

文章编号:1673-2049(2018)02-0103-08

钢桥面沥青混凝土铺装层静力响应研究

包龙生¹, 谢得璞^{1,2}, 祁琳^{1,3}

(1. 沈阳建筑大学 交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳市市政工程设计研究院, 辽宁 沈阳 116011;
3. 大连市市政设计研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110015)

摘要:为了精确分析复杂应力对钢桥面铺装的影响,以辽宁沈阳外环后丁香大桥为研究对象,结合项目所在区域的气候特点、交通条件,考虑钢桥面铺装层的层位功能,选择适宜的铺装材料,同时利用 ABAQUS 有限元程序建立后丁香大桥四号桥全桥有限元模型,对钢桥面沥青混凝土铺装层的静力响应进行分析。结果表明:全桥最不利荷载位置纵桥向出现在 1 号桥墩处,横桥向出现在外侧腹板位置;轮胎荷载作用下,RA05 层和 SMA13 层拉应力及剪应力的最大值均出现在双轮组荷载对称作用纵向 U 肋边缘位置;RA05 层最大横桥向剪应力出现在跨中,其余均出现在桥墩位置。

关键词:钢桥面;沥青混凝土;铺装;静力响应

中图分类号:U441 **文献标志码:**A

Study on Static Response of Asphalt Concrete Pavement on Steel Deck

BAO Long-sheng¹, XIE De-pu^{1,2}, QI Lin^{1,3}

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China;
2. Shenyang Municipal Engineering Design and Research Institute, Shenyang 116011, Liaoning, China;
3. Dalian Municipal Design & Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110015, Liaoning, China)

Abstract: In order to accurately analyze the effect of complex stress on steel deck pavement, taking the Houdingxiang bridge on outer ring of Shenyang, Liaoning, as study object, combining the regional climatic characteristics, traffic conditions, and considering the function layer of steel deck pavement, pavement material suitable, the whole bridge finite element model of the No. 4 Houdingxiang bridge was built using ABAQUS finite element program. The static response of steel deck asphalt concrete pavement was analyzed. The results show that for the most unfavorable position of global load, longitudinal position appears on pier 1, cross bridge position appears on external web position. Under tire load, maximum tensile stress and maximum shear stress of RA05 layer and SMA13 layer all appear in the load symmetry double wheel longitudinal U-rib edge position. The maximum transverse shear stress of RA05 layer appears in mid-span, and others appear in the pier position.

Key words: steel deck; asphalt concrete; pavement; static response

0 引言

桥面铺装层是直接承受各种车辆荷载和环境因

素作用的功能层,各层在结构上作为一个整体共同发挥着桥面铺装层的路用性能,但是各层受力性能则有所差异,根据各层位功能的不同选择优异的铺

收稿日期:2017-09-26

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(201602602);住房和城乡建设部科学技术项目(2016-K2-012);

沈阳市科学技术基金项目(F16-095-1-00);沈阳市建委科技项目(SJW2016001)

作者简介:包龙生(1971-),男,江苏海安人,教授,工学博士,E-mail:13516094255@163.com。

铺装层材料是保证铺装层长期处于良好使用状态的基础^[1-3]。双层铺装体系能够对铺装上下层材料分别进行设计,充分发挥材料特性,最大限度地避免同种材料的矛盾双向性。

德国、美国和英国对钢桥面铺装体系展开研究较早,主要采用理论分析、试验分析和数值模拟等手段。Battista 等通过有限元计算和试验分析,对正交异性钢桥面铺装体系在交通荷载作用下的疲劳开裂进行了静力学及动力学的分析研究。Tatsuo 等运用有限条元、有限棱柱元和有限连接元构建正交异性桥面铺装结构模型,并给定求解方程,该有限元模型中将板肋结构、黏结层和铺装层设定为 3 个相对独立结构体系进行结构分析。中国自 20 世纪 90 年代开始对钢桥面铺装开展了系统研究,在铺装层抗裂疲劳承载能力、受力变形特点及在交通荷载作用下的应力、应变规律等方面都取得了一定的研究成果。

桥面铺装材料的合理选择是保证钢桥面沥青混凝土路面使用性能和使用寿命的关键^[4-9]。中国东北寒区常年气温较低,钢桥面的铺装温度比普通的路面温度更低,这对钢桥面铺装材料提出了更高的要求。由于受钢箱梁结构中正交异性板复杂结构的影响,桥面铺装力学反应更为复杂,如何准确分析钢桥面铺装复杂应力状态下的力学性能是钢桥面铺装设计的关键^[10-12]。因此,后丁香大桥采用双层铺装体系,按照层位分工分为表面功能层、整体功能层、防水黏结层 3 个层位。本文将结合项目所在区域的气候特点、交通条件,考虑钢桥面铺装层的层位功能,选择适宜的铺装材料,同时基于 ABAQUS 有限元程序,建立后丁香大桥四号桥全桥有限元模型,对钢桥面沥青混凝土铺装层的静力响应进行分析研究。

1 有限元分析方法的基本理论

随着数值模拟方法的不断进步,针对桥面铺装体系的数值模拟诞生了有限元法、有限条法、有限差分法等研究方法,近年来有限元法得到了广泛的应用。有限元分析理论是基于经典的结构力学理论,其目的是研究某结构模型在一定荷载作用下时所受的影响^[1-2]。在进行有限元分析前第 1 步要进行结构的离散化,第 2 步是假定位移和坐标之间存在的某种函数关系,这种函数关系称为位移模式或者说是插值函数,第 3 步是根据上一步所选定的位移模式导出关系式,其矩阵方程如下

$$\mathbf{f} = \mathbf{N} \boldsymbol{\delta}^e \quad (1)$$

式中: \mathbf{f} 为单元内任一点的位移列阵; \mathbf{N} 为形函数矩阵; $\boldsymbol{\delta}^e$ 为单元的节点位移列阵。

由节点位移表示的单元应变关系如式(2)所示

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \boldsymbol{\delta}^e \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为单元内任一点的应变列阵; \mathbf{B} 为单元应变矩阵。

根据本构方程,用节点位移表示的单元应力关系式为

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \mathbf{B} \boldsymbol{\delta}^e \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为单元内任一点的应力列阵; \mathbf{D} 为与单元材料有关的弹性矩阵。

利用变分原理建立节点力与单元位移的关系,即单元的平衡方程,如式(4)所示

$$\mathbf{F}_0^e = \mathbf{K}_0^e \boldsymbol{\delta}^e \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_0^e = \iiint \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dx dy dz \quad (5)$$

式中: \mathbf{K}_0^e 为单元坐标系下的单元刚度矩阵。

由式(5)可以看出积分应该在整个单位的体积内。当单位坐标系与结构坐标系不一致时,还需要利用坐标变换矩阵 \mathbf{T} 来完成转换,即

$$\mathbf{K}^e = \mathbf{T}^T \mathbf{K}_0^e \mathbf{T} \quad (6)$$

如果将各单元的刚度矩阵综合起来,就形成整个结构的刚度矩阵,然后将每个单元上的等效节点力矩阵组合起来就构成一个总的荷载列阵。由此可以导出由整体刚度矩阵 \mathbf{K} 、荷载矩阵 \mathbf{F} 和节点位移矩阵 $\boldsymbol{\delta}$ 组成的整体结构平衡方程,即

$$\mathbf{K} \boldsymbol{\delta} = \mathbf{F} \quad (7)$$

在考虑几何边界条件的前提下,首先由式(7)解出未知位移的值,再用已求出的节点位移和式(4)计算出各单元的应力。

钢桥面结构比普通路面的结构要复杂许多,加之受到钢桥面结构中正交异性钢板横纵加劲肋作用的影响,在加劲肋顶部附近会产生应力集中的现象,因此很难利用弹性薄板理论来求解。利用有限元理论不但能够模拟在不同条件下钢桥和铺装层的受力情况,还可以计算出钢桥模型中任意部位的位移和应力、应变值,进而找出钢桥铺装体系在受力后各项力学指标的变化规律,为铺装层的材料选择和结构设计提供科学有效的依据^[13]。

2 钢箱梁桥面铺装整体有限元模型

连续钢箱梁体系的整桥响应对钢桥面铺装体系的力学特性有很大影响,仅仅考虑局部钢桥面铺装

复合体系而忽略整桥响应的影响会导致铺装层受力设计值与实际不符。本文以沈阳外环后丁香大桥的四号桥的实际尺寸为基础建立整桥有限元模型,计算分析主体结构最不利特征对桥面体系的影响,得到最不利荷载位置的力学响应。四号桥上部钢箱梁结构形式为 48 m+61 m+38 m 三跨单箱三室连续梁,主梁高度 3.1 m,桥面全宽 19.8 m,行车道净宽 18.75 m,横断面为单向四车道。钢箱梁主体结构采用 Q345qENH 钢,顶板支点范围内梁段采用 20 mm 厚钢板,其余采用 16 mm 厚钢板。顶板采用 U 形加劲肋,上口宽 300 mm,下口宽 170 mm,高度 300 mm,U 形加劲肋厚度取 8 mm,标准间距 600

mm,顶板端部采用板肋加劲,板厚 18 mm,高度 210 mm,标准间距 300 mm。底板中支点附近采用 20 mm 厚钢板,其余采用 16 mm 厚钢板。腹板采用 16 mm 厚钢板,沿腹板高度方向设置 2 道 180 mm×16 mm 平板加劲肋。横隔板标准间距 3 m,厚度 20 mm。钢板厚度及参数见表 1。

四号桥的钢桥面铺装层采用树脂沥青组合体系(ERS),铺装厚度为 70 mm。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)对 RA05 及 SMA13 两种材料在 20℃±2℃时进行小梁弯曲试验,得到 2 种材料的弹性模量见表 2。

根据后丁香大桥四号桥结构尺寸,利用

表 1 后丁香大桥四号桥钢箱梁材料参数

Tab. 1 Material Parameters of Steel Box Girder of No. 4 Houdingxiang Bridge

构件	厚度/mm	弹性模量/10 ⁵ MPa	泊松比
钢箱梁顶板靠近支点(远离支点)	20(16)	2.1	0.30
顶板 U 形加劲肋靠近外腹板(远离外腹板)	10(8)	2.1	0.30
开口加劲肋顶板(平底板)	16(18)	2.1	0.30
平底板靠近支点(远离支点)	20(16)	2.1	0.30
外腹板及开口加劲肋	16	2.1	0.30
横隔板	20	2.1	0.30
纵隔板	10	2.1	0.30

表 2 后丁香大桥四号桥 ERS 铺装结构层形式及材料参数

Tab. 2 Structural Form and Material Parameters of ERS Deck of No. 4 Houdingxiang Bridge

结构层	材料名称	厚度/mm	弹性模量/MPa	泊松比
面层	SMA13	40	1 565	0.3
黏层	热喷聚合物改性沥青	可忽略不计		
整体化层	RA05	30	3 430	0.3
抗滑黏结层	EBCL	可忽略不计		
喷砂除锈层	Sa2.5 级	可忽略不计		

ABAQUS6.10 有限元软件建立桥梁整体有限元模型。ABAQUS 有限元软件可以选择杆单元、实体单元、壳单元、连续壳单元等多种单元类型进行不同构件的建模。本文主要研究桥面铺装层的受力情况,局部需要进行网格细化,采用 8 节点实体缩减积分单元 C3D8R 进行桥面铺装层的模拟。大跨径桥梁中,顶板、底板及 U 肋在厚度方向尺寸远小于另外两维尺寸,钢箱梁采用 4 节点缩减积分壳单元 S4R 进行模拟。

划分单元时,为了既保证运算的精度又能提高运算的速率,对车轮荷载作用区域的划分较细,单元的尺寸设定为 50 mm×50 mm。对于那些距离车轮荷载较远的区域,单元的尺寸设定为 500 mm×500 mm,最终的划分结果如图 1,2 所示。全桥共划分 Solid 单元 205 020 个、Shell 单元 200 153 个。边界

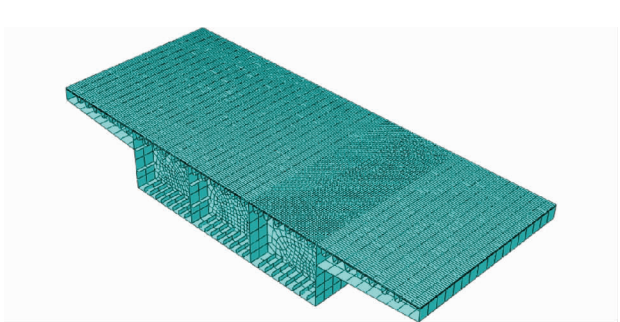


图 1 钢箱梁有限元模型局部划分效果图

Fig. 1 Local Partition Effect Diagram of Finite Element Model of Steel Box Girder

条件为在桥墩处限制垂直方向的位移,1 号桥墩是固支约束,桥的两端约束了转动。在建立钢箱梁梁段有限元模型以及全桥有限元模型时,有如下的基本假定:

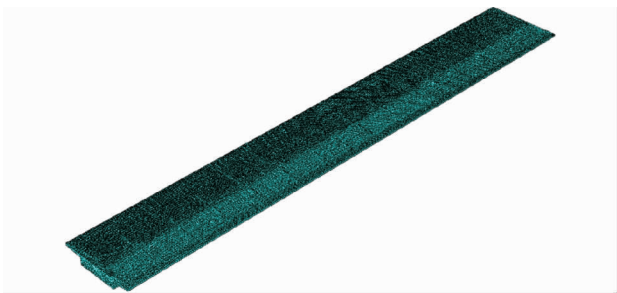


图 2 钢箱梁有限元模型整体划分效果图

Fig. 2 Overall Partition Effect Diagram of Finite Element Model of Steel Box Girder

- (1)铺装层材料的线弹性假定:假定沥青铺装材料是完全弹性、均匀、连续且各向同性的材料。
- (2)界面连续假定:所有层间完全连续。
- (3)桥面铺装层之间以及铺装层与主梁钢顶板之间黏结可靠,两者间不脱空。
- (4)各层材料不考虑自重的影响。
- (5)桥面铺装层相对较薄,不考虑铺装层内的温度差。
- (6)计算过程中钢材、沥青混凝土的泊松比均不随温度变化。

表 3 各种工况下全桥最不利荷载位置的拉应力、剪应力计算值

Tab. 3 Calculation Values of Tensile Stress and Shear Stress at Most Unfavorable Load Position Under Various Conditions										
工况 编号	位置	RA05 层拉应力/MPa		SMA13 层拉应力/MPa		RA05 层剪应力/MPa		SMA13 层剪应力/MPa		最大位移/m
		纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	
1	L, B	2.676	1.172	1.496	0.796	0.220	0.322	0.075	0.148	0.122
2	$L, B/2$	2.759	1.657	1.611	1.058	0.277	0.384	0.093	0.171	0.137
3	$L, B/4$	1.654	1.122	0.954	0.711	0.194	0.244	0.065	0.109	0.084
4	$L/2, B$	2.030	0.868	1.112	0.533	0.175	0.210	0.067	0.094	0.147
5	$L/2, B/2$	2.018	1.228	1.176	0.747	0.200	0.257	0.068	0.113	0.127
6	$L/2, B/4$	1.214	0.897	0.697	0.587	0.117	0.155	0.038	0.062	0.089
7	$L/4, B$	1.372	0.436	0.735	0.318	0.106	0.130	0.032	0.061	0.121
8	$L/4, B/2$	1.253	0.606	0.729	0.462	0.102	0.167	0.030	0.088	0.121
9	$L/4, B/4$	0.721	0.590	0.416	0.411	0.067	0.166	0.022	0.047	0.071

注: L 为纵桥向桥长; B 为横桥向桥长。

由表 3 可知,SMA13 层、RA05 层无论是横桥向的最大拉应力或剪应力,还是纵桥向的最大拉应力或剪应力及位移值,均出现在工况 2,即纵桥向全桥加载,横桥向双车道加载。纵桥向加载从大到小依次为 $L, L/2, L/4$,横桥向加载从大到小依次为 $B/2, B, B/4$,其计算结果与荷载大小呈正比关系,所以车辆质量的大小也是引起桥面铺装破坏的主要原因。图 3 为横桥向双车道加载,纵桥向全桥加载的应力云图。

由图 3 可知,纵桥向最不利荷载位置出现在 1 号桥墩处,横桥向出现在外侧腹板位置,该位置即为

3 钢桥桥面铺装层静力响应分析

3.1 全桥最不利荷载位置的计算分析

当荷载作用于桥梁的某一位置时,铺装层承受的荷载作用最大,对铺装层的损伤最严重,这一位置称为全桥最不利荷载位置^[14]。本文首先对全桥模型施加车道荷载,通过对比不同作用状态下桥面铺装层的力学响应,找到铺装层在车道荷载作用下的全桥最不利荷位。

车道荷载的大小由荷载的长度以及集度组成,荷载集度取值 50 kPa。后丁香大桥为单向四车道,每个车道的宽度为 3.75 m,按照车道荷载作用的范围,横桥向位置分别选择单车道、双车道、四车道,纵桥向位置分别选择 $L, L/2, L/4$,共 9 种工况,计算每层铺装的层间最大拉应力、最大剪应力,结果见表 3。汽车荷载根据车道数横桥向折减,双车道横桥向折减系数为 1,四车道横桥向折减系数为 0.67,纵桥向不考虑折减。桥梁冲击系数 μ 的取值参照桥梁结构设计说明,正弯矩区采用 0.04,负弯矩区采用 0.045。



图 3 双车道全桥加载应力云图

Fig. 3 Loading Stress Nephogram of Two Lane Full Bridge 全桥最不利荷载位置。这是因为车辆荷载作用下,加劲肋、横隔板、纵腹板顶部以及连续梁的桥墩支撑处铺装层表面出现负弯矩,钢桥面铺装层易出现裂缝。计算结果也揭示了引言中调查的 2 座桥梁首先在纵桥向边缘腹板处和桥墩支撑处出现横向裂缝的原因。

3.2 车辆荷载轮胎接地压力分析

汽车荷载通过车轮胎作用于桥面,目前路面设计采用双轮组单轴载 100 kN 为标准轴载,即 BZZ-100,双轮组每个轮胎上分担的荷载为 25 kN,轮胎稳定内压为 0.7 MPa,接地面积为等直径的双圆形。轮胎的实际结构组成非常复杂,即使是光面轮胎对其进行完全建模将也非常繁琐,本文利用有限元方法建立轮胎三维有限元模型,分析轮胎接地压力分布情况,选用 265/70R19.5 载重汽车子午线光面轮胎,其主要结构参数及规格根据文献选用,见表 4。由于桥面铺装层在荷载作用下也会发生变形,且会随着铺装结构组合形式和材料组成的不同而产生变化,假设轮胎作用区域为刚性体。

轮胎是由橡胶、帘布层和带束层构成的多层结构,力学性能表现为黏弹性、非线性和各向异性,对轮胎基体的橡胶材料定义了 Mooney 超弹性本构模型,采用 8 节点缩减积分单元 C3D8R 进行建模,网格尺寸为 20 mm×20 mm,轮胎层模型的材料参数根据文献选取,见表 5。

笔者利用有限元方法建立不同种类与不同花纹类型轮胎的三维有限元模型,分析了轮胎接地压力的分布情况,认为把荷载作用面积简化成矩形是合理的。轮胎在静态负载过程中的 Von-Mises 等效

应力云图如图 4 所示,接地压力分布如图 5 所示。从图 5 中可以发现,在靠近轮胎边缘两侧存在接触压力集中现象,接地压力峰值达到 1.066 MPa,平均值在 0.72 MPa 左右,轮胎与桥面铺装层接触面横向宽度为 220 mm,纵向宽度为 180 mm,接地压力形状近似为矩形。接触面积模拟结果与 BZZ-100 荷载简化的单圆面积较为接近,接地压力平均值与标准荷载幅值 0.7 MPa 较为接近。静力计算中把标准轴载的荷载图式简化成尺寸为 220 mm×180 mm 的矩形,荷载分布采用 0.72 MPa 均布荷载。

将双轮组荷载进行有限元模型分析,建立双轮组轮胎接地模型,竖向荷载为 50 kN,静态负载过程中的 Von-Mises 等效应力云图如图 6 所示,接地压力分布如图 7 所示。

双轮组轮胎与单轮轮胎的接地压力相同,轮胎与桥面铺装层接触面横向实际宽度为 440 mm,接地作用范围宽度为 500 mm,纵向宽度为 180 mm,接地压力形状近似为矩形,若将双轮组荷载等效成为矩形荷载,则矩形荷载尺寸为 500 mm×180 mm,荷载集度为 0.72 MPa。

3.3 局部最不利荷载位置的计算分析

确定了铺装层全桥最不利荷载位置后,便能够在此基础上进行局部最不利荷载位置的计算。纵桥

表 4 265/70R19.5 载重汽车子午线轮胎结构参数

轮胎直径/m	轮毂直径/m	胎冠宽/m	双胎距/m	标准胎压/kPa	标准荷载/kN
0.863	0.495	0.265	0.295	760	25

表 5 265/70R19.5 载重汽车子午线轮胎材料参数

材料名称	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	径向剪切模量 G ₁ /MPa	横向剪切模量 G ₂ /MPa
带束层	3 750.60	0.465	3.50	1.30
帘布层	1 433.80	0.469	2.60	0.90
胎面胶	9.68	0.483	0.65	0.65

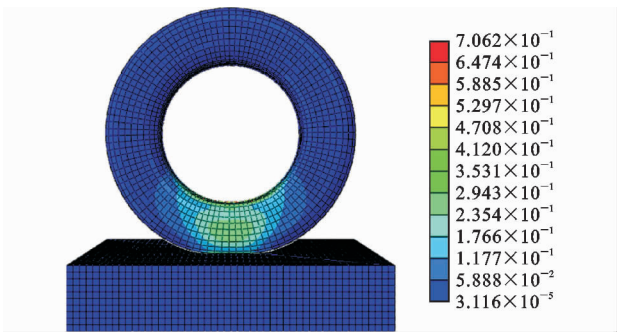


图 4 单轮轮胎 Von-Mises 等效应力云图(单位:MPa)
Fig. 4 Von-Mises Equivalent Stress Nephogram of Single Wheel Tie (Unit:MPa)

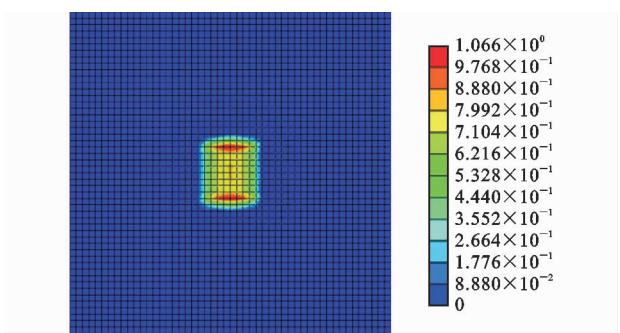


图 5 单轮轮胎桥面接地压力(单位:MPa)
Fig. 5 Single Wheel Tire Bridge Ground Pressure (Unit:MPa)

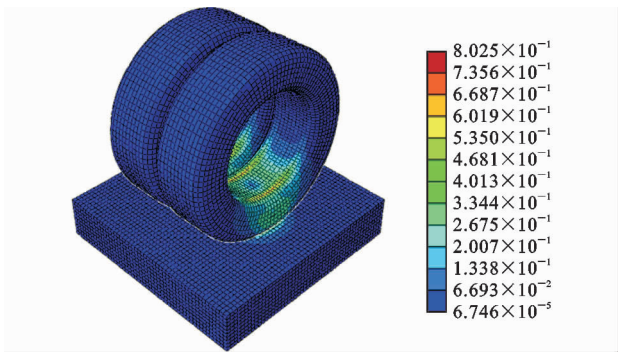


图 6 双轮组轮胎 Von-Mises 等效应力云图 (单位:MPa)
Fig. 6 Von-Mises Equivalent Stress Nephogram of Double Wheel Tires (Unit:MPa)

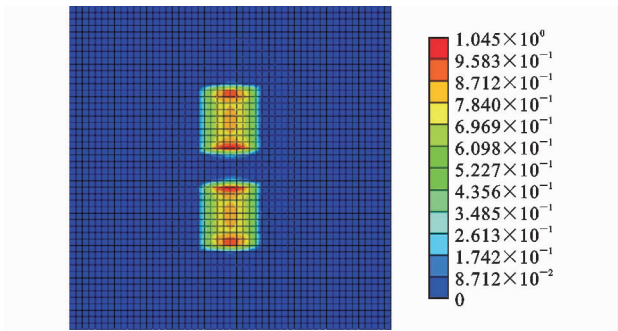


图 7 双轮组轮胎桥面接地压力 (单位:MPa)
Fig. 7 Double Wheel Tires Bridge Ground Pressure (Unit:MPa)

向选择全桥最不利荷载位置计算,得到的最大跨中截面应力为最大的桥墩支点截面,横桥向选择第 2 行车道施加车辆荷载,荷载轴重取标准轴载 BZZ-100,按照前文把标准轴载的荷载图式简化成尺寸为 220 mm×180 mm 的矩形,荷载分布采用 0.72 MPa 均布荷载,如图 8 所示,以行车道中心 C 点为对称中心,横向间隔 0.3 m,计算横向不同位置拉应力、剪应力变化情况,结果如图 9 所示。

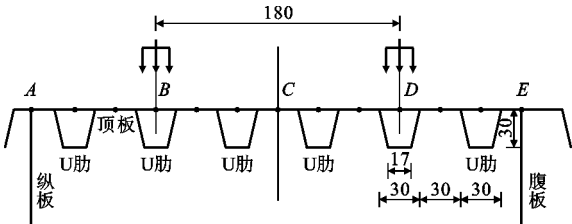


图 8 车辆荷载横向加载位置 (单位:mm)
Fig. 8 Lateral Load Position of Vehicle Load (Unit:mm)

由图 9 可知,除横向剪应力外,无论是桥墩还是跨中,拉应力及剪应力的最大值均出现在对称行车道中心 0.9 m 的 B、D 位置,该位置为车轮荷载作用位置,即横桥向车轮荷载作用的位置即为最不利的位

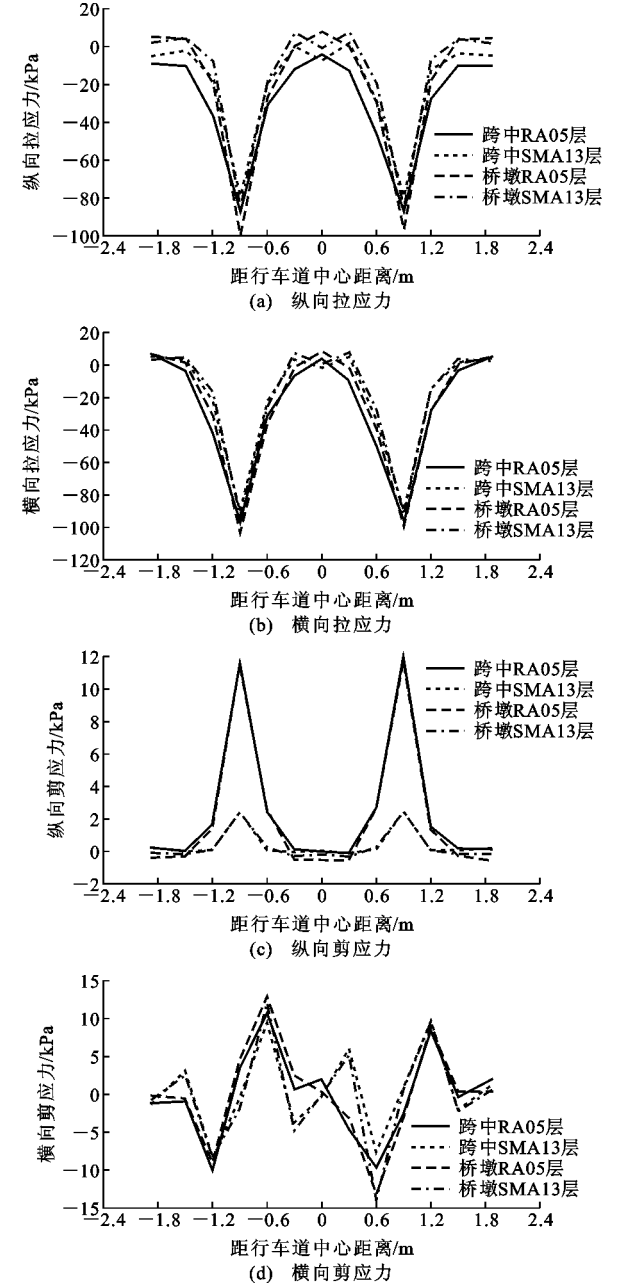


图 9 桥墩及跨中横桥向不同位置应力变化曲线
Fig. 9 Stress Change Curves of Piers and Midspan Bridges at Different Positions

于跨中位置,RA05 层大于 SMA13 层。横向拉应力大于纵向拉应力,说明桥面铺装层表面更易出现纵向裂缝。对于纵向剪应力,桥墩位置和跨中位置几乎相等,RA05 层大于 SMA13 层,说明桥面铺装层与桥面板之间更易发生滑移及脱层。横向剪应力的幅值没有出现在车轮荷载作用位置,而是出现在荷载作用的相邻两侧,大小相等,方向相反。

正交异性桥面板纵向 U 形加劲肋的构造对顶板有局部加强作用,当双轮组荷载作用于 U 形加劲肋的不同位置时,铺装层的拉应力及剪应力会有所

区别。为此,选择桥墩及跨中 2 个截面,按照双轮组荷载与 U 形加劲肋的位置关系,选择 3 种工况,如图 10 所示,计算最大拉应力、最大剪应力及最大位移,计算结果如图 11 所示。

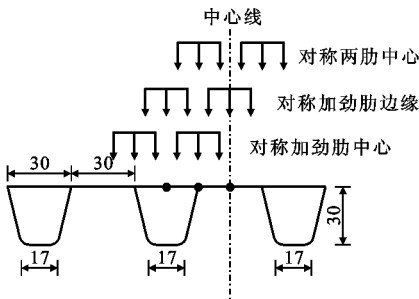


图 10 横向加载工况 (单位:mm)

Fig. 10 Lateral Loading Cases (Unit:mm)

由图 11 可知,RA05 层和 SMA13 层拉应力及剪应力的最大值均出现在双轮组荷载对称作用纵向 U 肋边缘位置,除 RA05 层最大横向剪应力出现在跨中,其余均出现在桥墩位置。桥墩及跨中横向拉应力数值均大于纵向拉应力,桥墩处的拉应力大于跨中的拉应力,RA05 层的拉应力及剪应力均大于 SMA13 层。

综上所述,得到静态局部最不利荷载位置,即桥墩处双轮组荷载对称 U 肋边缘位置,应力峰值出现在车轮下。标准轴载 BBZ-100 作用下的应力、位移最大值见表 6。

4 结 语

(1)全桥最不利荷载位置纵桥向出现在 1 号桥墩处,横桥向出现在外侧腹板位置,该位置即为全桥最不利荷载位置。

(2)车轮荷载作用下,RA05 层和 SMA13 层拉应力及剪应力的最大值均出现在双轮组荷载对称作用纵向 U 肋边缘位置,除 RA05 层最大横向剪应力出现在跨中,其余均出现在桥墩位置。桥墩及跨中横向拉应力数值均大于纵向拉应力,桥墩处的拉应力大于跨中的拉应力,RA05 层的拉应力及剪应力均大于 SMA13 层。

(3)通过计算,得到了后丁香大桥四号桥的

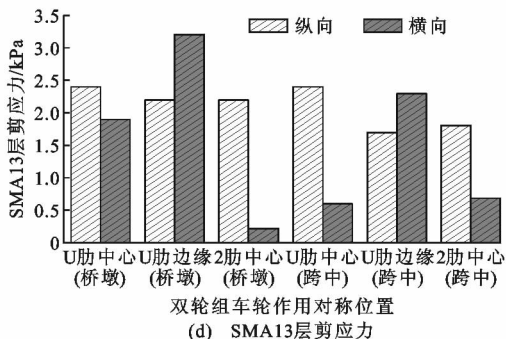
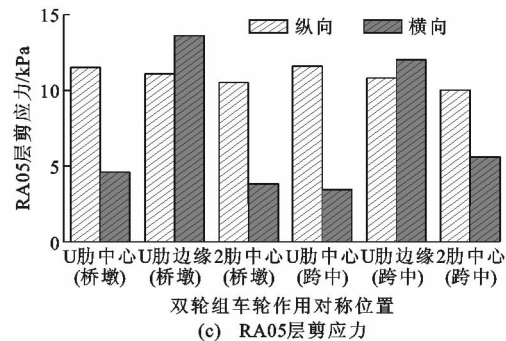
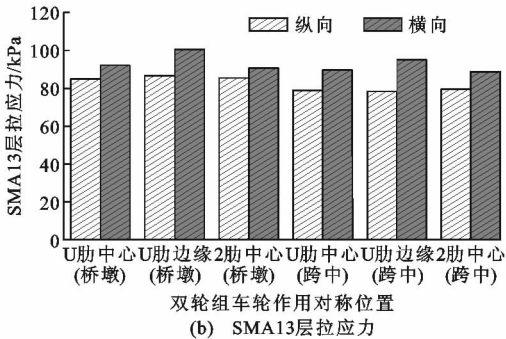
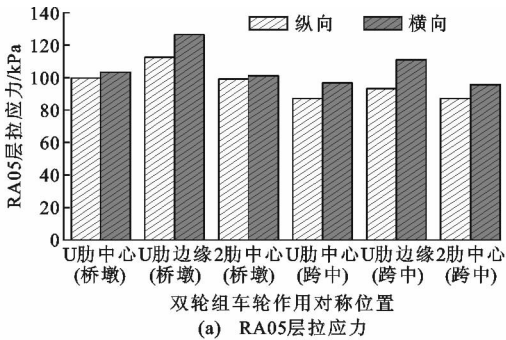


图 11 横向加载不同位置应力对比
Fig. 11 Stress Contrasts at Different Positions
During Lateral Loading

SMA13 层和 RA05 层在标准轴载 BBZ-100 作用下的应力、位移峰值。

表 6 局部最不利荷载位置下铺装层应力、应变最大值

Tab. 6 Maximum Stress and Strain of Lower Pavement Layer at Local Unfavorable Load Position

层位	纵桥向				横桥向				位移/mm
	拉应力/MPa	拉应变/ 10^{-6}	剪应力/MPa	剪应变/ 10^{-6}	拉应力/MPa	拉应变/ 10^{-6}	剪应力/MPa	剪应变/ 10^{-6}	
SMA13	0.087	4.21	0.002	8.57	0.101	3.44	0.003	2.16	1.51
RA05	0.113	3.61	0.012	20.8	0.127	5.99	0.013	12.38	

参考文献:

References:

- [1] 曹 鹏. 沥青路面多尺度力学分析方法及模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
CAO Peng. Research on Multiscale Mechanical Analysis Method and Model of Asphalt Pavement[D]. Harbin: Harbin Institute Technology, 2014.
- [2] 黄 卫. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 65-77.
HUANG Wei. Design of Deck Pavement for Long-span Steel Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(9): 65-77.
- [3] AHN J H, LEE C G, WON J H, et al. Shear Resistance of the Perfobond-rib Shear Connector Depending on Concrete Strength and Rib Arrangement[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(10): 1295-1307.
- [4] 黄继成, 叶 奋. 钢桥面沥青铺装出现的问题及其防治[M]. 上海: 同济大学出版社, 2007.
HUANG Ji-cheng, YE Fen. Problems and Prevention of Asphalt Pavement on Steel Deck[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2007.
- [5] 赵锋军, 李宇峙. 西陵长江大桥沥青铺装大修工程关键技术[J]. 公路交通科技, 2012, 29(5): 52-61, 82.
ZHAO Feng-jun, LI Yu-zhi. Key Technology of Asphalt Pavement Overhaul for Xiling Yangtze River Bridge[J]. Journal of Highway Transportation Research and Development, 2012, 29(5): 52-61, 82.
- [6] 余锦州. 马房大桥钢桥面沥青混凝土铺装层设计[J]. 公路, 2004(8): 47-50.
YU Jin-zhou. Design of Asphalt Concrete Pavement of Mafang Bridge Steel Deck[J]. Highway, 2004(8): 47-50.
- [7] Al-DARZI S Y K, CHEN A R, LIU Y Q. Finite Element Simulation and Parametric Studies of Perfobond Rib Connector[J]. American Journal of Applied Sciences, 2007, 4(3): 122-127.
- [8] 熊 巍, 雷宗建, 刘 松. 军山大桥钢桥面铺装大修养护设计及应用[J]. 中国公路, 2013(21): 126-127.
XIONG Wei, LEI Zong-jian, LIU Song. Overhaul Maintenance Design and Application of Steel Bridge Deck Pavement of Junshan Bridge[J]. China Highway, 2013(21): 126-127.
- [9] VIANNA J D C, COSTA-NEVES L F, VELLASCO P C G D S, et al. Structural Behaviour of T-Perfobond Shear Connectors in Composite Girders: An Experimental Approach[J]. Engineering Structures, 2008, 30(9): 2381-2391.
- [10] 胡晓燕. 大跨度公路桥梁车桥耦合振动响应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
HU Xiao-yan. Research on Vehicle-bridge Coupling Vibration of Long-span Highway Bridge[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [11] 肖 维. 五河口大桥沥青混凝土铺装层力学分析及结构组合研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
XIAO Wei. Mechanics and Structural Combination Study of Asphalt Pavement on Wuhekou Long-span Concrete Bridge[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [12] EN 1994-2: 2005, Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 2: General Rules and Rules for Buildings[S].
- [13] 罗 桑, 钱振东, 陆 庆. 基于动态频率扫描试验的环氧沥青混合料动态模量研究[J]. 石油沥青, 2010, 24(4): 55-58.
LUO Sang, QIAN Zhen-dong, LU Qing. Research on Dynamic Modulus of Epoxy Asphalt Mixed by Dynamic Frequency Sweep Test[J]. Petroleum Asphalt, 2010, 24(4): 55-58.
- [14] KIM H Y, JEONG Y J. Experimental Investigation on Behaviour of Steel-concrete Composite Bridge Decks with Perfobond Ribs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(5): 463-471.