

文章编号: 1002-0268 (2009) 09-0085-06

大跨径钢桥面铺装层车辆动响应影响因素分析

徐勋倩

(南通大学 建筑工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 从耦合振动的角度出发, 研究大跨径钢桥面铺装层在车辆随机荷载作用下的响应机制。将汽车等效为 2 自由度 5 参数模型, 考虑桥梁表面不平顺产生的随机激励, 建立车-钢桥面铺装耦合振动分析模型。利用模态分析与时变系数常微分方程求解方法, 分析钢桥面铺装层在车辆随机荷载作用下的动力响应分布规律。定义由铺装层竖向位移、拉应力和拉应变表示的动力放大系数, 研究车速、桥面不平度、铺装层开裂损伤和粘结层滑移等对动力放大系数的影响。结果表明, 路面不平度、粘结层滑移是影响动力放大系数的主要因素, 在进行大跨径钢桥面铺装结构设计时可考虑动力放大系数为 1.5。

关键词: 桥梁工程; 车辆动荷载响应; 耦合振动; 钢桥面铺装; 路面不平度; 粘结层滑移
中图分类号: U443.33 文献标识码: A

Analysis of Dynamic Response of Long-span Steel Deck Pavement under Moving Loads

XU Xunqian

(School of Architecture, Nantong University, Nantong Jiangsu 226019, China)

Abstract: Based on the coupled vibration theory, dynamic behavior of long-span steel bridge deck pavement under random moving vehicles was studied. The vehicle was modeled as a two-DOF system with five parameters, and a three-dimensional vehicle-bridge coupling vibration model was established with consideration of the vertical random excitation caused by deck surface roughness. Based on modal analysis and the differential equation with time-varying coefficients, the dynamic response distribution generated by vehicle-deck pavement random interaction was analysed. The dynamic magnification factor expressed by vertical displacement, tensile stress and strain on the bridge deck pavement were defined to find out the effect of vehicle velocity, deck surface roughness, pavement crack and bonding layer slippage on the dynamic magnification factor. The result shows that surface roughness and bonding layer slippage are the major influencing factors on the dynamic magnification factor which can be up to 1.5 when designing bridge deck pavement structure.

Key words: bridge engineering; dynamic response due to moving vehicle; coupling vibration; deck pavement; surface roughness; bonding layer slippage

0 引言

桥面铺装是大跨径桥梁钢桥面的关键技术, 它的使用性能直接影响到交通的畅通和整个路网交通的正常运行。研究发现, 在车轮与桥面的相互作用中, 铺装层结构实际承受的是复杂的车辆随机荷载作用,

也是钢桥面铺装破坏的主要因素¹⁻⁴。因此, 近年来钢桥面铺装车辆的动荷载响应受到国内外学术界和工程界的高度重视⁵⁻⁸。

本文从车-桥面铺装耦合振动的角度出发, 研究桥面铺装和车辆间的动态相互作用⁹⁻¹⁰。把桥面铺装和车辆考虑为 2 个分离系统, 将汽车等效为 2 自由

收稿日期: 2008-10-25

基金项目: 江苏省高校自然科学基金资助项目 (07KJB580093); 南通大学自然科学基金资助项目 (08B16)

作者简介: 徐勋倩 (1973-), 女, 江西九江人, 博士, 副教授, 研究方向为大跨径桥梁钢桥面铺装。(dendak@163.com)

度5参数模型,并考虑到桥面的路面不平度影响,建立车-钢桥面铺装动力分析模型^[11-12]。采用模态分析的离散化方法,将复杂的偏微分方程问题转化为变系数常微分方程问题^[13-14]。基于此分析模型,研究车速、桥面不平度、铺装层开裂损伤和粘结层滑移等因素对车辆随机荷载作用下钢桥面铺装响应的影响作用。

1 车-钢桥面铺装耦合振动方程及求解

1.1 基本假定

以正交异性桥面板铺装体系模型作为研究对象,桥面沿横桥向取10个梯形加劲肋,沿纵桥向取3跨,包括4块横隔板,如图1所示。引入了以下几个基本假设:(1)沥青混凝土铺装层是连续的、完全弹性的、均匀的、各向同性的;(2)汽车简化为2自由度5参数模型,如图2所示;(3)横隔板底部完全约束,横向边缘无横向水平位移,纵向边缘无纵向水平位移,其中纵向是指车辆行驶的方向;(4)车轮与铺装层表面完全接触。

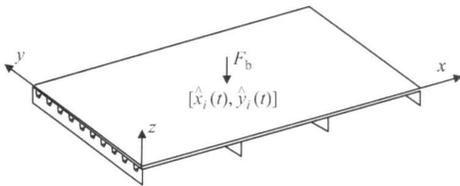


图1 钢桥面铺装体系模型

Fig 1 Model of steel bridge deck pavement

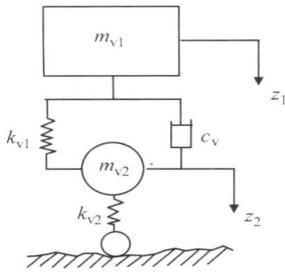


图2 汽车模型

Fig 2 Vehicle model

1.2 耦合振动方程

车-钢桥面铺装耦合振动方程为:

$$[M_v] \{\dot{d}_v\} + [C_v] \{d_v\} + [K_v] \{d_v\} = \{F_v^G\} + \{F_c\}, \quad (1)$$

$$[M_b] \{\ddot{d}_b\} + [C_b] \{\dot{d}_b\} + [K_b] \{d_b\} = \{F_b\}, \quad (2)$$

式中, $[M_v]$ 、 $[C_v]$ 、 $[K_v]$ 分别为车辆的质量、阻尼和刚度矩阵; $\{d_v\}$ 为车辆垂直位移向量; $\{F_v^G\}$ 为车辆自重; $\{F_c\}$ 为车辆与桥面铺装接触面节点处车辆对桥面的

作用力; $\{F_b\}$ 为车辆与桥面铺装接触面节点处的桥面对车辆的反作用力; $[M_b]$ 、 $[C_b]$ 、 $[K_b]$ 分别为桥面铺装结构的质量、阻尼和刚度矩阵。

车辆与桥面铺装结构间的耦合振动力, 即 $\{F_v^G\}$ 、 $\{F_c\}$ 、 $\{F_b\}$ 可表示为下部轮胎刚度的弹簧位移 $\{\Delta_1\}$ 函数为:

$$\{F_b\} = -\{F_c\} = [K_l] \{\Delta_1\} + [C_l] \{\dot{\Delta}_1\}, \quad (3)$$

式中, $[K_l]$ 和 $[C_l]$ 分别为车辆下部质量的悬挂刚度和悬挂阻尼。

汽车上部质量垂直位移 Z_a 、下部质量垂直位移 Z_b 、下部轮胎刚度的弹簧位移 Δ_1 和桥面的不平度 $r(x)$ 应满足位移协调方程:

$$\begin{aligned} Z_a &= Z_b + r(x) + \Delta_1, \\ Z_a &= Z_b + \dot{r}(x) + \Delta_1, \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\dot{r}(x) = \frac{dr(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{dr(x)}{dx} V(t)$, $V(t)$ 为车速。

将式(4)代入式(3), 车辆与钢桥面铺装接触面节点处的作用力为:

$$\begin{aligned} \{F_b\} &= -\{F_c\} = [K_l] [Z_a - Z_b - r(x)] + \\ & [C_l] [Z_a - Z_b - \dot{r}(x)]. \end{aligned} \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)、(2), 建立车-钢桥面铺装耦合振动方程为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_b & \\ & M_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{d}_b \\ \dot{d}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b + C_{bb} & C_{bv} \\ C_{vb} & C_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_b \\ d_v \end{Bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} K_b + K_{bb} & K_{bv} \\ K_{vb} & K_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_b \\ d_v \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} F_b^r \\ F_v^r + f_v^c \end{Bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, C_{bb} 、 C_{bv} 、 C_{vb} 、 K_{bb} 、 K_{bv} 、 K_{vb} 、 F_b^r 、 F_v^r 为与车辆与桥面铺装接触面节点处作用力相关的时变系数。

当车辆沿桥面纵向以一定的速度行使时, 桥面铺装的车辆荷载作用位置随时间而变化, 车桥面铺装接触面处桥面的不平度大小 $r(x)$ 亦非定值。由于接触点位置与时间相关, 所以每个时间步都须更新和分解式(6)的系统矩阵, 但桥面铺装结构的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵可保持不变。

1.3 路面不平度的描述

路面的不平度可实测或数值模拟, 桥上路面不平度包括路面、桥面和接缝处鼓起等信息。通常, 路面的不平度可以描述为一组零均值服从稳态高斯分布的随机实数^[15] 和采用路面功率谱密度 PSD 描述为:

$$S_d(f_i) = S_{d0}(f_0)(f/f_0)^{-\alpha}, \quad (7)$$

式中, $f_0 = 0.1 \text{ cycles/m}$ 为参考空间频率; α 为谱参数 ($\alpha = 2\alpha$); f 为位于功率谱密度的定义区间内的空间频率。

$S_d(f)$ 经傅立叶变换后,路面的不平度用时域表示为:

$$r(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{4S(f_i)\Delta f} \cos(2\pi f_i x + \theta_i), \quad (8)$$

式中, $f_i = i\Delta f$ 为空间频率 ($\Delta f = 1/N\Delta$); Δ 为采样间距; N 为模拟随机不平顺的点数; θ_i 为一组均匀分布在 0 和 2π 之间的随机相角。

1.4 求解方法

应用模态分析方法,桥面铺装结构动响应可表示为:

$$\{d_b\} = [\{\phi_1\}\{\phi_2\}\dots\{\phi_n\}]\{\xi_1 \xi_2, \dots, \xi_n\}^T = [\phi_b]\{\xi_b\}^T, \quad (9)$$

式中, n 为铺装结构考虑的模态数; $\{\phi_i\}$ 为铺装结构的正交模态特征向量, $i = 1, 2, \dots, n$, 有:

$$\{\phi_i\}^T [M_b] \{\phi_i\} = 1, \quad (10)$$

$$\{\phi_i\}^T [M_b] \{\phi_i\} = \omega_i^2, \quad (11)$$

$$\{\phi_i\}^T [C_b] \{\phi_i\} = 2\omega_i\eta_i [M_b], \quad (12)$$

式中, $\{\omega\}$ 为正交模态特征向量的圆频率; ξ_i 为正交模态特征向量坐标函数。

将式(9)~(12)代入式(6)中,有:

$$\begin{bmatrix} I \\ M_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_b \\ d_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\omega\eta I + \phi_b^T(C_{bb})\phi_b & C_{bv} \\ \phi_b^T C_{vb}\phi_b & C_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_b \\ d_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega^2 I + \phi_b^T(K_{bb})\phi_b & K_{bv} \\ \phi_b^T K_{vb}\phi_b & K_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_b \\ d_v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \phi_b^T F_b^T \\ F_v^T + F_v^G \end{Bmatrix}. \quad (13)$$

具体计算步骤为,通过 ANSYS9.0 建立铺装结构三维有限元模型,并采用壳单元(Shell63)和梁单元(Beam3)离散化钢桥面铺装和纵向加劲肋。对钢桥面铺装结构的振动模态进行分析,确定结构的正交模态特征向量 $\{\phi_i\}$ 和圆频率 $\{\omega\}$ 。利用 Matlab6.5 编程技术,由 ANSYS 导入质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵、模态和圆频率等。基于零初试条件,由式(5)计算车辆荷载作用力。采用 Newmark 方法,迭代求解式(13)各个时间步的车辆荷载作用下钢桥面铺装层的动力响应量(竖向位移、拉应力和拉应变等)。

2 实例分析

2.1 车-钢桥面铺装耦合振动系统计算参数

假设荷载在铺装层表面移动时,荷载作用面积不变而均布荷载的大小不断变化。车辆荷载沿桥面纵向(x 轴)从模型中跨的一端横隔板行驶到另一端。为简化问题,在汽车正常行驶时,假设汽车轮载为垂直均布矩形荷载。由规范¹⁶,计算荷载采用标准车,车轮与铺装层的接触面积为 $350 \times 200 \text{ mm}^2$ 。将车辆通过桥面

所需时间根据车速以步长 Δt 划分时间步。选择标准车的结构参数:上部质量 $m_{v1} = 9 \times 10^{-3} \text{ kg}$,下部质量 $m_{v2} = 1 \times 10^3 \text{ kg}$,悬挂系统阻尼 $c_v = 4 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s/m}$,悬挂系统弹簧刚度 $k_{v1} = 4.8 \times 10^5 \text{ N/m}$,车轮刚度 $k_{v2} = 1.9 \times 10^6 \text{ N/m}$,如图 2 所示。铺装结构的桥面顶板、纵向加劲肋和横隔板均采用 Q345-D 钢⁷,钢桥面板厚度 $h_2 = 14 \text{ mm}$,铺装层厚度 $h_1 = 55 \text{ mm}$,隔板厚度 $t = 10 \text{ mm}$,加劲肋几何尺寸(上口宽度 $b_{上} \times$ 下口宽度 $b_{下} \times$ 高度 $h \times$ 壁厚 $t_0 = 300 \text{ mm} \times 170 \text{ mm} \times 280 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$),横隔板间距 $L = 3.75 \text{ m}$,钢板与沥青铺装模量比 $n_1 = 300$,如图 3 所示。

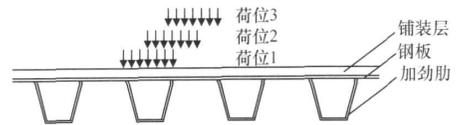


图 3 荷载沿桥面横向的标准位置

Fig 3 Standard loading positions on cross section of deck pavement

2.2 不同横向作用位置的影响

为确定车辆荷载作用的最不利位置,对 3 个不同横向荷载作用位置进行比较分析,如图 3 所示。荷位 1 为荷载对称施加于一加劲肋正上方;荷位 2 为荷载以一加劲肋边为中心对称施加于正上方;荷位 3 为荷载施加于相邻两加劲肋中心之间的正上方。3 种不同荷载作用位置的计算结果如图 4 所示。

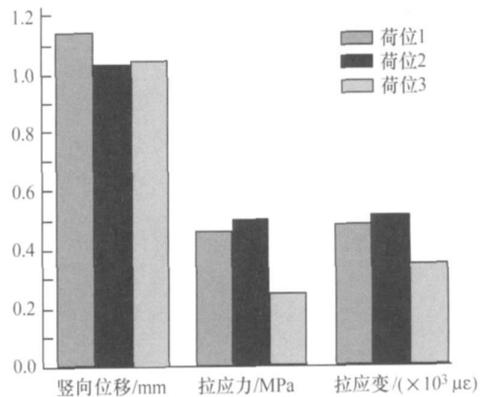


图 4 不同横向作用位置下动响应最大幅值比较

Fig 4 Maximum dynamic response at different lateral loading positions

图 4 比较的结果表明,铺装层竖向位移最不利荷载作用位置为荷位 1,铺装层表面横向拉应力/拉应变最不利荷载作用位置为荷位 2。因此,分别以荷位 1 和荷位 2 作为铺装层竖向位移和拉应力/应变响应的标准横向荷位。

2.3 车速的影响

选取桥面不平度为好,分析行车车速因素的影响。在不同车速条件下, $v=20、40、60、80、100、120$ km/h, 中跨钢桥面铺装层竖向位移、拉应力/变的动力响应最大幅值如图5~图7。

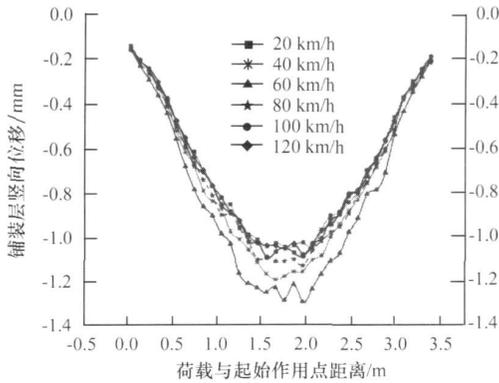


图5 不同车速下铺装层竖向位移最大幅值变化

Fig 5 Variation of maximum vertical displacement of deck pavement with different vehicle velocities

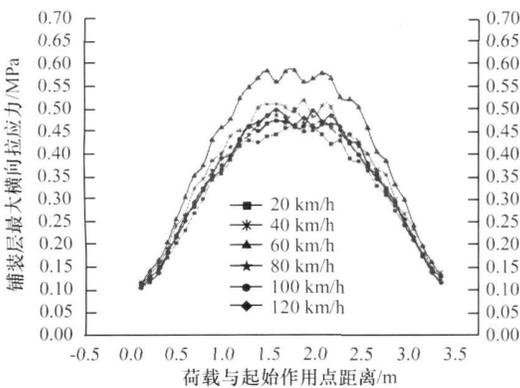


图6 不同车速下铺装层拉应力最大幅值变化

Fig 6 Variation of maximum tensile stress with different vehicle velocities

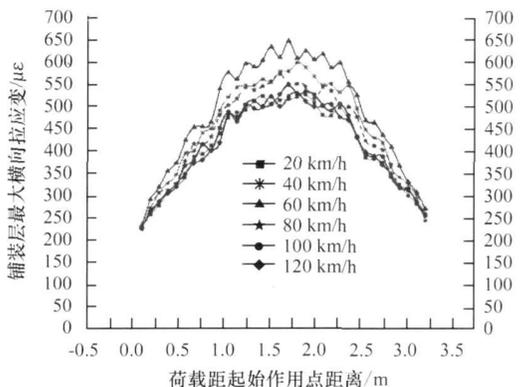


图7 不同车速下铺装层拉应变最大幅值变化

Fig 7 Variation of maximum tensile strain with different vehicle velocities

由图5~图7可以得知,当车辆动荷载沿桥面纵向移动时,铺装层的动响应均是波动性较强的曲线,且最大动响应的峰值点都在跨中位置附近。由此,定义跨中截面处铺装层竖向位移、拉应力/变的动力放大系数 I_w 、 I_σ 、 I_ϵ 为:

$$I_w = \frac{w_d}{w_s}, I_\sigma = \frac{\sigma_d}{\sigma_s}, I_\epsilon = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_s} \quad (14)$$

式中, w_d 、 σ_d 、 ϵ_d 和 w_s 、 σ_s 、 ϵ_s 分别为跨中截面处铺装层竖向位移、拉应力和拉应变的动、静响应。计算不同车速条件下各项动力放大系数的最大幅值,结果如表1所示。

表1 不同车速条件下动力放大系数的最大幅值

Tab 1 Maximum dynamic magnification factor with different vehicle velocities

车速/(km·h ⁻¹)	20	40	60	80	100	120
I_w	1.25	1.42	1.43	1.33	1.31	1.29
I_σ	1.11	1.26	1.27	1.18	1.16	1.15
I_ϵ	1.17	1.33	1.34	1.25	1.23	1.21

从表1可以看出,竖向位移动力放大系数一般大于拉应力和拉应变的动力放大系数;车速从20 km/h变化到60 km/h,铺装层动力放大系数幅值不断增加,车速从60 km/h变化到120 km/h,3项动力放大系数幅值有所减小;车速为40~60 km/h时,动力放大系数幅值为最大,分别为1.43、1.27、1.34;最大值与最小值相差为0.18、0.16、0.17,波动幅值约为10%。因此,当桥面不平整系数为好,车速对铺装层动力放大系数是有一定的影响,但影响相对较小。

2.4 铺装层开裂损伤和不平度的影响

钢桥面铺装主要破坏类型的调查结果表明,在不同行车荷载和自然环境因素影响下,钢桥面沥青混合料铺装使用过程中出现的疲劳开裂较为普遍,尤其是沿桥面纵向疲劳开裂。为此,对不同部位铺装层发生不同程度的沿桥面纵向开裂损伤(0、1%、5%、10%、15%和20%)情况下,汽车通过桥面铺装(桥面不平度为好)动力放大系数的变化情况进行探讨。定义开裂损伤因子 α'_s 为单元刚度减少的百分比,开裂损伤后铺装层单元的沿桥面横向抗弯刚度为:

$$k'_{ed} = k'_{e0} (1 - \alpha'_s) \quad (0 \leq \alpha'_s \leq 100\%, j = 1, 2, \dots, m), \quad (15)$$

式中, k'_{e0} 为铺装层损伤之前单元的沿桥面横向原始刚度; k'_{ed} 为铺装层损伤之前 j 单元的沿桥面折减刚度。

铺装层沿桥面纵向裂缝的开裂长度取200 mm,对开裂处铺装层单元根据其损伤程度进行单元刚度折减。车辆以60 m/s匀速通过发生不同部位不同程度

损伤的桥面时, 车辆荷载作用下钢桥面铺装层的动力放大系数如图 8~图 10。

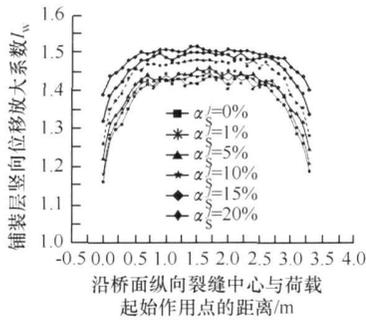


图 8 不同程度桥面铺装损伤下
竖向位移动力放大系数

Fig 8 Dynamic magnification factor of factor vertical displacement with different pavement damages

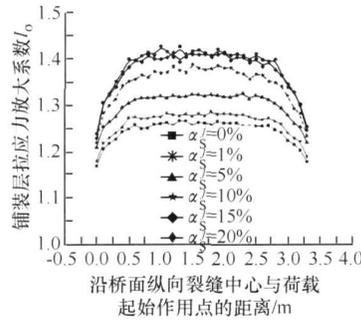


图 9 不同程度桥面损伤下拉应力动力放大系数最大幅值变化

Fig 9 Variation of maximum dynamic magnification factor of tensile stress with different pavement damages

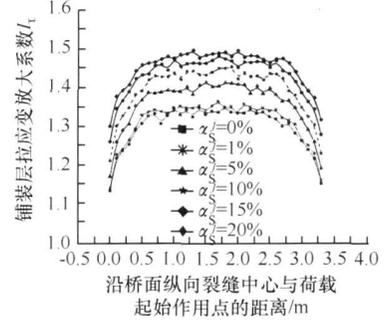


图 10 不同程度桥面铺装损伤下
拉应变最大幅值变化

Fig 10 Maximum tensile strain with different pavement damages

从图 8~图 10 可以得知, 动力放大系数系数对桥梁端部的损伤最不敏感, 而对中部的损伤却很敏感, 当桥梁出现损伤时, 应该即时予以修复, 否则, 损伤会很快发展。随着桥面损伤程度的增加, 桥面时动力放大系数最大幅值是有所增大的, 但变化不是很大, 一般不超过 10%。值得注意的是, 铺装发生开裂损伤会导致桥面不平顺程度的增加, 也将影响到桥面铺装动力效应的。因此, 有必要对不同桥面不平顺程度下车辆动荷载响应进行比较分析。

车辆分别以 60 m/s 匀速通过不同不平顺等级的桥面时, 钢桥面铺装动力放大系数最大幅值随着路面不平顺等级的变化情况如表 2 所示。

表 2 路面不同不平顺等级下动力放大系数幅值

Tab. 2 Dynamic magnification factors with different deck pavement roughnesses

等级	I_w	I_σ	I_ϵ
差	1.77	1.63	1.72
中	1.63	1.48	1.51
好	1.43	1.27	1.34

表 2 结果显示, 当行车速度相同时, 动力放大系数随着路面不平顺等级增加而提高, 变化幅度接近 30%。建议当桥面铺装出现损伤时, 应该即时予以修复, 以保持良好的桥面路况, 进而降低车辆动荷载响应。

2.5 铺装层粘结层失效或脱层的影响

车辆以 60 m/s 的速度通过两种极限状态的桥面:

(1) 钢板和铺装层之间粘结层完好; (2) 钢板和铺装层之间粘结层破坏 (失效或脱层), 对比分析铺装层粘结层失效或脱层因素的影响。2 种极限状态下, 钢桥面铺装动力放大系数最大幅值的变化情况如表 3 所

示。

表 3 不同粘结层状况下动力放大系数幅值

Tab. 3 Dynamic magnification factors with different bonding layers

粘结层状况	I_w	I_σ	I_ϵ
完好	1.43	1.27	1.34
失效	1.78	1.52	1.62

表 3 结果显示, 当行车速度相同时, 动力放大系数随着铺装层粘结层失而明显提高, 变化幅度可达 20%~30%。可见, 粘结层失效或脱层对铺装层动力放大系数有较大影响。

3 结语

(1) 沿桥面横向不同荷载作用位置对桥面铺装动力效应有较大影响。荷位 1 和荷位 2 分别是铺装层竖向位移、拉应力/变的最不利位置。

(2) 铺装层的动荷载响应均是波动性较强的曲线, 且最大动响应的峰值点都在跨中位置附近。

(3) 对比分析了车速和铺装层破损等相关因素对钢桥面铺装车辆荷载动力放大系数的影响, 桥面铺装开裂损伤和粘结层滑移对钢桥面铺装车辆动力放大系数的影响相对要大。动力放大系数系数对桥梁端部的损伤最不敏感, 而对中部的损伤却很敏感, 当桥面铺装出现损伤时, 应该及时予以修复。

(4) 一般新开通大跨径桥梁沥青混凝土铺装层表面平整度质量较好, 在进行铺装层结构设计计算以及复合梁疲劳试验时, 可考虑动力放大系数为 1.5。

参考文献:

References

[1] CHEN Shengjin, YANG Kuochen Inelastic Behavior of Or-

- thotropic Steel Deck Stiffened by U-shaped Stiffeners [J]. Thin-Walled Structures, 2002, 40 (6): 537-553.
- [2] GUTKOWSKI R M, NATTERER J, FAVRE P A. Field Load Tests of an Anisotropic-grid Timber Bridge [J]. Construction and Building Materials, 2006 (9): 1-11
- [3] 黄卫, 刘振清. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计 [J]. 土木工程学报, 2007, 40 (9): 51-59.
HUANG Wei, LIU Zhenqing. Design of Deck Pavement for Long-span Steel Bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (9): 51-59.
- [4] RONALDO C B, MICHÈLE S P, ELIANE M L C. Fatigue Life Estimates for a Slender Orthotropic Steel Deck [J]. Constructional Steel Research, 2007 (5): 1125-1134.
- [5] 李昶, 邓学钧. 钢箱梁桥桥面铺装层动态响应分析 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2004, 34 (2): 253-256
LI Chang, DENG Xuejun. Dynamic Response of Deck Overlays of Steel Box under Live Load [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2004, 34 (2): 253-256
- [6] 单景松, 黄晓明. 移动荷载下路面结构应力响应分析 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (1): 10-13.
SHAN Jingsong, HUANG Xiaoming. Dynamic Response Analysis of Pavement Structure under Moving Load [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (1): 10-13
- [7] 钱振东, 刘云. 考虑不平度的桥面铺装动响应分析 [J]. 土木工程学报, 2007, 40 (4): 51-59.
QIAN Zhendong, LIU Yun. Analysis of the Dynamic Response of Steel-deck Pavement with Roughness [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (4): 51-59.
- [8] LAW S S, ZHU X Q. Bridge Dynamic Response Due to Road Surface Roughness and Braking of Vehicle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 28 (2): 805-830.
- [9] 夏禾. 车辆与结构动力相互作用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002
XIA He. Dynamic Interactions between Vehicles and Structures [M]. Beijing: Science Press, 2002
- [10] 袁明, 余钱华, 颜东煌. 基于车-桥系统耦合振动理论的大跨 PC 连续刚构桥冲击系数研究 [J]. 中国公路学报, 2008, 21 (1): 72-120.
YUAN Ming, YU Qianhua, YAN Donghuang. Research on Impact Coefficient for PC Continuous Rigid Frame Bridges with Long-span under Theory of Vehicle-bridge System Coupling Vibration [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21 (1): 72-120.
- [11] 林玉森, 李小珍, 强士中. 车桥耦合振动中 2 种轮轨接触模型的比较分析 [J]. 中国铁道科学, 2007, 28 (6): 70-74.
LIN Yusen, LI Xiaozhen, QIANG Shizhong. Contrast Analysis of Two Wheel-rail Contact Models in the Coupling Vibration of Vehicle-bridge System [J]. China Railway Science, 2007, 28 (6): 70-74.
- [12] 肖新标, 沈火明. 三种车桥耦合振动分析模型的比较研究 [J]. 西南交通大学学报, 2004, 39 (2): 172-175.
XIAO Xinbiao, SHEN Huoming. Comparison of Three Models for Vehicle Bridge Coupled Vibration Analysis [J]. Journal of Southwest Jiao Tong University, 2004, 39 (2): 172-175.
- [13] BOWE C J, MULLARKEY T P. Wheel-rail Contact Elements Incorporating Irregularities [J]. Advances in Engineering Software, 2005, 36 (11/12): 827-837
- [14] 程保荣, 周玉勋. 车桥耦合系统动力分析的模态综合技术 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42 (8): 1 083-1 086
CHENG Baorong, ZHOU Yuxun. Dynamic Analysis of a Coupled Vehicle-bridge System Using Modal Synthesis [J]. Tsinghua University: Science & Technology Edition, 2002, 42 (8): 1083-1086
- [15] 刘献栋, 邓志党, 高峰. 基于逆变换的路面不平度仿真研究 [J]. 中国公路学报, 2005, 18 (1): 122-126
LIU Xiandong, DENG Zhidang, GAO Feng. Study of Simulation of Road Roughness Based on Inverse Transform [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18 (1): 122-126
- [16] 中华人民共和国交通部. JTG B01-2003 公路工程技术标准 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2003
P. R. China Ministry of Communications JTG B01-2003 Technical Standard for Highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2003.