

高速铁路板式轨道参数与动力特性的研究

卿启湘¹, 王永和², 李继超²

(1. 湖南大学 机械与汽车工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 运用板式轨道-路基系统半空间垂向耦合的动力计算模型, 研究了高速铁路板式轨道的动力特性, 探讨了板式轨道的CA砂浆垫层厚度和扣件刚度对系统动力性能的影响规律。扣件、轨下胶垫和CA砂浆层的弹性、阻尼特性对轨道及轨下结构动力性能的影响极大, 减少扣件或轨下胶垫的刚度、增加CA砂浆层的厚度, 可改善板式轨道的动力学性能。

关键词: 板式轨道; 移动载荷; CA砂浆层; 扣件刚度; 动力特性

中图分类号: U213.242

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)01-0021-07

Research on Parameters and Dynamic Properties of High-Speed Railway Slab Tracks

Qing Qixiang¹, Wang Yonghe², Li Jichao²

(1. School of Mechanical Engineering and Automobile, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract Based on the theory of slab track-roadbed system coupling dynamics, a semi-spatial timing coupled vertical roadbed-slab track interaction model is developed, and the dynamic properties of slab tracks used in high-speed railways are investigated. The effects of the elasticity and damping of the CA layer and stiffness of fastener-rubber pad structures under the slab on system dynamics are also analyzed. The spring-damping properties of fastener-rubber pads system and CA layer have influenced greatly on the dynamic characteristics of the track structure and roadbed system. The dynamic properties of the track and roadbed can be improved to reduce the stiffness of the fastener-rubber pad structures, or increase the thickness of the CA layer.

Key words: slab track; moving load; CA layer; stiffness of fastener-rubber pad structures; dynamic response

0 前言

在我国的客运专线上使用的无碴轨道结构中, 板式轨道以其结构简单、施工方便, 被认为是有发展前途的无碴轨道型式之一。秦沈客运专线上的狗河特大桥(长741 m、直线)、沙河特大桥(长740 m、曲线)和赣龙线枫树排隧道(长719 m)分别铺设了板式轨道试验段, 武广客运专线大部分路段都要铺设板式轨道。但板式轨道动力学方面的研究较少, 一般文献^[1,2]将轨道板简化为梁进行动力学分析, 得出了一些结论, 但难以满足工程要求, 难点在于无碴轨道、道床和路基的刚度、阻尼参数的识别, 缺点在于不能深入研究高

速铁路无碴轨道及路基中的动态响应特征。本文运用板式轨道-路基系统半空间垂向耦合动力计算模型^[3], 深入仔细地研究了高速铁路板式轨道结构的动力特性, 同时就板式轨道以下砂浆厚度和扣件的刚度对板式轨道动力学性能的影响规律进行了探讨, 为板式轨道动力学参数的优化提供了依据。

1 基本理论

1.1 能量方程

板式轨道-路基系统由钢轨、扣件和轨下胶垫、轨道板、CA砂浆层、整体混凝土道床、路基和地基等结

收稿日期: 2007-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678177), 湖南省科技厅基金资助项目(04GK3039)

作者简介: 卿启湘(1964-), 男, 湖南隆回人, 湖南大学副教授, 博士, 主要从事道路与铁道工程, CAD设计方面的教学与研究。

构层组成,不同的结构须用不同的单元去离散。如钢轨采用 Timoshenko 梁单元,轨道板和 CA 砂浆层采用板单元,钢轨与轨道板之间的扣件和轨下胶垫结构采用弹簧-阻尼单元,地基层采用无限元,以消除边界效应的影响,其它结构层采用三维实体单元。不同材料接触面之间相互耦合,无相对位移,其耦合约束方程采用 Lagrange 乘子法处理^[3]。

本文将无碴轨道-路基系统视为若干个子结构,以求出模型各组成部分的能量,然后将不同性质单元耦合能量纳入到总能量矩阵中,便可得在 t 时刻的该系统总能量,最后应用能量驻值原理就可得到此系统各个子结构的动力矩阵方程。其总能量泛函 $W^*(t)$ 包括以下几个部分,即

$$W^*(t) = W(t)^{\text{int}} + W(t)^{\text{ext}} + W(t)^{\text{kin}} + W(t)^{\text{dam}} + W(t)^{\text{coup}}, \quad (1)$$

式中: $W(t)^{\text{int}}$ 为系统应变能,包括钢轨、扣件、垫板、轨道板、整体道床板、CA 砂浆层、整体混凝土道床、路基和地基等结构层的总变形能;

$W(t)^{\text{ext}}$ 为各种外力所作的功,亦包括各种轮轨力的功;

$W(t)^{\text{kin}}$ 为系统的动能,包括上述各子结构的振动动能;

$W(t)^{\text{dam}}$ 为阻尼力所作的功,包括结构阻尼和材料阻尼的功;

$W(t)^{\text{coup}}$ 为约束力所作的功,即上述系统各子结构单元位移耦合约束所增加的变形能。

对式 (1) 取变分有

$$\delta W^*(t) = \delta W(t)^{\text{int}} + \delta W(t)^{\text{ext}} + \delta W(t)^{\text{kin}} + \delta W(t)^{\text{dam}} + \delta W(t)^{\text{coup}}, \quad (2)$$

动力学能量驻值原理是由虚位移原理导出的。虚位移原理认为,系统虚位移过程中,作用于系统上的荷载不变化。而虚位移从物理概念上来说,就是位移的一阶变分。因此,对体系进行一阶变分时,只对 $W^*(t)$ 中的位移参数进行变分,作用于系统的惯性力、阻尼力、干扰力、重力和轮轨力等外力均不能变分。一阶变分按照微分法进行,并且满足叠加原理。这样,就可以导出各子系统的质量、刚度和阻尼矩阵以及内部、外部节点力^[4]。

1.2 连续体完全的 Lagrangian 格式弱形式

桥梁混凝土、路基和地基等连续体的强形式或广义动量平衡方程^[5]包括动量方程、面力边界条件和内部连续性条件,它们在初始(参考)构形上分别为

$$\frac{\partial P_{ji}}{\partial X_j} + \rho_0 b_i - \rho_0 \ddot{u}_i = 0, \text{ 在 } \Omega_0 \text{ 上}; \quad (3)$$

$$n_j^0 P_{ji} - \bar{t}_i^0 = 0, \text{ 在 } \Gamma_i^0 = \Gamma_0 - \Gamma_{ii}^0 \text{ 上}; \quad (4)$$

$$[[n_j^0 P_{ji}]] = 0, \text{ 在 } \Gamma_{\text{int}}^0 \text{ 上}. \quad (5)$$

式中: P 为名义应力;

ρ_0 为初始构形 Ω_0 的质量密度;

b_i 为体力;

\ddot{u}_i 为加速度;

\bar{t}_i^0 为给定的初始边界力;

Γ_0 为整个初始边界;

Γ_i^0 为给定的初始外力边界;

Γ_{ii}^0 为已知的初始位移边界;

Γ_{int}^0 为物体中所有应力不连续表面的集合,它们通常为不同材料之间的界面;

n^0 为已知边界 Γ_i^0 上的初始外法矢。

取变分 δu 和动量方程式 (3) 的乘积,并在初始构形上积分,则有

$$\int_{\Omega_0} \delta u_i \left(\frac{\partial P_{ji}}{\partial X_j} + \rho_0 b_i - \rho_0 \ddot{u}_i \right) d\Omega_0 = 0. \quad (6)$$

在式 (6) 中,名义应力 P 是与本构方程和应变-位移方程相关联的函数。这个弱形式是没有用的,因为它要求试位移具有 C^1 连续性,这是由于名义应力 P 的导数出现在式 (3) 中。式 (6) 中的第一项可以应用导数乘法规则展开,得到

$$\int_{\Omega_0} \delta u_i \frac{\partial P_{ji}}{\partial X_j} d\Omega_0 = \int_{\Omega_0} \left[\frac{\partial}{\partial X_j} (\delta u_i P_{ji}) - \frac{\partial (\delta u_i)}{\partial X_j} P_{ji} \right] d\Omega_0, \quad (7)$$

式 (7) 中的第一项可以通过 Gauss 定理表示为一个边界积分。假设不连续发生在有限表面 Γ_{int}^0 上,则有

$$\int_{\Omega_0} \frac{\partial}{\partial X_j} (\delta u_i P_{ji}) d\Omega_0 = \int_{\Gamma_{\text{int}}^0} \delta u_i \llbracket n_j^0 P_{ji} \rrbracket d\Gamma_0 + \int_{\Gamma_0} \delta u_i n_j^0 P_{ji} d\Gamma_0, \quad (8)$$

由内部连续性条件

$$\llbracket n_j^0 P_{ji} \rrbracket = 0, \text{ 在 } \Gamma_{\text{int}}^0 \text{ 上}, \quad (9)$$

则式 (6) 右边的第一个积分为零。

又因边界条件:

$$\text{在 } \Gamma_{ii}^0 = \Gamma_0 - \Gamma_{ii}^0 \text{ 上}, n_j^0 P_{ji} = \bar{t}_i^0; \text{ 在 } \Gamma_{ii}^0 \text{ 上}, u_i = \bar{u}_i,$$

$$\text{且 } \delta u_i = 0, \Gamma_{ii}^0 \cup \Gamma_{ii}^0 = \Gamma_0, \Gamma_{ii}^0 \cap \Gamma_{ii}^0 = \emptyset, i=1 \sim n_{\text{SD}}.$$

再加上式 (8) 右边的第二个积分已简化到边界上,则式 (8) 可化为

$$\int_{\Omega_0} \frac{\partial}{\partial X_j} (\delta u_i P_{ji}) d\Omega_0 = \int_{\Gamma_0} \delta u_i n_j^0 P_{ji} d\Gamma_0 = \sum_{i=1}^{n_{\text{SD}}} \int_{\Gamma_i^0} \delta u_i \bar{t}_i^0 d\Gamma_0. \quad (10)$$

取变形梯度的分量形式,即

$$F_{ij} \equiv \frac{\partial x_i}{\partial X_j} = \frac{\partial (u_i + X_i)}{\partial X_j}, \quad (11)$$

对式 (11) 变分有

$$\delta F_{ij} = \delta \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} \right) = \frac{\partial (\delta u_i)}{\partial X_j}. \quad (12)$$

将式 (10) 代入式 (6), 并应用式 (12), 得到

$$\int_{\Omega_0} (\delta F_{ij} P_{ji} - \delta u_i \rho_0 b_i + \delta u_i \rho_0 \ddot{u}_i) d\Omega_0 - \sum_{i=1}^{n_{\text{SD}}} \int_{\Gamma_i^0} \delta u_i \bar{t}_i^0 d\Gamma_0 = 0. \quad (13)$$

式(13)是关于动量方程、面力边界条件和内部连续性条件的完全 Lagrangian 格式弱形式。

1.3 Timoshenko 梁

若考虑钢轨的剪切变形, 则钢轨梁弯曲问题最小位能原理的泛函可表示为

$$\Pi_p = \int_0^l \frac{1}{2} E I \kappa^2 dx + \int_0^l \frac{G A}{k} \gamma^2 dx - \int_0^l q w dx - \sum_j P_j w_j + \sum_k M_k \theta_k + \int_0^l \frac{1}{2} \rho A (\dot{w})^2 dx, \quad (14)$$

式中: E 为弹性模量;

G 为剪切模量;

I 为截面弯曲惯性矩;

w 为挠度;

κ 为梁的曲率;

γ 为剪切变形;

q 为横向作用的分布载荷;

P_j 、 M_k 分别为横向集中载荷和弯矩;

A 为横截面积;

k 为截面剪切校正因子。

由于在考虑剪切变形影响的梁弯曲理论中仍保持截面为平面的假设, 但实际上剪切应力和剪切应变在截面上不是均匀分布的, 截面不再是平面, 因此需要引入校正因子。在已有的研究工作中, 有许多不同的校正方法。在有限元分析中, 较多的是采用能量等效的校正方法, 据此, 对于矩形截面, $k=6/5$; 对于圆截面, $k=10/9$ 。

1.4 Mindlin 板

若把轨道板和 CA 砂浆层看成 Mindlin 板, 则考虑剪切变形的 Mindlin 厚板与微分方程及边界条件相等效的最小位能原理的泛函 Π_p 表达式为

$$\Pi_p = \iint_A \left(\frac{1}{2} \kappa^T D \kappa - q w \right) dx dy - \int_{S_1} \bar{V}_n w dS + \int_{S_2+S_3} \bar{M}_n \frac{\partial w}{\partial n} dS + \iint_A \frac{1}{2} \rho \cdot t (\dot{w})^2 dx dy, \quad (15)$$

式中: \bar{M}_n 为边界 S_2 或 S_3 上给定的弯矩;

\bar{V}_n 为边界 S_1 上给定横向载荷之和, 即

$$w|_{S_1} = \bar{w}, \quad M_n|_{S_1} = \bar{M}_n, \quad (16a)$$

$$M_n|_{S_3} = \bar{M}_n, \quad \left(Q_n + \frac{\partial M_{ns}}{\partial s} \right) \Big|_{S_3} = \bar{V}_n, \quad (16b)$$

式中: \bar{w} 为边界 S_2 上给定的位移;

Q_n 是边界 S_3 截面上单位长度的横向剪力, 即

$$Q_n = \frac{\partial M_n}{\partial n} + \frac{\partial M_{ns}}{\partial s} = - \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial n^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \right), \quad (17)$$

其中 s 和 n 分别表示边界的切向和法向。

式(15)中 D 为弹性关系矩阵, 它定义了板单元

广义应力-应变关系

$$M = D \kappa. \quad (18)$$

这里,

$$D = \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} = D_0 \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中: $D_0 = \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)}$ 是板的弯曲刚度;
 ν 为泊松比。

而应用于薄板弯曲时, 必须对式(15)进行修改, 使 Kirchhoff 直线假设条件即 Kirchhoff-Love 板壳单元的应用凭借下式得到实现, 即

$$C = \begin{Bmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} - \theta_x \\ \frac{\partial w}{\partial y} - \theta_y \end{Bmatrix} = 0. \quad (20)$$

如果对挠度 w 和截面转动角 θ 各自独立插值, 系统的总位能表示为

$$\bar{\Pi}_p = \Pi_p + \iint_A \alpha_1 \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \theta_x \right)^2 dx dy + \iint_A \alpha_2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \theta_y \right)^2 dx dy, \quad (21)$$

则无论薄厚板, 式(21)都能适用, 后两项起罚函数作用, 薄板的 Kirchhoff-Love 直线假设式(21)得以满足。对于各向同性材料的板单元, 在式(21)中的 α_1 和 α_2 可取 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha/2 = Gt/2k$, 其中 G 是材料剪切模量, t 是板厚, k 是截面剪切校正因子, 按能量等效相当原理, 一般取 $k=6/5$ 。

曲率 κ 在位移和转动各自独立的情况下应表示为

$$\kappa = \begin{Bmatrix} -\frac{\partial \theta_x}{\partial x} \\ -\frac{\partial \theta_y}{\partial y} \\ -\left(\frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right) \end{Bmatrix}. \quad (22)$$

1.5 轨下胶垫和扣件系统

钢轨与轨道板之间的轨下胶垫和扣件系统可采用弹簧-阻尼单元来模拟, 因为弹簧-阻尼单元可应用于一维、二维或三维空间在纵向或扭转的弹簧-阻尼效果。当考虑纵向弹簧-阻尼效果时, 该单元只能承受单向受拉或受压, 每个节点可具有 x 、 y 、 z 位移方向的自由度, 不必考虑弯曲和扭转。弹簧-阻尼单元不具有质量, 质量可用质量单元模拟。弹簧-阻尼系统的总位能表示为

$$\Pi^{\text{spe}} = \frac{1}{2} M (\ddot{u})^2 + \frac{1}{2} K u^2 - C_i \dot{u} u. \quad (23)$$

整个系统能量方程在空间、时间上的离散, 此处不再赘述。

1.6 车辆载荷表述

在任一时刻 t , 设车辆匀速移动轮载为^[5]

$$f(t) = p \cos \Omega_p t \cdot \Psi(x - vt), \quad (24)$$

式(24)中: p 为轮载;

Ω_p 为轮载的作用频率;

x 为轮载在 t 时刻的位置;

此处为 $\Psi(x_i = vt) = 1, \Psi(x_i \neq vt) = 1$ 。

式中: $x_i = x_0 + i \cdot l_s$, ($i=1, 2, \dots, n$), 为轨道板承轨槽所在位置;

x_0 为初始参考点;

l_s 为承轨槽间距;

n 为计算模型中所取承轨槽的个数。

前后两轮载定距为 9.0 m, 轮轴重 220 kN, 相应轮载 110 kN, 车速 $v=350$ km/h, 经过两相邻轨枕所需的时间 $\Delta t = \frac{\lambda_s}{v}$ 。

2 边界条件处理及材料参数

取 A 型板式无碴轨道长 36 m, 边界条件处理: 路基两侧横向位移、无限远处地基层位移用无限元处理, 路基两端的纵向位移约束为零。计算模型见图 1, 其它计算参数见表 1。

表 1 计算所用参数

Table 1 Calculational parameters

材料名称	几何尺寸/mm	材 料 性 能					
		密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 /MPa	泊松比 ν	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\Phi/(\circ)$	膨胀角 $\varphi/(\circ)$
钢轨	高 174, 轨距 1 435	7 800	210 000	0.3	—	—	—
A 型轨道板	4 930×2 340×0.190	3 000	45 000	0.166 7	—	—	—
CA 砂浆层	—	1 800	92	0.34	—	—	—
混凝土道床	300 × 4 000	2 700	24 000	0.2	—	—	—
级配碎石层	—	—	—	—	—	—	—
(掺质量分数为 5 % 的水泥)	多种	1 900	483	0.3	32.4	34	14
A、B 填料	多种	1 950	268	0.32	56.8	30	18
地基层	无限	2 000	850	0.3	—	—	—

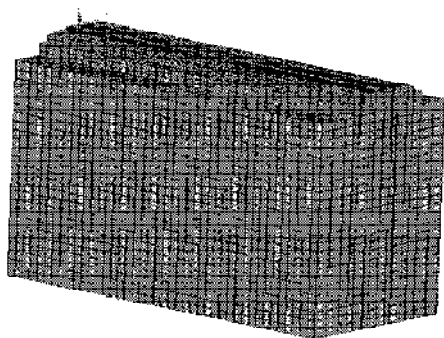


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculational model

3 板式轨道动力学参数研究

无碴轨道的结构刚度远大于有碴轨道, 在轨道板下注入水泥沥青砂浆 (简称 CA 砂浆) 垫层是提高板式轨道弹性、减缓振动的重要环节^[6]。此外, 扣件和轨下胶垫也是非常重要的弹性部件, 合理确定无碴轨道板式轨道的扣件和轨下胶垫刚度, 对提高板式轨道的整体动力性能亦具有重要意义^[7,8]。

3.1 扣件和轨下胶垫刚度对系统动力性能的影响

取 CA 砂浆层厚度 50 mm, 扣件和轨下胶垫系统的阻尼系数 $c=45 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 。改变扣件和轨下胶垫刚度的大小, 让机车通过时, 研究扣件和轨下胶垫刚度对板式轨道-路基系统的动态响应。图 2 a)、b)、c) 分别为轨面及以下结构同一横剖切面轨道正下方不同深度处的动位移、动速度、动加速度幅值随扣件和轨下胶垫的总等效刚度值的变化规律。

分析表明, 随着扣件和轨下胶垫的总等效刚度值增大, 轨面上及轨下结构不同位置处的动位移、动速度、动加速度随之增大, 从而增加了对轨道部件和轨下结构的破坏作用。如果单纯从刚度值考虑, 则应尽可能减少扣件和轨下胶垫的总等效刚度值。扣件和轨下胶垫刚度的大小对轨道各部分的动力影响是不同的。扣件和轨下胶垫刚度越大, 对轨道板以上结构位移、速度、加速度的影响越显著, 但对轨道板以下结构相应物理量的影响要小得多。当然, 综合其它因素的影响, 扣件和轨下胶垫刚度给钢轨冲击带来的影响是复杂的。

图2d)为混凝土承载层及其以下结构层的竖向动应力幅值变化。可以看出,减小扣件和轨下胶垫刚度值,提高了整个无砟轨道线路结构的弹性,对整体混凝土层的竖向应力带来较大的变化,但对混凝土整体道床板以下结构的竖向应力影响非常有限,只是略微增加而已。

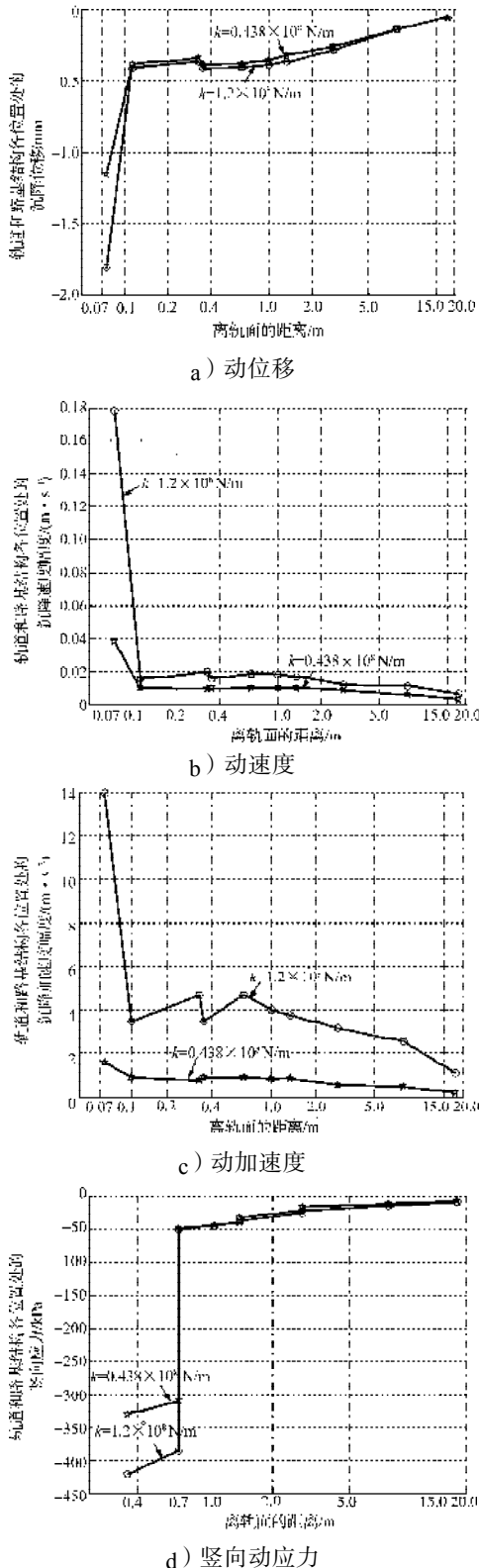


图2 横剖切面上动态响应随深度的变化曲线

Fig. 2 Variable curve of different depth on the amplitude of the dynamic response below the rails of the system

图3为A型轨道板不同位置弯曲应力的时程曲线。图中 s_x 下划线后的数字366代表单元序号,紧跟其后的1代表顶面,2代表中面,3代表底面,以下标记相同,不再赘述。

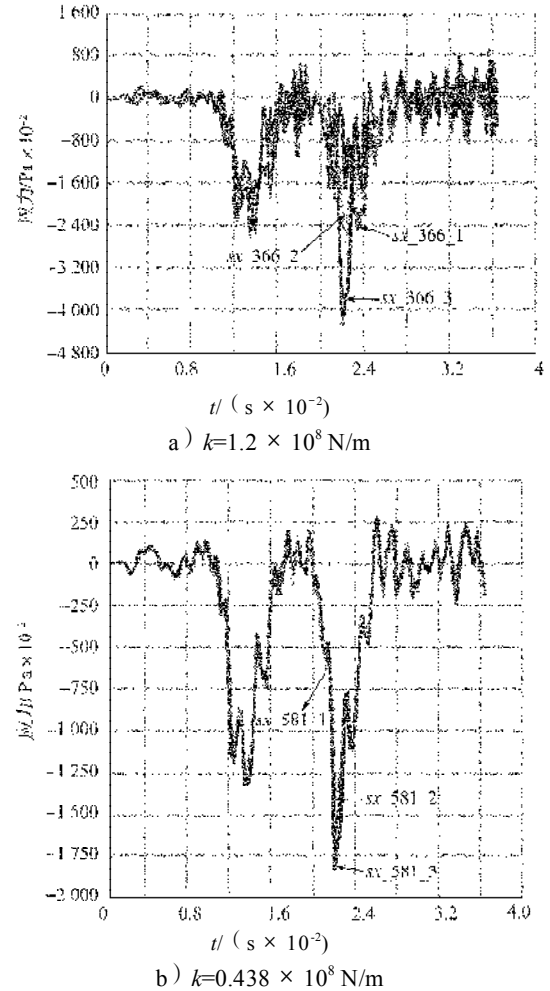


图3 轨道板 x 向动弯曲应力随时间的变化

Fig. 3 Changes with different time for flexural stress in the x slab

可以看出,在列车移动荷载的作用下,扣件和轨下胶垫刚度值变化,轨道板中的弯曲应力发生相应的变化。刚度值变大,弯曲应力振荡变得更明显,量值也相应增大。 x 向弯曲应力由轨道板中面的365 kPa ($k=0.438 \times 10^8 \text{ N/m}$)变为430 kPa值($k=1.2 \times 10^8 \text{ N/m}$),但小于混凝土的轴心抗压强度 R_a^b 和抗拉强度 R_1^b 。进一步分析还发现,轨道板的弯曲应力由顶面往下依次增大,且均发生周期性振荡,这样,轨道板会发生翘曲,使得轨道板顶面承受反复的拉压应力,易使轨道板发生疲劳破坏。随着扣件和轨下胶垫刚度值的增加,轨道板的弯曲应力随之增加,并且增大的趋势随刚度值的增大更为明显。因此,单从改善轨道板受力的角度出发,应该减少扣件或轨下胶垫刚度值。这也说明改变扣件或轨下胶垫刚度值对于改善板式轨道动力性能的意义重大。

图4为A型轨道板下CA砂浆层不同位置弯曲应力随扣件或轨下胶垫刚度值变化的时程曲线。

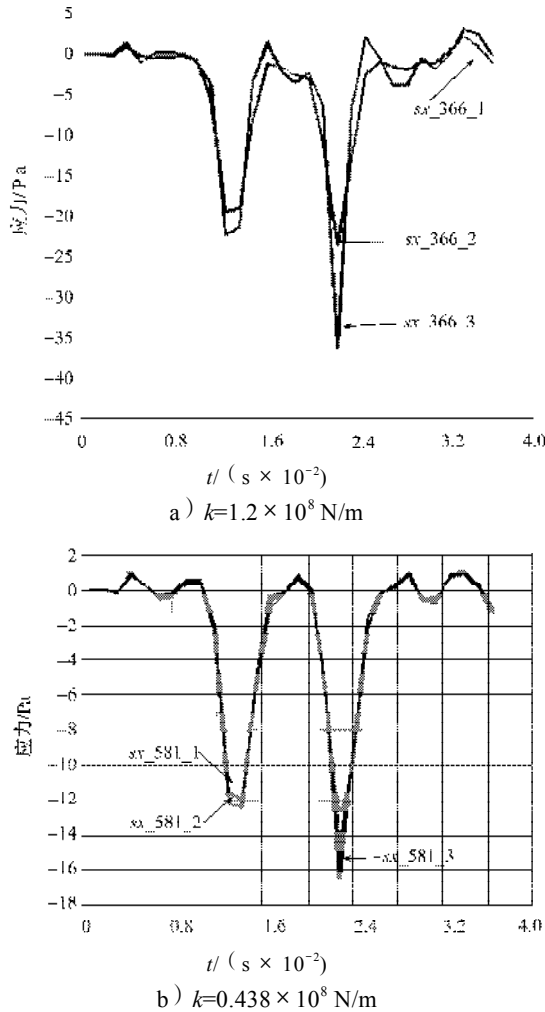


图4 CA砂浆层x向动弯曲应力随时间的变化

Fig. 4 Changes with different time for x flexural stress in the CA layer

可以看出,在列车荷载的作用下,CA砂浆层弯曲应力亦发生振荡变化,但没有轨道板那样明显。其值由CA砂浆层顶面往下依次增大,但其底面所受压力远小于CA砂浆层硬化后长期抗压强度 $2.3 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。由于CA砂浆层弯曲应力发生周期性变化,则会使其顶面产生翘曲,承受反复的拉压应力,也易使CA砂浆层发生疲劳破坏。

3.2 CA砂浆层厚度对系统动力性能的影响

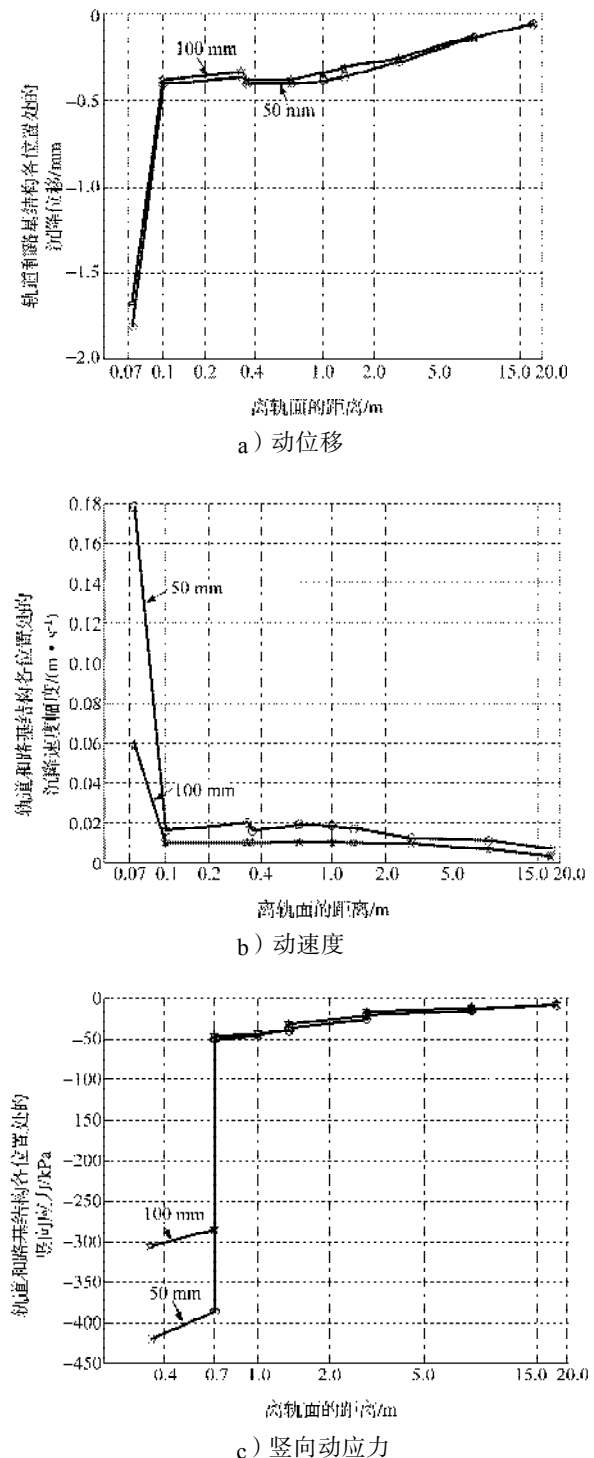
取扣件与轨下胶垫刚度总等效刚度值 $k=43.8 \text{ kN/mm}$, 阻尼系数 $c=45 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, 轮质量 $P_0=250 \text{ kN}$, 车速 $v=350 \text{ km/h}$, 其它参数不变。改变CA砂浆层厚度, 让列车通过时, 观察CA砂浆层厚度变化对无碴轨道板式轨道动力学的影响。

图5 a)、b)、c) 分别为轨面及其以下结构同一横剖切面轨道正下方不同深度处的沉降位移、速度、加速度幅值随CA砂浆层厚度的变化。分析表明, 随着CA砂浆层厚度的增大, 轨面及其以下结构的动位移、

动速度、动加速度随之减少, 从而减少了对轨道部件的破坏作用。若单纯从减少动位移、动速度、动加速度值来考虑, 则应尽可能增加CA砂浆层厚度。当然, 还有其它很多因素需要考虑, 不能总是无休止地增加CA砂浆层厚度值。

增加CA砂浆层的厚度还可以在一定程度上降低轨道板下支撑刚度, 提高轨道结构的弹性, 理论上可以改善车辆和轨道系统的动力学特性。

图5 d) 为混凝土及其以下结构层的竖向动应力幅值变化。



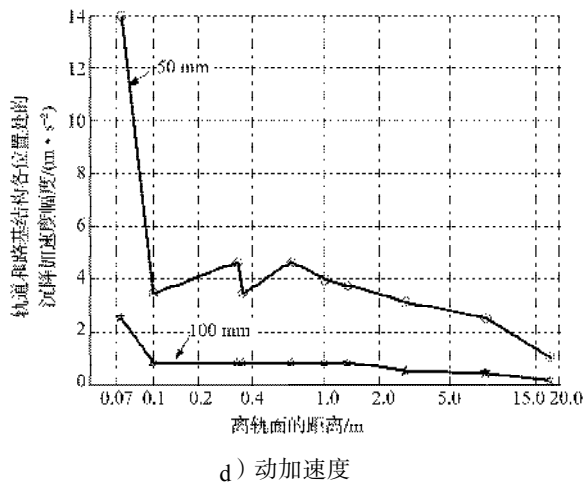


图5 横剖切面上动态响应随深度的变化曲线

Fig. 5 Variable curve of different depth on the amplitude of the dynamic response below the rails of the system

可以看出, 增加CA砂浆层的厚度提高了整个无砟轨道线路结构的弹性, 对整体混凝土层的竖向动应力带来较大的变化, 但对混凝土整体道床板以下结构的竖向动应力影响非常有限, 只是略微增加而已。

4 结语

数值计算表明, 扣件或轨下胶垫刚度大小与板式轨道动力学性能休戚相关。减少扣件或轨下胶垫刚度, 改善了板式轨道动力学性能。随着扣件或轨下胶垫刚度值的增大, 轨面及轨下结构的动态响应随之增大, 从而加大了对轨道部件和轨下结构的破坏作用。随着CA砂浆层厚度的增大, 轨面及以下结构的位移、

速度、加速度随之减少, 从而减少了对轨道部件的破坏作用。增加CA砂浆层的厚度可以在一定程度上降低轨道板下支承刚度, 提高轨道结构的弹性, 改善车辆和轨道系统的动力学特性。

参考文献:

- [1] 翟婉明. 高速铁路板式轨道动力特性研究[J]. 铁道学报, 1999, 21(6): 65-69.
- [2] Li D Q, Sellin E T. Wheel-track dynamic interaction: track substructure perspective[J]. Vehicle System Dynamics Supplement, 1995, 24: 183-196.
- [3] 卿启湘. 高速铁路无砟轨道-软岩路基系统动力特性研究[D]. 长沙: 中南大学土木学院, 2005.
- [4] Belytschko Ted, Liu Wing Kam, Moran Brian. Nonlinear Finite elements for continua and structures[M]. London: John Wiley & Sons Ltd., 1998.
- [5] 陈秀方. 轨道工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [6] 翟婉明, 蔡成标, 王其昌. 车辆-轨道相互作用统一模型及软件的试验验证[J]. 铁道学报, 1996, 18(4): 42-46.
- [7] Dieterman H A, Metrikine A V. The equivalent stiffness of a half-space interacting with a beam, critical velocities of a moving load along the beam[J]. Mech. A/Solids, 1996, 15(1): 67-90.
- [8] 谢伟平, 胡建武, 徐 劲. 高速移动荷载作用下的轨道-地基系统的动力响应[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1075-1078.

(责任编辑: 张亦静)