越明显。

(2)加载速度为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,铺装层的最大拉应变为 12.5×10^{-6} ,相较于静载值(25.1×10^{-6})降幅达到50%。

(3)压应变值随加载速度的增加未表现出明显规律,这与钢桥面沥青铺装的速度越大,拉压应变越小的规律^[2,9]并不一致,这是由于UHPC铺装层弹性模量较大引起的。

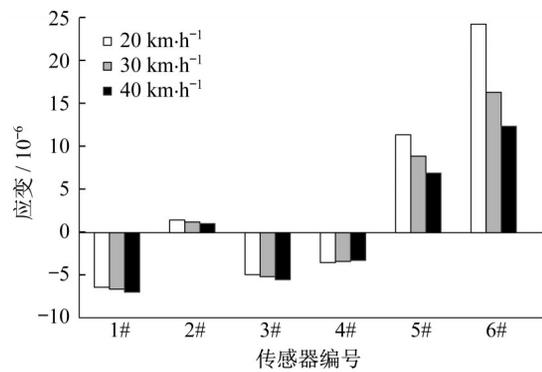


图12 A断面处不同速度下动载试验结果

Fig.12 Dynamic load test results at different speeds at section A

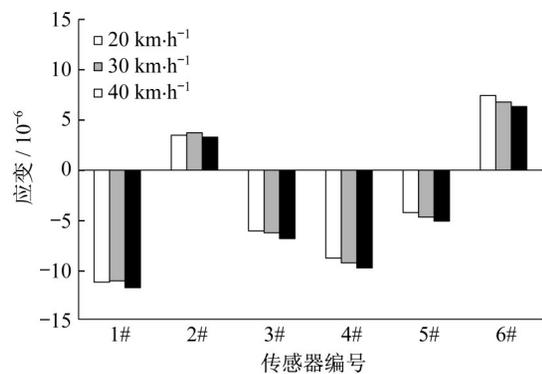


图13 B断面处不同速度下动载试验结果

Fig.13 Dynamic load test results at different speeds at section B

2.2.2 铺装层动态响应曲线特征分析

动载加载下铺装层的应变与加载时间所呈现的曲线为动态响应曲线。随着加载速度的变化,铺装层的动态响应曲线会发生变化,将变化规律进行归类后得到三类变化形式。第一类为A断面6#传感器处的变化形式(图14),称为第一类拉应变动态响

应曲线。第二类为 A 断面 5#传感器的变化形式(图 15),称为第二类拉应变动态响应曲线,A 断面 2#传感器、B 断面 2#、6#传感器符合该规律。第三类为压应变的动态响应曲线变化规律,以 A 断面 4#传感器为例(图 16),称为压应变动态响应曲线。由图 14~16 发现,这些曲线共有三种波形,第一种为拉应变的单峰波形(图 17);第二种为拉应变的双峰波形(图 18);第三种为压应变的峰谷交替波形(图 19)。

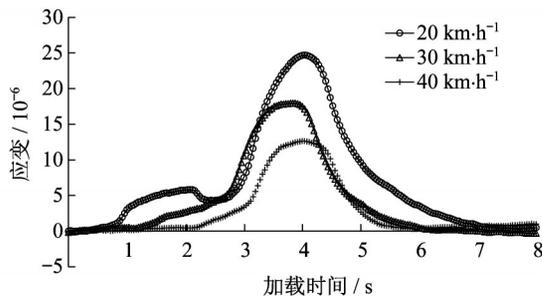


图 14 第一类拉应变动态响应特征曲线
Fig.14 Dynamic response characteristic curve of the first type of tensile strain

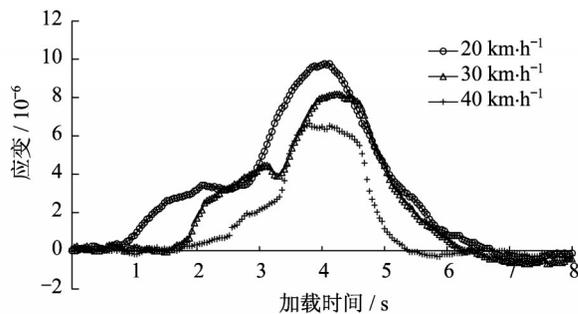


图 15 第二类拉应变动态响应特征曲线
Fig.15 Dynamic response characteristic curve of the second type of tensile strain

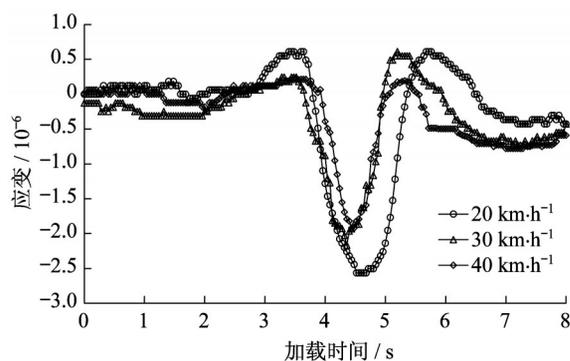


图 16 压应变动态响应特征曲线
Fig.16 Dynamic response characteristic curve of pressure strain

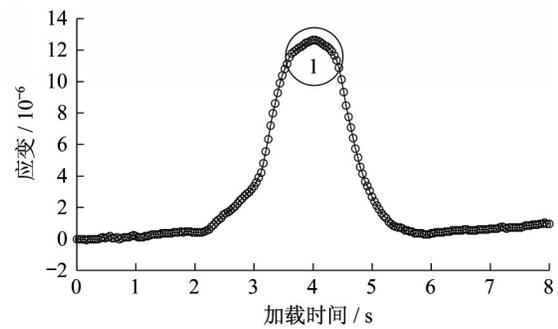


图 17 拉应变的单峰波形
Fig.17 Single peak waveform of tensile strain

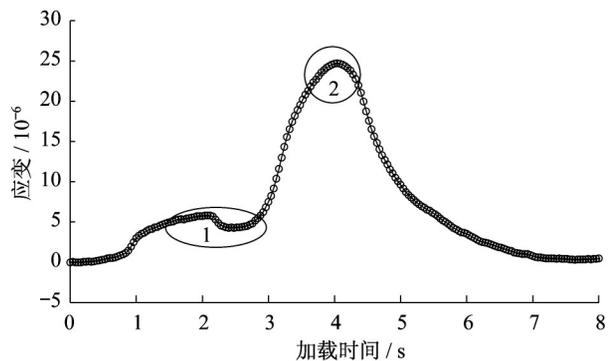


图 18 拉应变的双峰波形
Fig.18 Bimodal waveform of tensile strain

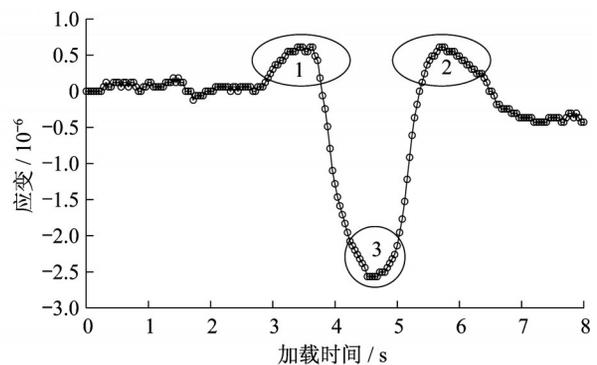


图 19 压应变的峰谷交替波形
Fig.19 Peak valley alternation wave form of pressure strain

根据试验结果可知:①第一类拉应变动态响应曲线在低速阶段($\leq 20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)呈现出双峰波形,随加载速度增加,向单峰波形转变。②第二类拉应变动态响应曲线在加载速度 $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以内仍为双峰波形,双峰向单峰转变趋势不明显。③压应变动态响应曲线随加载速度增加,峰值逐渐减小。④引起动态曲线波形变化的因素为加载速度与铺装层弹性模量:随铺装层弹性模量、加载速度增大,波形由双峰向单峰转化,峰值减小。

动态响应曲线的双峰波形、峰谷交替波形已在钢桥面沥青铺装中被发现^[2,9],但单峰波形却是UHPC铺装独有的。原因为双峰波形是车辆前后轮先后经过引起的,而UHPC铺装弹性模量远大于沥青铺装,在加载速度较大时,前轮引起UHPC铺装的变形很小,从而演变为只有后轮引起的单峰波形。由于单峰波形出现在铺装层的最大拉应变位置,因此UHPC铺装相对于沥青铺装,其最大位置处的受力频次得到了减少。

2.3 铺装运营期力学响应结果分析

运营期社会车辆的轴载、轮迹线具有不确定性,传感器所测数据波动性大,单个传感器所测数据如图20所示。由图20可知传感器测得很多波峰,将最

大的波峰取出作为代表值分析运营期铺装层的试验结果,并与动静载结果进行对比,结果如表4所示。

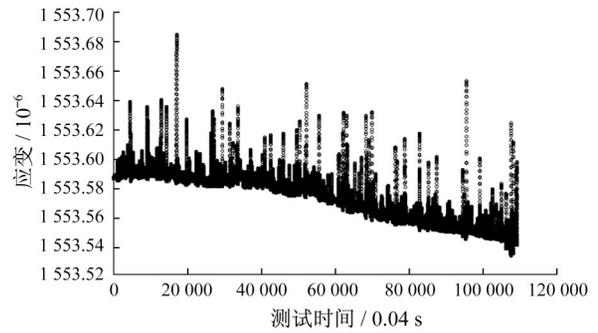


图20 运营期传感器所测数据示例

Fig.20 Sample data measured by sensors in operation period

表4 运营期与静载以及动载试验结果对比

Tab.4 Comparison of test results between operation period, static load and dynamic load

试验类型	断面类型	拉应变/ 10^{-6}					
		1#传感器	2#传感器	3#传感器	4#传感器	5#传感器	6#传感器
静载结果	断面A	-0.85	1.52	-1.14	-3.90	13.30	25.10
	断面B	-7.20	2.64	-10.90	-6.80	-3.50	8.20
动载结果	断面A	-6.98	1.07	-5.51	-3.30	7.00	12.50
	断面B	-11.80	3.32	-6.90	-9.80	-5.13	6.40
运营期结果	断面A	4.30	4.20	-2.10	-9.50	25.20	50.10
	断面B	8.40	2.70	-1.70	-6.50	24.70	24.10

2.3.1 运营期与动静载试验结果对比分析

运营期、静载试验、动载($40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)的对比结果如表4所示。由表4可知:①运营期中1#、3#、4#传感器可测得压应变与拉应变,而动静载中只测得压应变,这是运营期车辆轮迹线不固定引起的。②2#、5#、6#传感器在运营期只呈现出受拉,结合传感器所在位置,说明U型肋边缘上方的铺装层顶在服役期为受拉区域,且为铺装层的拉应变极值区域,该区域在荷载长期作用下容易发生受拉疲劳破坏。③运营期铺装层拉应变极值的位置与静动载一致,均为A断面处的6#传感器所在位置,但运营期所测得的值大于静载、动载所测值,几乎为静载时的两倍($50.1 \times 10^{-6} : 25.1 \times 10^{-6}$)。引起此种情况的原因有:第一,运营期的一些社会车辆轴载大于标准车轴载;第二,运营期车辆前后左右并排行驶叠加后造成受力叠加,同时加上桥梁的振动造成该现象的发生。这些原因还需要进一步的研究进行验证。

2.3.2 动态响应曲线结果对比分析

为了对比运营期与动载试验中动态响应曲线的不同,选取动载试验中三类曲线所对应的传感器,将这些传感器在运营期测得的动态响应曲线与动载试

验结果(以 $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 为例)进行对比,结果如图21~23所示。由图21~23可知:

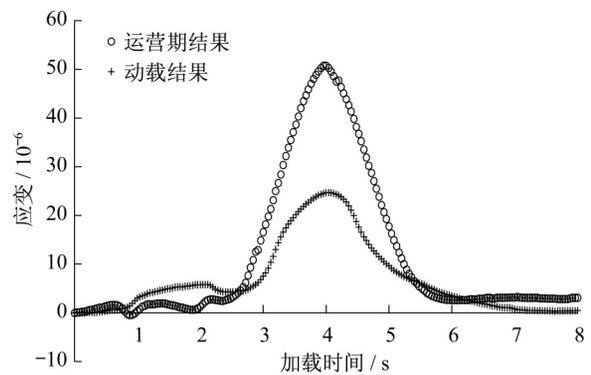


图21 运营期第一类拉应变动态响应特征曲线

Fig.21 Dynamic response characteristic curve of the first type of tensile strain in operation period

(1)运营期的动态响应曲线的波形符合动载试验中所发现的三类波形特征,即单峰、双峰、峰谷交替波形。同时动态响应曲线变化随加载速度的变化规律也与动载试验中的规律一致。

(2)相较于动载试验结果,运营期动态响应曲线的波峰更高,波形更加尖锐,说明铺装层在运营期承受的变形要大于动静载标准试验。

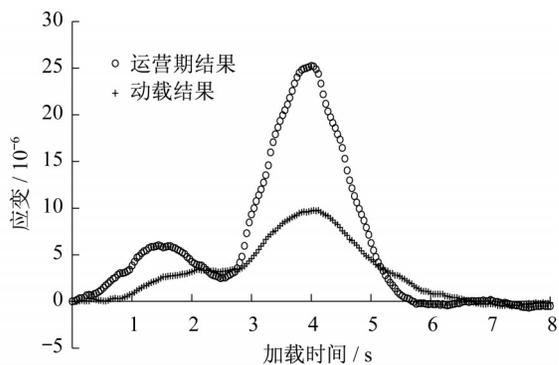


图22 运营期第二类拉应变动态响应特征曲线

Fig.22 The second type dynamic response curve of operation

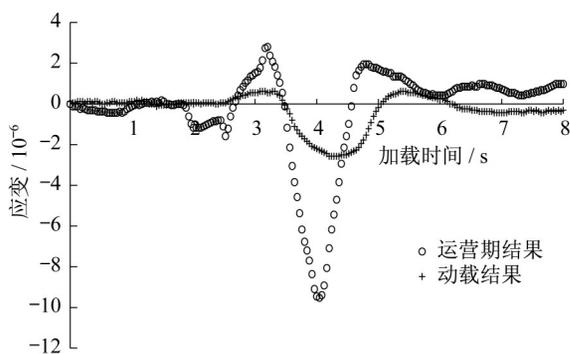


图23 运营期压应变动态响应特征曲线

Fig.23 Dynamic response characteristic curve of pressure strain in operation period

3 结论

(1)钢桥面UHPC铺装受力最大区域出现在U型肋两侧边正上方的铺装层顶,纵向距横隔板0.25 m处,方向为横向,大小为 25.1×10^{-6} 。

(2)动载作用下,钢桥面UHPC铺装层力学动态响应规律与钢桥面沥青铺装的规律并不一致。UHPC铺装层的拉应变值随车速增大而减小,压应变值变化不明显。铺装层动态响应曲线具有三种波形:单峰、双峰、峰谷交替。铺装层动态响应曲线随速度的变化,其波形也会发生变化,变化特征可以划分为三类,分别为拉应变的两类变化特征与压应变的一类变化特征。

(3)钢桥面铺装层力学动态响应特征的影响因素为车辆行驶速度与铺装层的弹性模量。UHPC铺装最大受力位置在动载作用下的受力频次相对于沥青铺装得到了减少。

(4)运营期钢桥面UHPC铺装层的最大拉应变值大于静载加载试验结果,这是钢桥面铺装设计时

需要考虑的因素。运营期UHPC铺装层应变的动态响应曲线特征与动载试验结果一致,因此动载试验结果可为钢桥面铺装动载下的设计提供参考。

参考文献:

- [1] 李智,钱振东.典型钢桥面铺装结构的病害分类分析[J].交通运输工程与信息学报,2006,4(2):110.
LI Zhi, QIAN Zhendong. Disease analysis and classification of the representative pavements on steel deck [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2006, 4(2): 110.
- [2] 程怀磊,刘黎萍,孙立军.钢桥面沥青混合料铺装应变动态响应实测研究[J].土木工程学报,2019,52(6):100.
CHENG Huailei, LIU Liping, SUN Lijun. Field measurements of dynamic strain responses of asphalt pavement on steel deck bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(6): 100.
- [3] SHAO Xudong, YI Dutao, HUANG Zhengyu, *et al.* Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultra-thin RPC layer [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2013, 5(18): 417.
- [4] 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.
HUANG Wei. Design of deck pavement for long-span steel bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(9): 65.
- [5] SEIM C, INGHAM T. Influence of wearing surfacing on performance of orthotropic steel plate decks [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1892(1): 98.
- [6] 李闯民,李宇峙.钢桥桥面沥青铺装层应变变化规律研究[J].公路交通科技,2000,17(6):1.
LI Chuangmin, LI Yuzhi. Study on variation of strain in the surfacing of asphalt mixture on the steel bridge deck [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2000, 17(6): 1.
- [7] 杨三强.钢桥面铺装加速加载实验研究[D].西安:长安大学,2010
YANG Sanqiang. The accelerated testing study on the steel bridge deck pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [8] 张德佳,叶奋,袁金凤,等.基于实桥加载的钢桥面铺装数值模型优化[J].公路交通科技,2013(7):103.
ZHANG Dejia, YE Fen, YUAN Jinfeng, *et al.* Optimization of numerical model of steel deck pavement based on real bridge loading [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013(7):103.
- [9] 武金婷,叶奋,吴怀睿,等.实桥加载下钢桥面沥青铺装层应变动态响应[J].同济大学学报(自然科学版),2014,42(3):413.
WU Jinting, YE Fen, WU Huairui, *et al.* Strain dynamic response of asphalt pavement on steel deck bridge with field loading test [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(3): 413.