

# 轮胎作用下钢-混组合梁桥面铺装动态响应\*

严战友<sup>1,2</sup>, 崔向阳<sup>2</sup>, 陈恩利<sup>1</sup>, 王奇志<sup>3</sup>

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室 石家庄, 050043)

(2. 石家庄铁道大学交通运输学院 石家庄, 050043) (3. 石家庄市交建高速公路建设管理有限公司 石家庄, 050052)

**摘要** 钢-混组合连续梁桥面铺装层受力十分复杂, 桥面铺装层早期破坏与其车辆荷载的动态响应密切相关。建立了实体橡胶轮胎和三跨钢-混组合连续梁模型, 轮胎采用 Yeoh 模型, 桥面铺装材料(沥青混合料)采用广义 Maxwell 模型, 将整车后轴悬架动态力施加于橡胶轮胎, 求解桥面各铺装层垂向挠度、垂向应力、纵向应力、横向应力及位移谱, 并且与移动荷载进行比较。结果表明: 三跨钢-混组合梁的每跨垂向挠度比移动荷载大 21.3%, 4.7%, 8%, 纵梁垂向挠度比桥面铺装层小 8.9%; 上面层与水泥混凝土层应力变化趋势相似, 下面层应力比较复杂; 上面层位移响应频率集中于 0~6 Hz 范围。文中数据对桥面铺装层结构优化具有较大指导意义。

**关键词** 橡胶轮胎模型; 钢-混组合连续梁模型; 桥面铺装层; 广义 Maxwell 模型; 响应  
**中图分类号** TH17

## 引言

钢-混组合连续梁具有自重轻、承载能力大、施工周期短等特点, 其应用范围越来越广, 随着时间发展, 钢-混组合连续梁跨径越来越大。由于大部分钢-混组合梁采用正交异性结构, 桥面铺装受力非常复杂, 在车辆长期荷载作用下, 钢-混组合梁出现一系列病害, 其中沥青层出现集料推移、裂缝、脱落及车辙等, 水泥混凝土层出现裂缝、破损等, 钢板焊接处出现细小裂缝、锈蚀等, 这些病害严重影响桥梁使用寿命, 即使桥面铺装系统采用了一系列新材料, 如浇筑式沥青混合料、环氧沥青混合料等, 经过一段时间后, 最终没有达到令人满意程度<sup>[1-2]</sup>。因此, 很多专家学者对钢-混组合梁的振动特性进行深刻研究。

车辆-桥梁动力学耦合问题一直是研究重点, 车桥耦合系统是一个复杂时变随机系统, 其结构参数、输入激励都严重影响着桥梁响应。很多专家学者对车辆-桥梁耦合振动进行研究。张彦玲等<sup>[3]</sup>研究了钢-混组合梁在简谐荷载作用下的响应, 表明组合梁跨中动挠度受静载影响较大。魏志刚等<sup>[4]</sup>为研究钢-混组合简支梁动力特性, 推导出组合梁刚度分布函数, 最终求解钢-混组合梁动力响应。李韶华等<sup>[5]</sup>为研究钢-混组合连续梁应力响应, 采用 Midas/FEA

建立模型, 研究连续梁应力分布。李慧乐等<sup>[6]</sup>根据车辆与桥梁力学接触关系, 求解桥梁各节点的动态响应。由上述文献可知: 关于车辆-桥梁耦合研究中的车辆荷载大部分采用移动荷载、移动质量块、簧上质量等; 车辆垂向力直接施加于桥面, 桥面材料(沥青混合料)不考虑黏弹属性而按照线弹性处理; 在车桥动态耦合中, 车轮很少采用橡胶轮胎模型, 目前车桥动态耦合问题与实际还有一定距离。所以, 研究具有很大的意义。

笔者建立了 305/75R24.5 载重子午线橡胶轮胎模型及三跨钢-混组合连续梁模型, 桥面铺装材料(沥青混合料)采用广义 Maxwell 模型, 将整车后轴悬架动态力施加于橡胶轮胎, 采用中心差分法求解钢-混组合连续梁各铺装层动态响应, 并与移动荷载产生响应比较, 在橡胶轮胎振动荷载作用下, 揭示桥面各铺装层及主纵梁之间垂向挠度、横向应力、纵向应力变化, 为桥面铺装设计提供参考。

## 1 橡胶轮胎模型

在已有文献中, 大部分专家将轮胎作为线弹性体, 即假设轮胎由质量块、阻尼、刚度等 3 个参数表达, 根据 D'Alembert 原理列出微分方程, 采用一定

\* 国家自然科学基金资助项目(111172183); 中央引导地方科技发展专项资助项目(18242219G); 河北曲港高速公路开发有限公司科技计划资助项目(QG2018-07); 河北省引进留学生人员资助项目(C20190514)

收稿日期: 2019-03-18; 修回日期: 2019-08-28

算法求解。但实际轮胎是由橡胶体、帘布层、弹性钢丝层等多种物质组成,轮胎生产厂家不同其性能差别很大,其中橡胶体属于超弹性材料,常采用 Mooney-Rivlin 模型、Yeoh 模型、Neo-Hookean 模型等,各种模型有其自身优点,其中, Yeoh 模型适合轮胎大变形,笔者采用 Yeoh 模型。轮胎是三维正交各项异性复合材料,具有体积不可压缩及非线性力学特点,基于唯象理论建立材料本构关系,采用体应变能表征力学特性,其方程为

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \tag{1}$$

$$W = \sum_{i=0, j=0}^n C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \tag{2}$$

$$I_1 = \text{tr}E = E_{ij} = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \tag{3}$$

$$I_2 = \frac{1}{2} [(\text{tr}E)^2 - \text{tr}E^2] = E_{ij} = (\lambda_1\lambda_2)^2 + (\lambda_2\lambda_3)^2 + (\lambda_3\lambda_1)^2 \tag{4}$$

$$I_3 = (\lambda_1\lambda_2\lambda_3)^2 \tag{5}$$

$$\lambda_i = 1 + \gamma_i \tag{6}$$

其中:  $W$  为体应变能;  $I_1, I_2, I_3$  为左 Cauchy-green 第 1、第 2、第 3 张量不变量,橡胶材料不可压缩 ( $I_3 = 1$ );  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  为主伸长比;  $\gamma_i$  为主应变;  $E_{ij}$  为  $i$  行  $j$  列矩阵;  $\text{tr}E$  为矩阵  $E$  的迹,即主对角线元素总和;下角标 1, 2, 3 为相互垂直方向,材料只有单方向拉伸,则  $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1$ 。

对于橡胶材料  $\partial W / \partial I_2$  远远小于  $\partial W / \partial I_1$ , 一般认为参数  $\partial W / \partial I_2$  在应变能中贡献度很小,可以忽略,则应变能函数<sup>[7]</sup>简化为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \tag{7}$$

其中:  $C_{10}, C_{20}, C_{30}$  为橡胶轮胎材料参数。

为了准确描述轮胎力学特点,模型参数采用参考文献[8]数据。

橡胶轮胎建模步骤如下:应用 AutoCAD 软件绘制二维半截面轮胎模型,在二维半截面模型中绘制分割线;将半截面几何模型导入 Hypermesh 软件进行编辑、网格划分、旋转成三维轮胎封闭整体;采用 Catia 软件绘制轮胎花纹,经过旋转可以得到轮胎花纹整体模型;将 Hypermesh 软件与 Catia 软件生成文件导入 Abaqus 软件,通过 Abaqus 软件固结功能将花纹模型与轮胎模型固结一起,则可得到本轮胎模型。其中:骨架结构采用 rebar 实现,橡胶材料应用 CGAX4H 和 CGAX3H 形式单元,经空间旋转成三维立体模型,三维单元类型为 C3D8H 和 C3D6H;轮胎骨架结构采用二维单元 SFMGAX1,经空间旋转成三维立体模型,三维单元类型为 SFM3D4R,轮

胎施压 0.7 MPa<sup>[9]</sup>。轮胎模型见图 1。

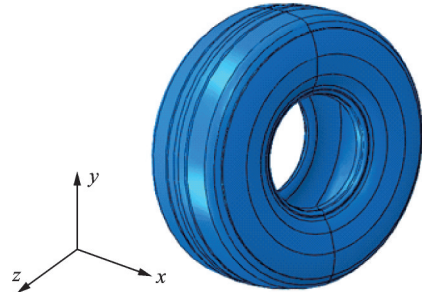
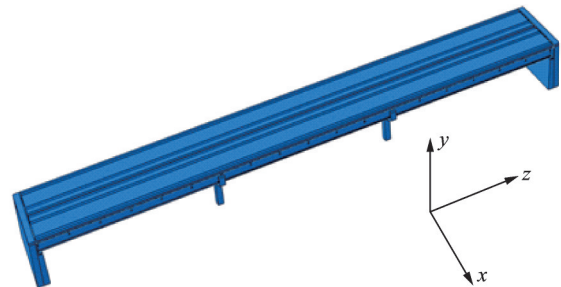


图 1 轮胎有限元模型

Fig.1 Tire finite element model

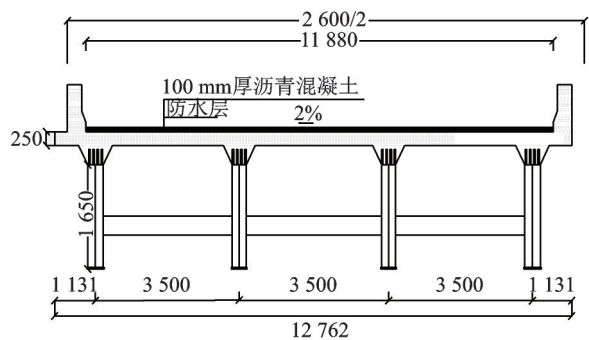
## 2 钢-混组合连续梁模型

应用 abaqus 软件构建三跨钢-混组合连续梁模型(图 2),桥梁尺寸来源于某高速公路,连续梁全长为 90 m,每跨为 30 m,双向 4 车道,宽度为 11.88 m,纵向由 4 片工字钢梁组成,工字纵梁高为 1.65 m,间距为 3.5 m,采用横梁连接纵梁,横梁间距 5 m,桥墩采用柱式墩,基础采用桩基础,钢板、主梁以及横梁均采用 Q345D 钢,桥面铺装层分为上面层、下面层、水泥混凝土层等,桥面铺装层材料参数见表 1。



(a) 钢-混组合连续梁模型

(a) Steel-concrete composite continuous beam model



(b) 钢-混组合连续梁横断面结构(单位:mm)

(b) Cross-section structure of steel-concrete continuous beam (unit: mm)

图 2 三跨钢-混组合连续梁模型

Fig.2 Three-span steel-concrete composite continuous beam model

表1 连续梁桥面铺装体系模型结构基本参数  
Tab.1 Parameters of steel-concrete continuous beam model structure

桥梁结构	厚度/ mm	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )
上面层(SMA-13)	40	1 400	0.35	2 400
下面层(AC-20)	60	1 200	0.2	2 300
水泥混凝土层	250	2.95×10 <sup>10</sup>	0.2	2 300
钢桥面板	15	2.1×10 <sup>5</sup>	0.3	7 800
纵梁顶板	20	2.1×10 <sup>5</sup>	0.3	7 800
纵梁底板	25	2.1×10 <sup>5</sup>	0.3	7 800

桥面铺装的上面层为 SMA-13 型沥青玛蹄脂,下面层为 AC-20 型沥青混凝土,沥青混合物本构关系定义为广义 Maxwell 模型(图 3)。对广义 Maxwell 模型施加应变时,每一个 Maxwell 元件均有同样应变,则应力为

$$\sigma_i = \epsilon_0 E_i \exp(-t/\tau_i) \quad (8)$$

总应力为

$$\sigma(t) = \epsilon_0 E_e + \sum_{i=1}^n \epsilon_0 E_i \exp(-t/\tau_i) \quad (9)$$

松弛模量函数为

$$E(t) = \sigma(t)/\epsilon_0 = E_e + \sum_{i=1}^n E_i \exp(-t/\tau_i) \quad (10)$$

当  $t=0$  时

$$E_0 = E_e + \sum_{i=1}^n E_i \quad (11)$$

其中:  $E_0$  为最初松弛模量;  $E_i$  为第  $i$  个元件松弛模量;  $E_e$  为松弛时间  $t$  无穷时刻的平衡值;  $\sigma(t)$  为应力;  $\epsilon_0$  为起始应变;  $\tau_i$  为第  $i$  个元件松弛时间。

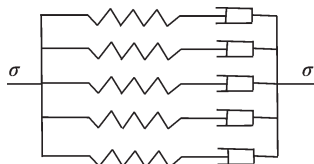


图3 广义 Maxwell 模型

Fig.3 Generalized Maxwell model

文中高分子聚合物的经典遗传积分可以写成

$$\sigma(\epsilon, t) = \int_0^t g(t-s) \frac{d\sigma_0(s)}{ds} ds \quad (12)$$

其中:  $\sigma_0(s)$  为弹性响应部分;  $g(t)$  为衰减函数,可以写成 Prony 级数形式

$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^n g_i (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_i})) \quad (13)$$

沥青混合物采用文献[10]处理数据,其中混合

料参数采用 Prony 级数。由于采用轮胎荷载,除沥青路面采用广义 Maxwell 模型外,其余铺装材料均采用线弹性本构关系。

### 3 轮胎-连续梁耦合模型

轮胎-钢混组合连续梁耦合模型包括轮胎和三跨组合连续梁两个子模型(图 4),通过有限元法对其进行离散,轮胎与桥梁间运动关系<sup>[11]</sup>写为

$$\begin{bmatrix} M_{vv} & 0 \\ 0 & M_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{Y}_v(t) \\ \ddot{Y}_r(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{vv} & C_{vr} \\ C_{rv} & C_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{Y}_v(t) \\ \dot{Y}_r(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{vv} & K_{vr} \\ K_{rv} & K_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_v(t) \\ Y_r(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} R_v \\ R_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{vr}(t) \\ P_{rv}(t) \end{Bmatrix} \quad (14)$$

其中:  $M, C, K$  分别为质量、阻尼、弹性刚度矩阵;  $\ddot{Y}, \dot{Y}, Y$  分别为加速度、速度、位移等向量; 下角标  $v, r$  分别为桥梁和轮胎;  $R_v, R_r$  分别为车轮与铺装材料恢复力;  $P_{vr}, P_{rv}$  分别为车轮与桥梁之间作用力。

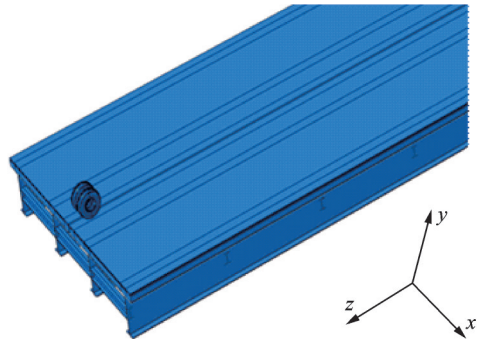


图4 轮胎与连续梁耦合模型

Fig.4 Tire and continuous beam coupling model

采用中心差分法进行积分求解,中心差分法避免每一时间步迭代,其加速度和速度为

$$\ddot{Y} = 1/\Delta t^2 (Y_{t-\Delta t} - 2Y_t + Y_{t+\Delta t}) \quad (15)$$

$$\dot{Y} = 1/\Delta t (-Y_{t-\Delta t} + Y_{t+\Delta t}) \quad (16)$$

将式(15,16)带入方程(14),则求解每个离散单元位移响应,依照有限元理论,位移与应变存在如下关系

$$\epsilon^e = BY^e \quad (17)$$

$$\sigma^e = D\epsilon^e \quad (18)$$

$$\sigma^e = DBY^e \quad (19)$$

其中:  $\epsilon^e$  为单元应变;  $B$  为位移与应变转换矩阵;  $Y^e$  为单元节点位移;  $\Delta t$  为时间增量;  $\sigma^e$  为单元应力;  $D$  为单元弹性矩阵。

为保证橡胶轮胎自由旋转,采用多体连接单元 Hinge,将连接单元两端点连接于橡胶轮心,两轮胎

围绕连接单元 Hinge 旋转,外荷载施加于连接单元 Hinge 中部,具体见图 5。对轮心轴(连接单元)施加一定水平速度。根据桥梁支座应用情况,对支座  $x, y, z$  方向施加约束,其余支座施加  $x, y$  方向约束。确定橡胶轮胎与连续梁间为面-面接触,其垂向采用“硬接触”定义,见式(20);切向考虑接触面间允许有微小滑动<sup>[12-13]</sup>,见式(21)

$$f_n = \begin{cases} k_n C & (C \geq 0) \\ 0 & (C < 0) \end{cases} \quad (20)$$

$$f_s = \begin{cases} k_t n^e & (\text{黏结接触}) \\ \mu f_n & (\text{滑动接触}) \end{cases} \quad (21)$$

其中: $f_n, f_s$  分别为垂向力与切向力; $k_n, k_t$  为法向与切向接触刚度; $C$  为间隙值,由接触节点与目标间位置确定; $n^e$  为接触节点与目标面的弹性变形; $\mu$  为摩擦因数。

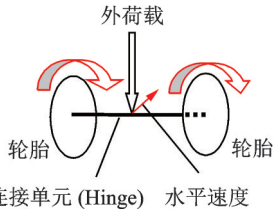


图 5 轮胎旋转示意图

Fig.5 Tire rotation axis diagram

### 4 实例分析

桥面设置一定不平顺,不平顺主要提供车辆振动,文中桥面没有设置路面不平顺,而在轮胎外荷载处(图 5)给予一定动态荷载,此动态荷载来源于参考文献[14]C 级路谱作用下整车模型后悬架间的动态力,动态力见图 6。

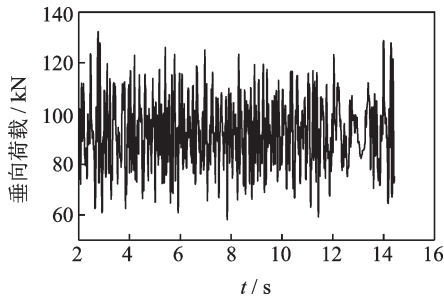


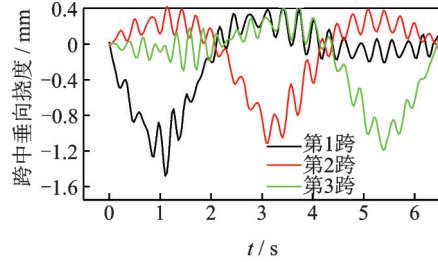
图 6 C 级路谱后轴悬架间动态力

Fig.6 Dynamic force of rear axle suspension of C-class road spectrum

#### 4.1 模型验证

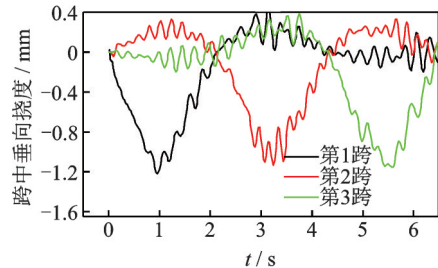
为验证轮胎模型准确性,将轮胎荷载作用下的垂向位移与移动荷载进行比较。图 7 为 50 km/h 速

度下三跨钢-混连续梁垂向挠度。



(a) 轮胎荷载下的垂向挠度

(a) Vertical deflection under tire load



(b) 移动荷载下的垂向挠度

(b) Vertical deflection under moving loads

图 7 三跨钢-混连续梁垂向挠度比较

Fig.7 Comparison of vertical deflection of three-span steel-concrete composite continuous beam

从图 7 看出:轮胎荷载作用下,三跨连续梁垂向挠度分别为 1.48, 1.12, 1.21 mm, 移动荷载作用下,连续梁垂向挠度分别为 1.22, 1.07, 1.12 mm;第 1 跨垂向挠度最大,第 3 跨垂向挠度次之,第 2 跨垂向挠度最小;移动荷载垂向挠度总体偏小,与轮胎荷载相比,垂向挠度分别小 21.3%, 4.7%, 8.0%。

图 8 为轮胎模型径向荷载变形试验。从图 8 看出:轮胎模型与实际轮胎径向荷载-位移曲线具有一定区别,但总体变化趋势相似,说明轮胎模型具有一定可用性。

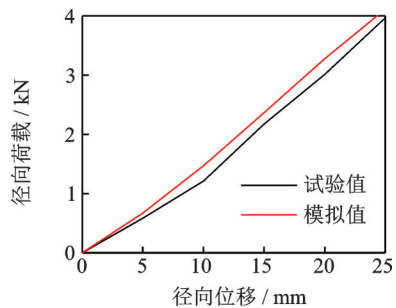


图 8 轮胎模型径向荷载试验

Fig.8 Tire model radial load test

#### 4.2 铺装层垂向挠度

从图 9 看出:轮胎荷载作用下,纵梁的垂向挠度最小,其最大数值为 1.05 mm;短横梁垂向挠度次之,

其余上面层、下面层、水泥层及钢板层等垂向挠度有一定差别,其最大值为1.12 mm;纵梁垂向挠度比桥面各铺装层小8.9%,整体挠度曲线呈对称布置。

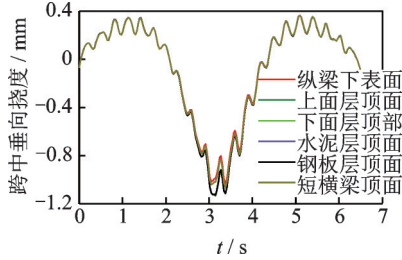


图9 第2跨桥面铺装层垂向挠度

Fig.9 Vertical deflection of the second span bridge deck pavement

从图10看出:轮胎滚动荷载作用下,当速度为50 km/h时,第2跨桥面垂向挠度为1.12 mm,当速度为90 km/h时,垂向挠度为0.93 mm;随着轮胎滚动速度增大,第2跨垂向挠度越来越小。

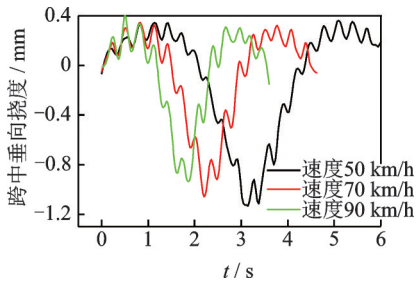


图10 第2跨桥面垂向挠度

Fig.10 Vertical deflection of the second bridge deck under different speeds

### 4.3 铺装层垂向应力

从图11看出:轮胎荷载作用下,上面层、下面层及水泥混凝土层的垂向应力分别为1.07,0.61,0.34 MPa;轮胎即将离开跨中时(时间段 $t=3.18\sim 3.43$  s),上面层、下面层及水泥混凝土层顶部出现拉应力(正值),数值很小。

从图12看出:轮胎荷载作用下,纵梁受力比较

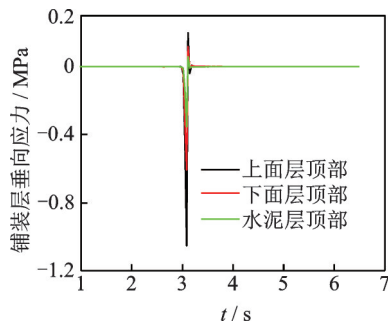


图11 桥面铺装层垂向应力

Fig.11 Vertical stress of bridge deck pavement

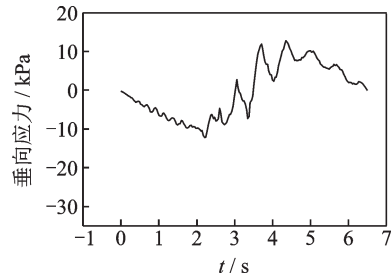


图12 纵梁垂向应力

Fig.12 Vertical stress of main longitudinal beam

复杂,既有受压阶段又有受拉阶段,在时间 $t=0\sim 3.25$  s阶段内最大压应力为13.2 kPa,在时间 $t=3.25\sim 6.50$  s阶段内最大拉应力为12.5 kPa,第2时间段应力上下波动较大。

### 4.4 铺装层纵向应力

从图13看出:轮胎荷载作用下,桥面各铺装层受力比较复杂,既有受压阶段又有受拉阶段,层间受力差别较大。其中上面层一直处于受压状态,其最大值为0.567 MPa;下面层在 $t=0\sim 2.17$  s处于受拉阶段,最大拉应力为45 kPa;在 $t=2.17\sim 4.17$  s既有受拉阶段又有受压阶段,其最大拉应力为205 kPa,最大压应力为138 kPa;在 $t=4.17\sim 6.50$  s处于受拉阶段,水泥混凝土层纵向应力变化与上面层相似。

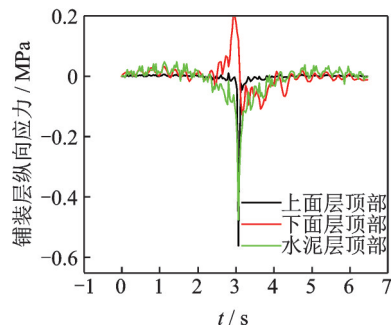


图13 桥面铺装层纵向应力

Fig.13 Longitudinal stress of bridge deck pavement

从图14看出:在 $t=0\sim 2.17$  s时间段内,纵梁主要承受压应力,其最大值为1.12 MPa,在 $t=2.17\sim 4.17$  s时间段内,纵梁主要承受拉应力,其最大值为5.06 MPa,在 $t=4.17\sim 6.50$  s时间段内,纵梁主要承受压应力,其最大值为4.98 MPa。

### 4.5 铺装层横向应力

从图15看出:轮胎荷载作用下,桥面铺装层横向受力比较复杂,尤其下面层处于拉应力与压应力交替状态,最大拉应力为112 kPa,最大压应力为240 kPa;上面层大部分处于受压状态,最大压应力值为223 kPa;水泥混凝土层大部分处于受压状态,

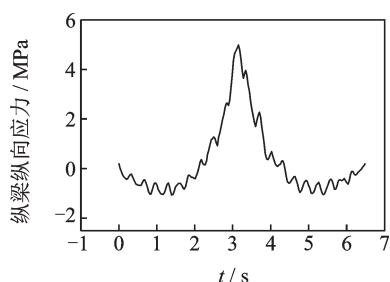


图14 纵梁底部纵向应力

Fig.14 Longitudinal stress at the bottom of the longitudinal beam

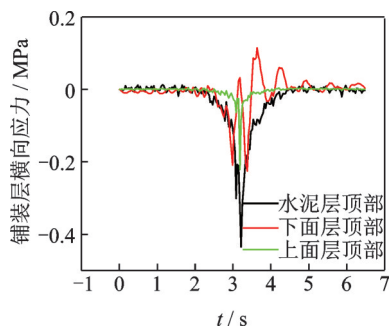


图15 桥面各铺装层横向应力

Fig.15 Lateral stress of bridge deck pavement

最大压应力为451 kPa。

从图16看出:轮胎荷载作用下,纵梁横向应力变化比较复杂,大部分处于受压状态,最大压应力为48 kPa,最大拉应力为41.5 kPa。

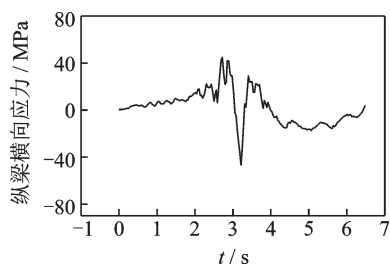


图16 纵梁底部横向应力

Fig.16 Lateral stress at the bottom of the main longitudinal beam

#### 4.6 铺装层频域分析

针对轮胎荷载作用下桥面铺装层动态响应进行快速傅里叶变换,则可以获得频域位移响应谱曲线。在速度50 km/h作用下,三跨连续梁各跨及各铺装层位移频域谱曲线见图17,18。

从图17看出:轮胎作用下,三跨连续梁的上面层跨中位移响应频率主要集中于0~6 Hz范围内,其中第2跨跨中上面层位移响应谱峰值最大,第1跨次之,第3跨峰值最小。从图18看出:上面层、下面层、水泥层、钢板层位移响应谱峰值有一定差别,差别很小。

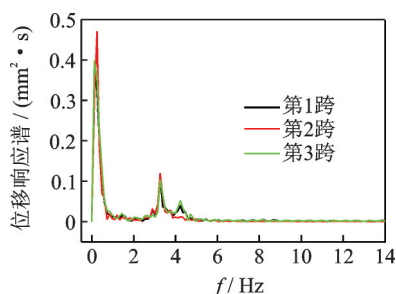


图17 上面层位移频域响应

Fig.17 Displacement frequency domain response of the upper layer

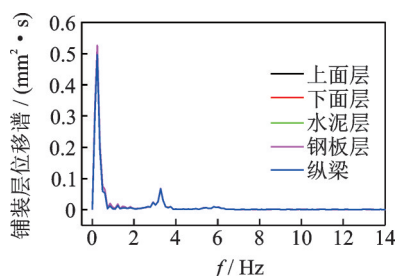


图18 第2跨梁各铺装层位移频域响应

Fig.18 Displacement frequency domain response of the pavement layer of the second span beam

## 5 结论

1) 三跨钢-混连续组合梁垂向挠度比移动荷载垂向挠度大,其中比第1跨垂向挠度大21.3%,比第2跨大4.7%,比第3跨大8.0%。上面层、下面层、水泥混凝土层、钢面板层垂向挠度几乎相同,其挠度值最大,横梁垂向挠度次之,纵梁产生垂向挠度最小,纵梁垂向挠度比桥面铺装层小8.9%。

2) 上面层垂向压应力最大,下面层次之,水泥混凝土层最小,纵梁处于拉应力与压应力交替状态。上面层、水泥混凝土层纵向应力变化趋势相似,下面层纵向应力出现拉应力与压应力交替现象。铺装层横向应力大部分处于受压状态,但下面层出现间断拉应力现象。

3) 由于上面层与下面层之间既出现拉应力又出现压应力,为了防止二层脱离,建议加强上面层与下面层之间粘结问题,如采用环氧沥青等高粘结材料。

4) 连续梁上面层位移响应频率集中于0~6 Hz范围,第2跨上面层位移响应谱峰值最大,第1跨次之,第3跨峰值最小,铺装层位移响应谱峰值相差很小。本研究对桥面铺装层结构优化设计具有较大指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] 侯忠明,夏禾,张彦玲,等.简谐荷载作用下组合梁动移响应分析[J].振动与冲击,2016,35(2):18-23.

- HOU Zhongming, XIA He, ZHANG Yanling, et al. Analytical dynamic slip solution for steel concrete composite beams under harmonic load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2):18-23. (in Chinese)
- [2] 邓露,段林利,何维,等.中国公路车-桥耦合振动车辆模型研究[J].中国公路学报,2018,31(7):92-100.  
DENG Lu, DUAN Linli, HE Wei, et al. Study on vehicle model for vehicle-bridge coupling vibration of highway bridges in china[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(7): 92-100. (in Chinese)
- [3] 张彦玲,冯康平,刘欢,等.钢-混凝土组合梁动力特性试验研究[J].广西大学学报(自然科学版),2017,42(1):97-107.  
ZHANG Yanling, FENG Kangping, LIU Huan, et al. Experimental research on dynamic responses of steel-concrete composite beams[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2017, 42(1):97-107. (in Chinese)
- [4] 魏志刚,时成林,刘寒冰,等.车辆作用下钢-混凝土组合简支梁动力特性[J].吉林大学学报(工学版),2017,47(6):1744-1752.  
WEI Zhigang, SHI Chenglin, LIU Hanbing, et al. Dynamic characteristics steel- concrete composite simply supported beam under vehicles[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2017, 47(6):1744-1752. (in Chinese)
- [5] 李韶华,周军魏,张志达.轮胎三向动态特性试验及非线性建模[J].机械工程学报,2018,54(18):85-96.  
LI Shaohua, ZHOU Junwei, ZHANG Zhida. Experiment and nonlinear modeling on tire dynamic characteristics of three directional[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(18):85-96. (in Chinese)
- [6] 李慧乐,夏禾,张楠,等.基于车桥耦合动力分析的桥梁动应力计算方法[J].中国铁道科学,2015,36(1):68-74.  
LI Huile, XIA He, ZHANG Nan, et al. Calculation method for dynamic stress of bridge based on vehicle-bridge coupled dynamic analysis[J]. China Railway Science, 2015, 36(1):68-74. (in Chinese)
- [7] 杨丰丰,赵显新,周兴林,等.轮胎-道路接触力动态加载装置的设计[J].机械设计与制造,2018(8):209-211.  
YANG Fengfeng, ZHAO Xianxin, ZHOU Xinglin, et al. Design of tire toad contact force dynamic loading device [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(8): 209-211. (in Chinese)
- [8] 宿晓峰,付平,丁忠军,等.基于Abaqus软件的轮胎有限元模型建立及仿真分析[J].橡胶工业,2019,66(2):121-127.  
SU Xiaofeng, FU Ping, DING Zhongjun, et al. Establishment and simulation analysis of tire finite element model based on abaqus software [J]. China Rubber Industry, 2019, 66(2):121-127. (in Chinese)
- [9] 刘修宇,曹青青,朱晟泽,等.沥青混凝土路面轮胎临界滑水速度数值模拟[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(5):1020-1025.  
LIU Xiuyu, CAO Qingqing, ZHU Shengze, et al. Numerical simulation of tire critical hydroplaning speed on asphalt pavement [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(5): 1020-1025. (in Chinese)
- [10] 严明星,王金昌.Abaqus有限元软件在路面结构分析中的应用[M].杭州:浙江大学出版社,2016:145-150.
- [11] 朱志辉,王力东,龚威,等.基于改进迭代模型的车-桥耦合系统竖向随机振动研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(11):120-130.  
ZHU Zhihui, WANG Lidong, GONG Wei, et al. Study on vertical random vibration of train-bridge coupled system based on improved iteration model [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2016, 43(11):120-130. (in Chinese)
- [12] 王扬,王丽娟,路永婕,等.复杂移动轮胎力作用下沥青路面黏弹性力学行为模拟研究[J].振动与冲击,2017,36(15):181-186.  
WANG Yang, WANG Lijuan, LU Yongjie, et al. Simulation on viscoelastic behavior of asphalt pavement under complex moving wheel load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(15):181-186. (in Chinese)
- [13] 哈斯巴根,朱凌,石琴,等.轮胎有限元建模过程优化及刚度特性仿真研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(7):944-948.  
HASI Bagen, ZHU Ling, SHI Qin, et al. Optimization of finite element modeling of tire and simulation of its stiffness characteristics[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2015, 38(7):944-948. (in Chinese)
- [14] 马如进,崔传杰,胡晓红,等.车辆激励下大跨径桥梁人非系统振动特性[J].振动与冲击,2018,37(12):96-101.  
MA Rujin, CUI Chuanjie, HU Xiaohong, et al. Vibration analysis of a long-span bridge with a pedestrian and non-motor system caused by vehicle excitation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(12):96-101. (in Chinese)



**第一作者简介:**严战友,男,1972年2月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为车路桥动力学耦合问题。曾发表《Research on mesoscopic response of asphalt pavement structure under vibration load》(《Shock and Vibration》2019, Vol.2019, No.1)等论文。  
E-mail: yanzhanyou@163.com

**通信作者简介:**陈恩利,男,1958年10月生,教授、博士生导师。主要研究方向为路面复杂非线性动力学研究。  
E-mail: cheneni@stdu.edu.cn