

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.026

静载作用下较厚型钢桥面环氧沥青铺装力学行为研究

曾国东^{1,2},黄红明^{1*},徐伟³

(1.佛山市交通科技有限公司,广东 佛山 528041;2.佛山市公路桥梁工程监测站有限公司,广东 佛山 528041;

3.华南理工大学 土木与交通学院,广东 广州 510640)

摘要:为提高钢桥面铺装的耐久性,该文基于实桥钢桥面铺装静载试验评价了较厚型钢桥面环氧沥青铺装的力学反应规律,分析横向应变分布、临界荷位、超载影响、轴向与横向应变差异以及环氧沥青铺装结构应变情况,明确环氧沥青铺装的力学行为规律。研究表明:轴载作用下桥面板结构基本处于弹性状态,桥面板下表面应变随着轴载的增加明显增大,轮载对钢桥面板作用影响约在1 m半径范围内;桥面板轴向加劲肋腹板上缘桥面铺装处于最不利的受拉状态,在轮载的重复作用下,易产生疲劳开裂;钢桥面板下表面的横向应变明显高于轴向应变;环氧沥青铺装主要表现为弹性特征。

关键词:钢桥面铺装;环氧沥青混合料;实桥检测;受力状态;静载试验

中图分类号:U443.33

文献标志码:A

中国开展正交异性钢桥面铺装研究已有30余年,成功经验表明,优良的钢桥面铺装结构和材料设计可有效提高钢桥面铺装的性能和使用寿命^[1-3]。而明确桥面铺装受力特点与力学指标要求,是进行钢桥面铺装材料设计的一个基本前提条件^[4]。由于通车状态下实际桥面铺装受力状态检测难度较大,目前主要通过理论计算和数值模拟进行钢桥面铺装的受力状态研究,而对具有黏弹性的沥青混凝土桥面铺装,特别是大型桥梁铺装结构进行黏弹性数值模拟和力学计算难度很大,因此,一般做弹性假设,但计算结果并未通过实桥检测验证^[5-8]。鉴于此,考虑到环氧沥青铺装是中国目前应用较多的钢桥面铺装结构之一^[9-10],本文通过对在役较厚型钢桥面环氧沥青铺装实桥进行静载检测,明确实桥在交通荷载作用下的受力状态,为钢桥面铺装结构和材料设计提供参考依据。

1 桥面铺装受力状态评价方案

选取佛山平胜大桥作为研究对象,该桥为独塔自锚式四索面悬索桥,钢桥面板厚度16 mm,划分为

较厚型钢桥面板,全长680.2 m。主桥布置为东西幅钢-混结合梁悬索桥,其中主跨350 m采用加劲钢箱梁,钢箱梁单幅桥面宽为20.5 m,梁中心高度3.05 m,双向十车道。钢箱梁纵向处于 $R=11\ 500$ m的圆弧竖曲线上,单幅桥横向设2%单向排水坡^[2,11]。

(1) 检测位置

选用右幅从主塔往外数的第6根吊索处横隔板上线及横梁中间的桥面板下表面、桥面铺装层表面进行试验检测。一是该区域桥面铺装未出现破坏,可以代表完好桥面铺装状态;二是该处桥面板结构具有代表性。

(2) 检测内容

分别对桥面板下表面、桥面铺装层的横隔板及横隔板中间的横、轴两个方向的静态应变进行检测。由于钢结构的受力状态检测精度相对较高,桥面板下表面应变检测结果可用于校核桥面铺装力学计算的结构模型、设计试验模拟模型;桥面铺装层的应变检测结果可用于分析桥面铺装层表面受力状态。

横桥方向应变是影响桥面铺装受力状态及破坏的主要因素,因此本文以检测分析横桥方向应变为主,部分位置对桥轴向应变进行检测,桥面板下表面

收稿日期:2022-11-03(修改稿)

基金项目:佛山市科技计划项目(编号:2220001005763;2220001005727)

作者简介:曾国东,男,博士,教授级高工.E-mail:19277875@qq.com

*通信作者:黄红明,男,博士研究生,高级工程师.E-mail:849225015@qq.com

共设置28个应变检测点,桥面铺装层表面共设置36个应变检测点,检测位置如图1、2所示,其中图1中13、14、27、28;图2中15、16、17、18、33、34、35、36号为轴向应变片,其余均为横向应变片。

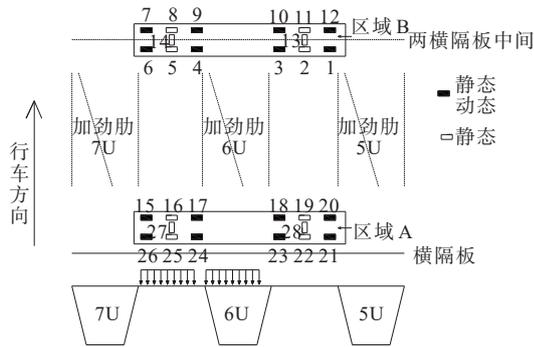


图1 桥面板下表面应变检测位置布置图

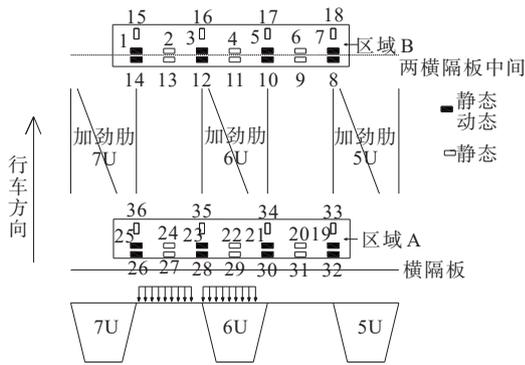


图2 桥面铺装层表面应变检测位置布置图

(3) 加载车辆

试验加载车辆采用基本符合路面检测标准车要求的单后轴双侧四轮自卸车2辆,其后轴重分别为100 kN、150 kN,其中150 kN轴载主要进行超载比较分析。

(4) 测试仪器

静态应变测试仪器采用东京测器TDS-303测量系统。

2 桥面板下表面应变静载评价分析

由于铺装层底面的应变情况检测难度很大,考虑到铺装层与钢桥面板属于一体化结构体系,通过钢桥面板下表面应变检测,在一定程度上间接反映铺装层底面的应变水平,同时也可作为桥面铺装复合结构体系评价提供参考数据。

桥面板下表面应变测试包括100 kN与150 kN静载试验,分别检测图3中A、B区域的应变分布情

况,检测时桥面板下表面的温度为27.5℃。

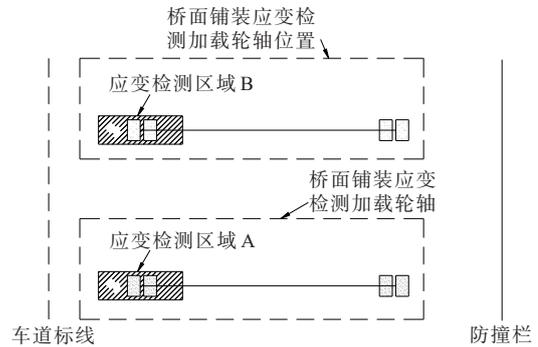


图3 试验检测轮轴位置示意图

2.1 测试试验方案

试验数据在钢箱梁内采集,为减少对交通通行的影响,采用图3的方式布置车辆轴载,检测区域轮胎荷载位置如图4所示,即加载车左侧双轮内侧轮迹边缘从加劲肋腹板上缘起每次移动100 mm,共4个工况,B、A区域荷载位置1、2、3、4分别对应于工况1、2、3、4、5、6、7、8,分析不同荷载位置工况下的应变以确定最不利的临界荷位。

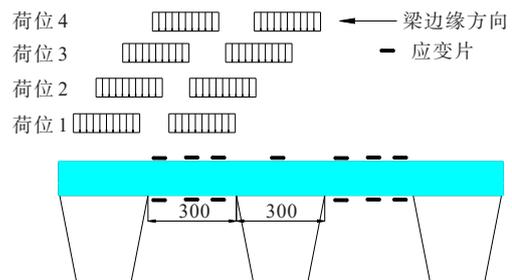


图4 桥面铺装应变检测静载试验荷位图(单位:mm)

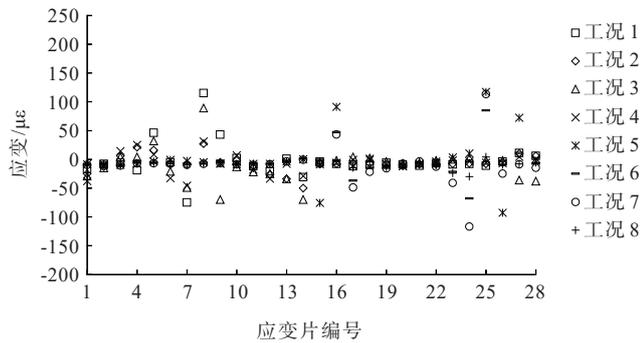
2.2 应变整体情况分析

应变片1~14为检测B区域应变情况,应变片15~28为检测A区域应变情况。具体检测情况如下:

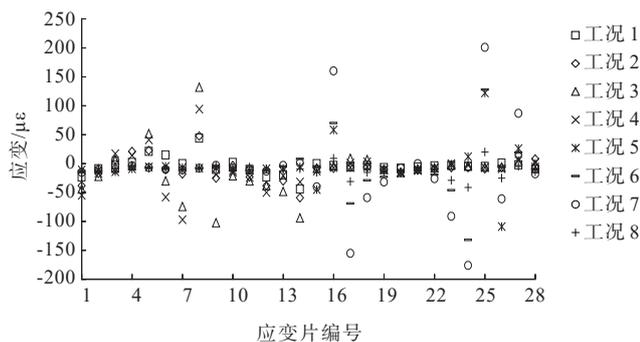
(1) 工况1~4情况下,A区域的100 kN与150 kN轴载作用下应变的对应关系变化复杂,部分100 kN轴载作用下应变反而比150 kN轴载作用下应变大;工况5~8情况下,A区域100 kN与150 kN轴载作用下应变对应规律较明显(应变较大值位置应变总体增加50%)。这主要是因为A区域位于箱梁横隔板上缘,此处正交异性桥面板结构更复杂,加之工况1~4并未直接作用于A区域上,实际加载过程中100 kN与150 kN轴载的同一工况荷载位置很难保证完全一致,荷载加载位置差异导致结构受力状态明显变化。

(2) B区域位于相邻两横隔板中间,100 kN、150 kN轴载作用下应变对应规律较明显。在应变数值较大位置,150 kN轴载比100 kN轴载作用下的应变总体增加50%,这表明桥面板结构基本处于弹性状态。

100 kN与150 kN轴载作用下各检测点应变数值分布情况见图5。



(a) 轴载 100 kN



(b) 轴载 150 kN

图5 桥面板下表面应变数据图

由图5可知:

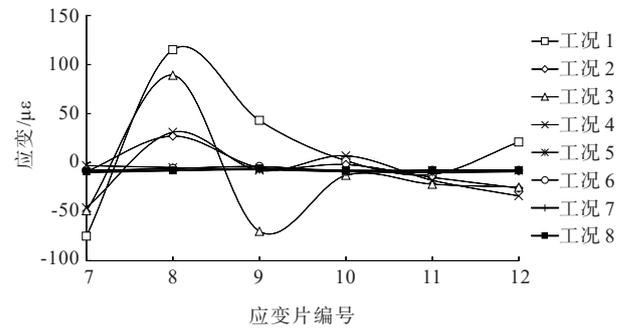
(1) 从总体上看,A区域(应变片编号15~28)与B区域(应变片编号1~14)应变数值大小并没有明显区别,但150 kN轴载作用下的应变明显高于100 kN轴载作用下的应变,说明荷载位置变化并没有改变A、B区域应变数值的大小,但是轴载的增大明显增加了桥面板下表面的应变。

(2) 检测点16与25处拉应变值较高,也即两轴向加劲肋间桥面板中部出现较高的拉应变,检测点15、17、24、26处压应变值较高,即轴向加劲肋腹板上缘桥面板出现较高的压应变,而在18~23与28测点区域应变值较低,说明轮载作用影响约在1m的半径范围内。

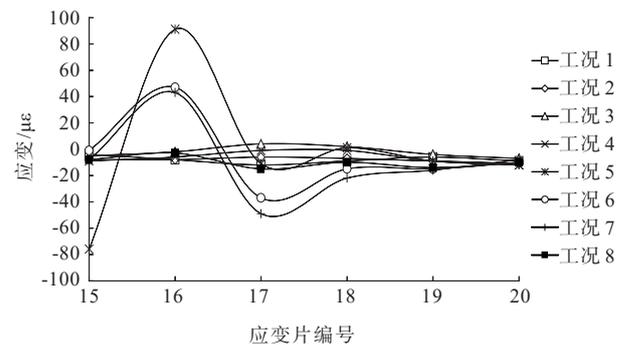
2.3 应变检测区域横向应变分布分析

100 kN轴载作用下B区域、A区域横向应变分布见图6。图6曲线表明:两加劲肋间桥面板中部

出现较高的拉应变,加劲肋腹板上缘桥面板出现较高的压应变,应变峰值经过600 mm距离后降低到较低水平,表明局部的轮载作用影响为0.6~1.0 m半径范围内。



(a) B区域



(b) A区域

图6 桥面板下表面应变分布图(轴载100 kN)

2.4 临界荷位分析

选择应变数值较大的A区域检测点16和25分析荷载位置对测点应变的影响。100 kN、150 kN轴载作用下测点16和25的应变随不同工况加载位置的变化曲线见图7。考虑后续需对轴向和横向应变进行比较分析,增加了5、8、14、27测点的应变变化曲线。

由图7可知:

(1) 当加荷位置位于B区域(工况1、2、3、4)时,A区域检测点16、25应变较小,接近于0,说明局部轮载作用影响范围较小。

(2) 在工况7出现应变峰值,说明单侧双轮间隙位于加劲肋腹板上缘位置时,桥面板处于最不利受力状态。

2.5 轴向、横向应变比较分析

对100 kN和150 kN轴载作用下各测点随加载位置变化曲线进行分析,选取应变较高的B区域检测点5与8和A区域16与25的横向应变,与其相同位置B区域14及A区域27的轴向应变进行比较分析(图6),

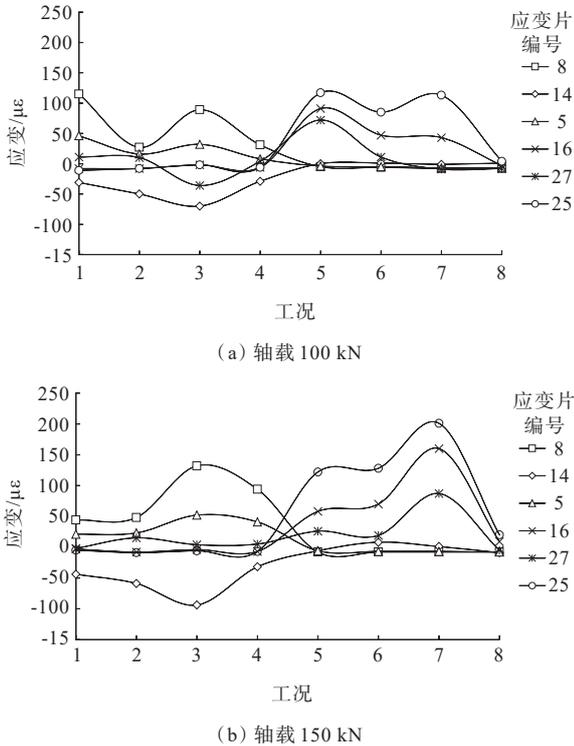


图7 应变随不同工况加载位置变化曲线

数据表明:

(1) B区域测点5与8在工况1、2、3、4的横向应变数值与14测点的轴向应变较接近,而A区域测点

16与25在工况5、6、7、8的横向应变数值明显高于27测点的轴向应变。

(2) 从各工况下应变总体情况来看,A、B区域的横向应变明显高于轴向应变。在轮载的局部作用下,正交异性钢桥面板桥面铺装设计需要重点考虑桥面铺装的横向应变作用,这也是正交异性钢桥面板桥面铺装产生纵向裂缝的一个主要原因。

3 桥面铺装层表面应变静载测试分析

桥面铺装层表面应变静载测试同样包括100 kN与150 kN两种轴载。为减少温度变化与阳光辐射对桥面温度的影响,特在夜间待桥面温度基本稳定后进行检测,检测时桥面铺装表面温度为25.9℃。

3.1 测试试验方案

桥面铺装层表面与桥面板下表面应变静载试验同时进行数据采集,试验方案和桥面板下表面测试方案一致。

3.2 应变整体情况分析

100 kN与150 kN轴载作用下各检测点应变值分布情况见图8。

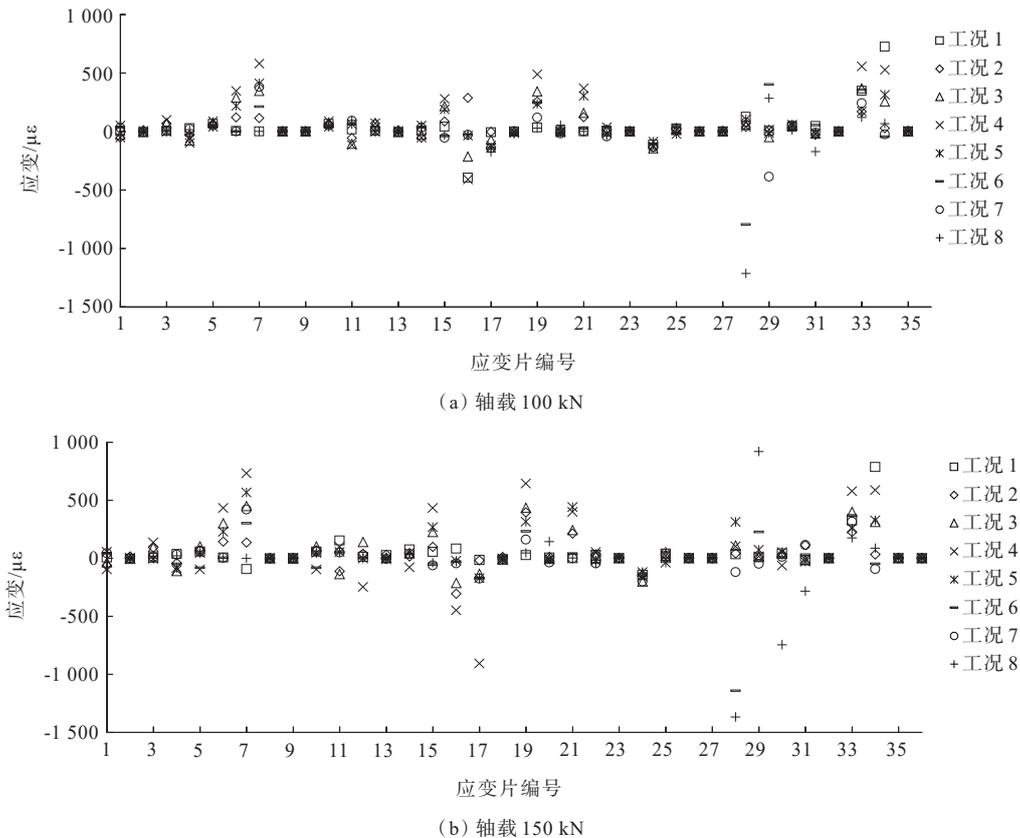


图8 桥面铺装层表面应变数据图

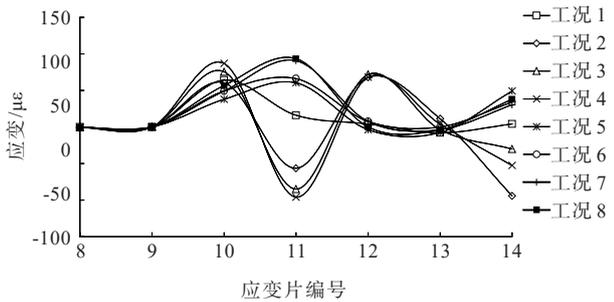
由图8可知:

(1) 应变值主要分布在 $-200\sim+500\mu\epsilon$ 之间,A区域的应变高于B区域的应变。这主要是因为A区域的箱梁横隔板对轴向加劲肋有支撑加强作用,故此区域的加劲肋腹板上缘桥面铺装负弯矩随之增加。

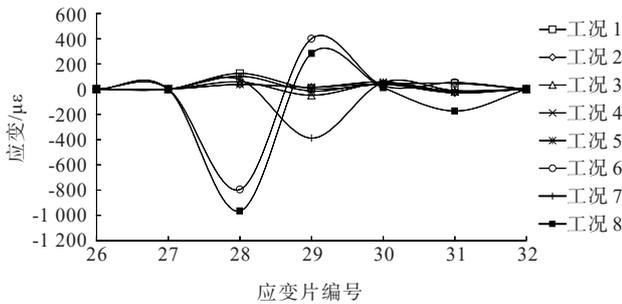
(2) 150 kN轴载作用下各检测点的应变高于100 kN轴载作用下的应变,100 kN与150 kN轴载作用下各检测点应变值在应变较大位置对应关系较为明显。

3.3 应变检测区域横向应变分布分析

100 kN、150 kN轴载作用下A区域、B区域横向应变分布分别见图9、10。



(a) B区域



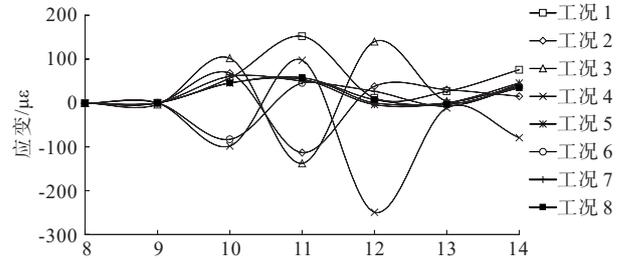
(b) A区域

图9 轴载100 kN时桥面铺装层表面应变分布图

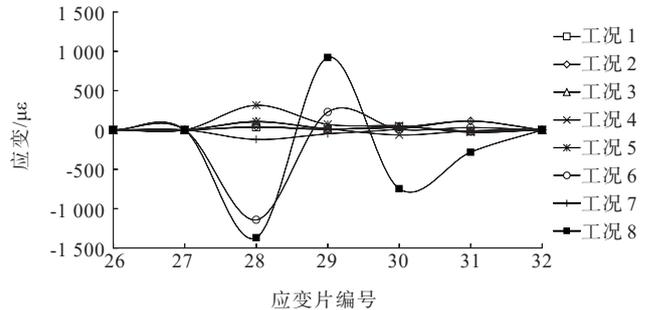
由图9、10可知:

(1) 12、28号应变片所处的加劲肋腹板上缘桥面铺装表面处于不利受力状态,在10、30号应变片所处的加劲肋腹板上缘桥面铺装表面也出现了应变较低的峰值,在14、28号应变片所处的加劲肋腹板上缘桥面铺装表面处于应变较低的受压状态。总体来说,轮胎荷载对于钢桥面铺装层的受力影响基本在1 m半径范围以内,主要表现为轮载局部区域作用。

(2) 150 kN轴载作用下A区域、B区域横向应变分布规律与100 kN轴载工况基本一致,只是由于



(a) B区域



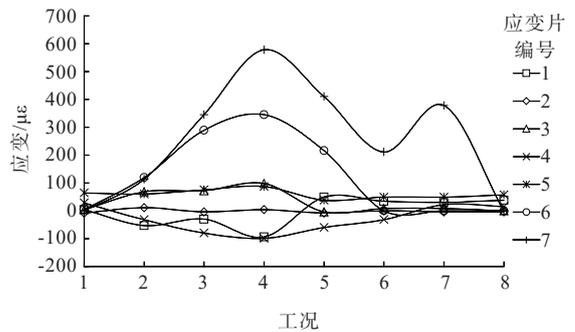
(b) A区域

图10 轴载150 kN时桥面铺装层表面应变分布图

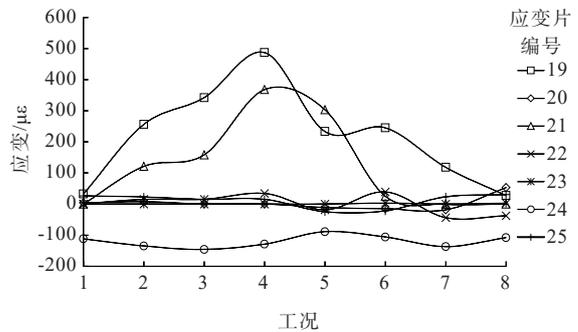
150 kN轴载的部分工况轮胎直接压在应变区域上面,部分位置的应变出现一定的波动。

3.4 临界荷位分析

图11为B区域、A区域100 kN轴载作用下桥面铺装表面应变随不同加载位置变化曲线图。



(a) B区域



(b) A区域

图11 轴载100 kN桥面铺装表面应变随工况变化图

由图11可知:

(1) 7、19号应变片所处的加劲肋腹板上缘位置即最不利的受力位置,桥面铺装表面应变对荷载位置的变化更敏感。

(2) 在工况4的位置桥面铺装出现应变峰值,加载轮胎实际接地面宽度190 mm,工况4情况下加载轮胎间隙外边缘位于12、16号应变片所处的加劲肋腹板上缘位置,即图4中桥面铺装表面应变检测静载试验荷位4,该工况轮胎荷载位置使桥面铺装处于最不利的受力状态。

3.5 轴向、横向应变比较分析

为对桥面铺装表面轴向应变与横向应变进行比较,在B区域设置了15、16号2个轴向应变片,A区域设置了33、34号2个轴向应变片,与其相邻横向应变片进行比较分析,4个位置的轴向、横向应变比较曲线见图12。

由图12可知:

(1) 轴向、横向应变变化情况比较复杂。随着工况的不同,同一位置轴向、横向应变大小关系出现交替变化,与桥面板下表面应变分布情况有较大不同,说明桥面铺装轮载作用下处于较复杂的受力

状态。

(2) 位于横隔板上缘的33、34号轴向应变片出现相对较高的轴向应变,这主要是由于此位置桥面铺装存在一定的轴向负弯矩作用。

3.6 桥面铺装层黏弹性分析

为了分析环氧沥青型钢桥面铺装的黏弹性,在静载试验中采用连续采集数据方法检测桥面铺装环氧沥青混凝土的黏弹性反应,荷载定位后连续采集数据6次,每次数据采集时间间隔为10 s,根据连续采集的数据分析桥面铺装黏弹性反应。

在应变检测过程中,检测B区域应变时,轮胎要经过A区域,A区域也会有一个受力过程,轮胎荷位在B区域定位后开始采集数据,根据A区域应变片连续采集的应变数据分析桥面铺装材料的黏弹性反应。本文主要分析100 kN的静载试验下桥面铺装黏弹特性。A区域在荷位6、荷位2工况作用下,桥面铺装表面应变随时间变化情况见图13。

由图13可知:

(1) 在持续荷载作用下,桥面铺装环氧沥青混凝土应变基本未随时间而改变,部分应变片的应变存在很小的波动,分析原因可能是在进行桥面铺装应

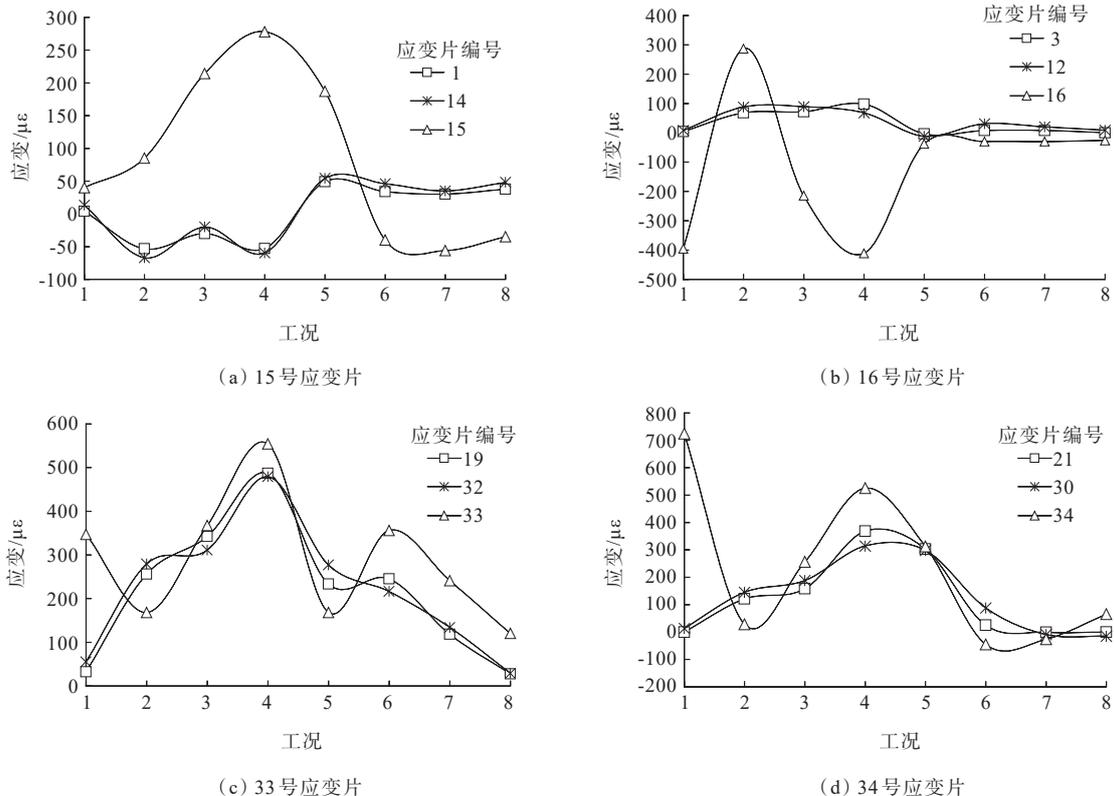
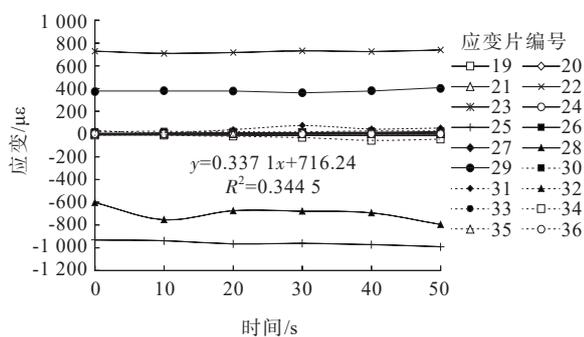
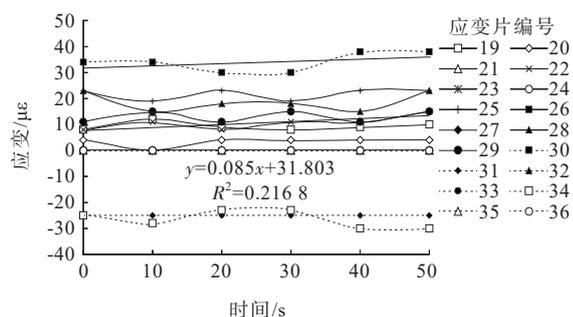


图12 轴载100 kN桥面铺装表面应变片轴向、横向应变比较图



(a) 荷位 6



(b) 荷位 2

图 13 A 区域在不同工况下桥面铺装表面应变
随时间变化情况

变静载测试分析时并未整幅封闭交通,连续的交通荷载引起桥面的振动,从而造成应变在较小范围内波动;在相邻荷位荷载卸除后应变基本未随时间而改变,而且其应变均较小,这也说明局部的轮载作用范围较小。

(2) 桥面铺装改性沥青混凝土在荷载作用下具有较明显的蠕变特性,在荷载卸除后具有较明显的变形恢复特性,而环氧沥青是一种热固性材料,在荷载作用下和荷载卸除后具有瞬时弹性变形特性,环氧沥青铺装主要表现为弹性特征。

4 结论

(1) 通过对不同工况环氧沥青型钢桥面板下表面静载应变检测,分析了横向应变分布、临界荷位、超载影响、轴向与横向应变差异以及不同厚度钢桥面板环氧沥青铺装结构应变情况。分析结果表明轴载作用下桥面板结构基本处于弹性状态,轴

载的增大明显增加了桥面板下表面的应变。轮载对钢桥面板作用影响约在 1 m 半径范围内。

(2) 桥面板轴向加劲肋腹板上缘桥面铺装处于不利的受拉状态,在轮载的重复作用下,此处桥面铺装处于拉压应变交替重复作用状态,易产生疲劳开裂破坏,设计过程中应根据桥面铺装的受力状态进行材料设计,提高铺装层沥青混凝土的抗弯拉疲劳性能。

(3) 钢桥面板下表面的横向应变明显高于轴向应变,正交异性钢桥面板桥面铺装设计需要重点考虑桥面铺装的横向应变作用,避免桥面铺装发生纵向裂缝病害。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2014[J].中国公路学报,2014,27(5):1-96.
- [2] 曾国东.钢桥面铺装力学行为与疲劳性能影响因素评价研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [3] 孟凡超,苏权科,徐伟.长寿命钢桥面铺装关键技术[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [4] ZHONG K, YANG X, WEI X H. Investigation on surface characteristics of epoxy asphalt concrete pavement[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2017, 10(6): 545-552.
- [5] XUE Y C, QIAN Z D. Development and performance evaluation of epoxy asphalt concrete modified with mineral fiber[J]. Construction and Building Materials, 2016, 102: 378-383.
- [6] 黄红明.热拌环氧沥青钢桥面铺装材料评价与应用研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [7] 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.
- [8] 许颖.钢桥面铺装使用情况调查及病害分析[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [9] 孙光辉,王志祥,杨耀.多场耦合作用下钢桥面环氧沥青铺装病理分析[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(9):73-76.
- [10] 徐勋倩,杨威,黄卫,等.循环荷载作用下钢桥面铺装疲劳损伤失效行为研究[J].振动与冲击,2020,39(7):59-66.
- [11] 徐日辉,曾国东,黄红朗.平胜大桥大宽度环氧沥青铺装整幅维修方案研究[J].中外公路,2020,40(6):62-66.