

客运专线板式无砟轨道动力设计参数

向俊¹, 曹晔^{1,2}, 刘保钢^{1,3}, 赫丹¹, 曾庆元¹

1. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙, 410075;
2. 中铁四局集团有限公司, 安徽 合肥, 230041;
3. 郑州铁路局, 河南 郑州, 450052)

摘要: 基于高速列车-板式无砟轨道时变系统竖向振动分析理论, 研究了车速、轨道几何不平顺幅值、CA 砂浆刚度及阻尼等动力学参数对此系统竖向振动响应的影响规律。在此基础上, 进一步得出了合理的 CA 砂浆刚度取值范围。研究表明: 高速列车-板式无砟轨道系统竖向振动响应均随车速及轨道几何不平顺幅值的增大而增大; 合理的 CA 砂浆刚度取值范围为 1.0~1.5 GPa/m; CA 砂浆阻尼应尽可能取较大值, 有利于降低轨道板的振动, 延长板式无砟轨道结构的使用寿命。

关键词: 客运专线; 板式无砟轨道; 动力参数; 设计

中图分类号: U213

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2007)05-0981-06

Dynamic parameters of slab track of passenger transport line

XIANG Jun¹, CAO Ye^{1,2}, LIU Bao-gang^{1,3}, HE Dan¹, ZENG Qing-yuan¹

1. School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. China Tiesiju Civil Engineering Group Co.Ltd, Hefei 230041, China;
3. Zhengzhou Railway Bureau, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The influence of dynamic parameters such as speed, vertical profile irregularity of track, and stiffness and damping of cement asphalt mortar (CA mortar) on vertical vibration of high-speed train and slab track system was studied based on the analysis theory of vertical vibration of the system. The selection range of reasonable stiffness of the CA mortar was obtained. The results show that with the increase of speed and track irregularity amplitude, the responses of vertical vibration of the system increase. The selection range of reasonable stiffness of the CA mortar is 1.0-1.5 GPa/m. The bigger damping value of the CA mortar should be selected to decrease the vibration and extend the cycle life of the slab track.

Key words: passenger transport line; slab track; dynamic parameter; design

无砟轨道由于其具有结构高度低、高速行驶时不存在道砟飞溅现象、稳定性好、适用性和耐久性强、少维修、使用寿命长、轨道横向阻力大等特点, 在日本、德国、英国等发达国家高速铁路中得到广泛应

用^[1-3]。1997年10月日本修建完成的北陆新干线(高崎—长野), 全长125.7 km, 其中84%采用了板式无砟轨道。参照国外高速铁路的运营实践, 我国客运专线轨道结构将采用国外无砟轨道技术, 以铺设成区段无砟

收稿日期: 2007-01-25; 修回日期: 2007-03-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB714706); 国家自然科学基金资助项目(50078006, 50678176); 铁道部科技研究开发计划项目(2001G029; 2003G043); 高等学校博士点科研基金资助项目(20010533004); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(2007年)

作者简介: 向俊(1968-), 男, 湖南沅陵人, 教授, 博士, 从事车轨(桥)系统振动及列车脱轨研究

通信作者: 向俊, 男, 教授, 博士; 电话: 0731-2656645(O); E-mail: jxiang@mail.csu.edu.cn

轨道为主^[4-5]。我国对无碴轨道的研究始于 20 世纪 60 年代, 目前, 已经试铺的无碴轨道主要结构型式有: 板式轨道、长枕埋入式轨道和弹性支承块式无碴轨道。弹性支承块式无碴轨道在西康线秦岭隧道内(18.4 km) 铺设, 于 2001 年初开通运营。2001 年长枕埋入式无碴轨道首次铺设在秦沈线的沙河特大桥上, 板式无碴轨道首次铺设在秦沈线的狗河特大桥与双何特大桥上。2003 年 6 月在渝怀线鱼嘴 2 号隧道内铺设了长枕埋入式无碴轨道的试铺段。2003 年底在赣龙线枫树排隧道内铺设了板式无碴轨道的试铺段。2005 年在隧渝线建设了 12.6 km 长的无碴轨道综合试验段, 除隧道内和桥梁外, 首次在路基上铺设无碴轨道^[3]。在此, 本文作者以无碴轨道中的板式轨道类型为例, 基于高速列车-板式无碴轨道时变系统竖向振动分析理论, 研究板式无碴轨道动力学参数对此系统振动响应的影响规律, 进而探讨板式无碴轨道设计参数的合理取值, 为板式无碴轨道设计提供理论依据。

1 高速列车-板式无碴轨道时变系统 竖向振动分析理论

1.1 高速列车动力学模型

以中华之星(China-Star)列车(编组取为 1 动+4 拖) 为例, 对高速列车-板式轨道时变系统竖向振动进行分析。动车及拖车均离散为具有二系悬挂的多刚体系统, 其中, 车体及转向架考虑浮沉、点头 2 个自由度, 每个轮对仅考虑浮沉 1 个自由度, 这样, 每辆车共有 10 个自由度。有了此位移模式, 就可导出列车竖向振动总势能表达式 Π_V ^[6-8]。

1.2 板式无碴轨道动力学模型

针对板式无碴轨道的构造特点, 提出横向有限条与板段单元分析模型, 如图 1 所示, 并采用以下一些基本假定^[8-9]。

在相邻 2 个扣件之间垂直截取一轨段单元, 钢轨垫层刚度及阻尼系数分别为 K_u 和 C_u ; 轨道板通过 CA 砂浆与刚性路基连接, 将 CA 砂浆模拟为线性均布面弹簧和粘滞阻尼器, 其弹性系数和阻尼系数分别为 K_{CA} 和 C_{CA} ; 钢轨视为连续弹性点支承 Euler 梁, 其节点位移取在钢轨两端位置上; 轨道板的节点位移取在板段单元的 4 个角点位置上。这样, 可取如下变位参数来描述轨段单元的节点位移:

$$\{u\}_e = \begin{Bmatrix} \{u_1\} \\ \{u_2\} \end{Bmatrix}_{20 \times 1} \quad (1)$$

其中:

$$\{u_1\} = [W_{1L}^R, \theta_{Y1L}^R, W_{1R}^R, \theta_{Y1R}^R, W_{1L}^S, \theta_{X1L}^S, \theta_{Y1L}^S, W_{1R}^S, \theta_{X1R}^S, \theta_{Y1R}^S]^T; \quad (2)$$

$$\{u_2\} = [W_{2L}^R, \theta_{Y2L}^R, W_{2R}^R, \theta_{Y2R}^R, W_{2L}^S, \theta_{X2L}^S, \theta_{Y2L}^S, W_{2R}^S, \theta_{X2R}^S, \theta_{Y2R}^S]^T. \quad (3)$$

式中: 下标 1 和 2 分别表示单元左端节点与右端节点; 上标 R 表示钢轨位移; 上标 S 表示轨道板位移; 下标 L 表示 Y 方向轨段单元的左边; 下标 R 表示 Y 方向轨段单元的右边; W 表示沿 Z 方向的线位移, θ 表示转角位移。

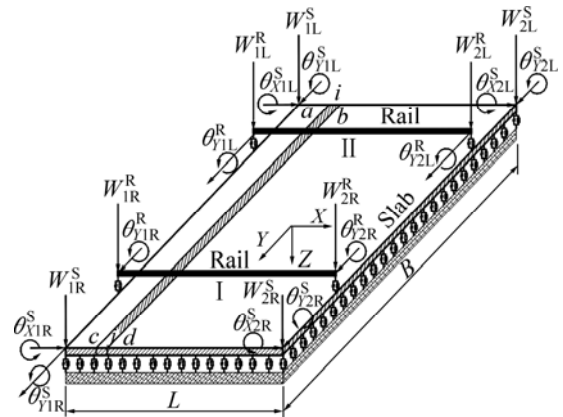


图 1 板式无碴轨道的横向有限条与板段单元分析模型
Fig. 1 Analysis model of slab track with lateral finite strip and slab segment element

轨段单元中钢轨上任一点处的位移, 由钢轨两端节点位移参数采用 Hermitian 三次方插值函数插值得到。下面重点研究轨道板中任一点竖向位移的插值方法。如图 1 所示, 在轨道板段中, 沿 Y 方向任取一单位宽度的横向有限条 $abcd$, 并可视作梁段 ij , 则梁段 ij 上任一点的挠度 W 可用其两端点 i 和 j 的变位参数并采用 Hermitian 三次方插值函数插值得到; 而 i 和 j 两端点处的变位参数又可用板段单元的角点位移插值得到(其中, 线位移采用 Hermitian 三次方插值函数插值得到, 转角采用线性插值得到)。最后, 可得轨道板上任一点处的竖向位移 W 表示式。

上述有关轨道板位移插值的方法, 称为“横向有限条与板段单元”分析方法。这种方法与一般的板单元相比, 具有简单、实用的特点。

建立了板式无砟轨道单元位移模式后, 即可导出单元中各部件的振动势能, 进一步可以得到第 i 个轨段单元竖向振动总势能 Π_{Ti} 。假设计算长度范围内共划分了 N 个轨段单元, 则整个板式无砟轨道竖向振动总势能为

$$\Pi_T = \sum_{i=1}^N \Pi_{Ti} \quad (4)$$

1.3 高速列车-板式无砟轨道时变系统竖向振动方程的建立及求解

设在时刻 t 轨道计算长度范围内有 M 辆车, 则在时刻 t 轨道上列车振动总势能为

$$\Pi_V = \sum_{i=1}^M \Pi_{Vi} \quad (5)$$

这样, 系统在时刻 t 的竖向振动总势能为

$$\Pi = \Pi_V + \Pi_T \quad (6)$$

由弹性系统动力学总势能不变值原理^[10-11]及形成系统矩阵的“对号入座”法则^[12], 即可得到系统在时刻 t 竖向振动方程:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{P\} \quad (7)$$

式中: $[M]$, $[C]$ 和 $[K]$ 分别为此系统质量、阻尼及刚度矩阵; $\{\ddot{\delta}\}$, $\{\dot{\delta}\}$, $\{\delta\}$ 和 $\{P\}$ 分别为此系统加速度、速度、位移和荷载列阵。采用 Wilson- θ 法求解方程^[13]。

2 计算结果及其分析

取轨道高低不平顺为激振源, 对中华之星高速列车(1动+4拖)在长度为 125 m 内的板式无砟轨道上运行时的竖向振动响应进行计算。

2.1 车速及轨道不平顺的影响

取车速分别为 160, 200 和 240 km/h, 轨道高低不平顺取为正弦函数, 且固定波长为 12.5 m, 波幅分别取 1, 3 和 5 mm。此时, 系统各响应最大值随车速及轨道不平顺幅值的变化趋势如图 2~7 所示。

由图 2 可见, 车速对车体竖向加速度的影响总体来说不大, 但随轨道不平顺幅值增大, 车速的影响变大; 轨道不平顺幅值对车体竖向加速度的影响很大。

由图 3 可见, 车速及轨道不平顺幅值对轮重减载率的影响都较大。因此, 从安全性角度而言, 必须严格控制高速铁路轨道不平顺值。

由图 4 可见, 车速及轨道不平顺幅值对动车竖向斯佩林舒适性指标的影响均较大。从舒适性角度说, 高速铁路对轨道的平顺性提出了更高要求。

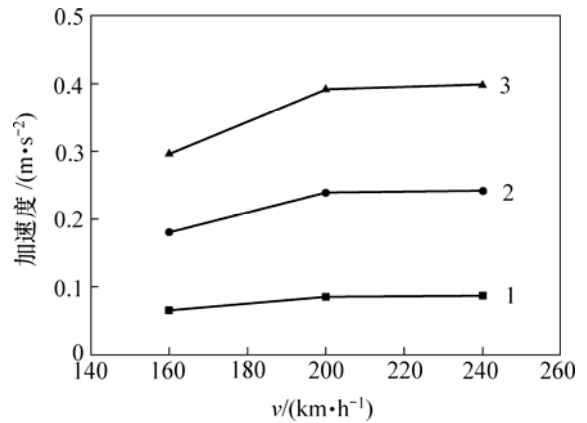


图 2 车速及不平顺幅值对动车车体加速度的影响
Fig. 2 Influence of speed and track irregularity amplitude on acceleration of motor car body

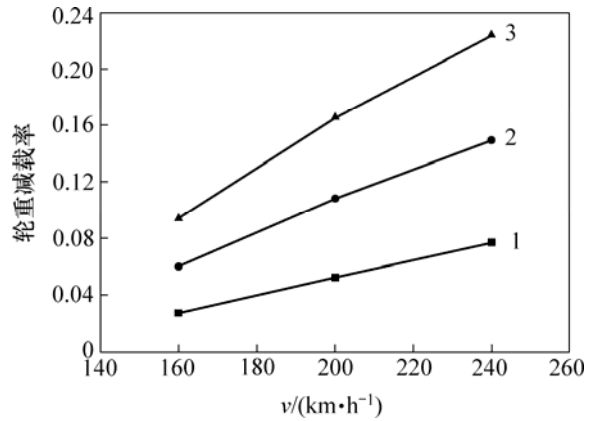


图 3 车速及不平顺幅值对动车轮重减载率的影响
Fig. 3 Influence of speed and track irregularity amplitude on wheel load reduction rate of motor car

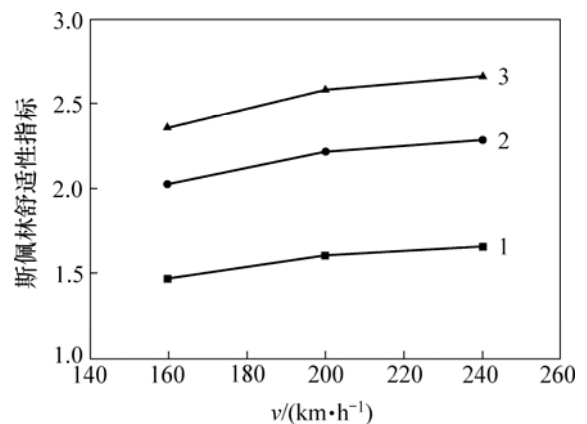


图 4 车速及不平顺幅值对动车竖向斯佩林舒适性指标的影响
Fig. 4 Influence of speed and track irregularity amplitude on Sperlina comfort index of motor car

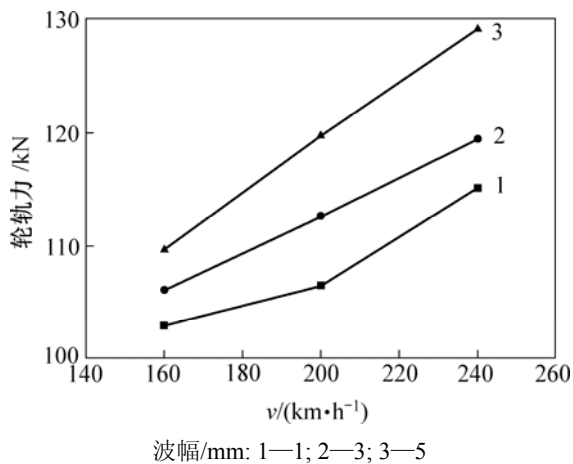


图 5 车速及不平顺幅值对动车竖向轮轨力的影响

Fig. 5 Influence of speed and track irregularity amplitude on vertical wheel-rail force of motor car

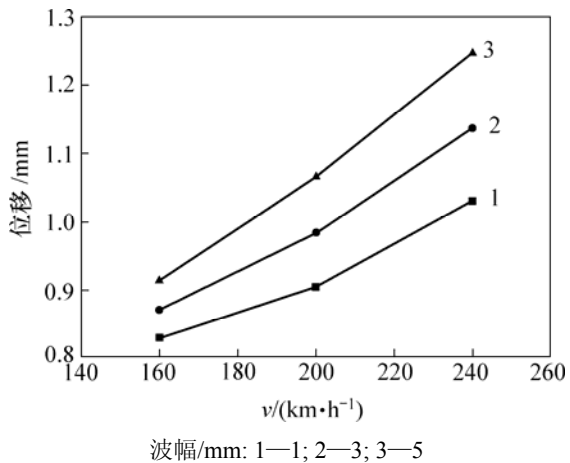


图 6 车速及不平顺幅值对钢轨竖向位移的影响

Fig. 6 Influence of speed and track irregularity amplitude on vertical displacement of rail

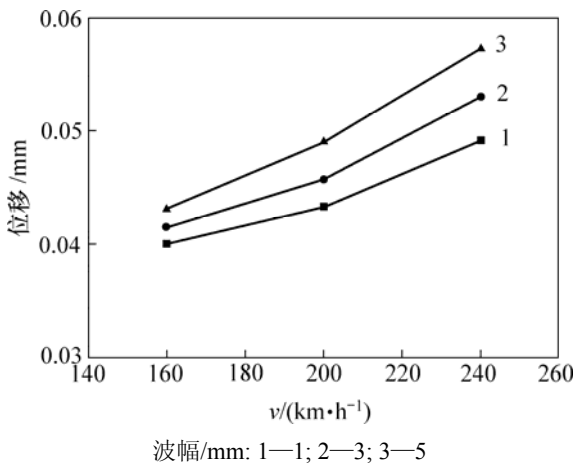


图 7 车速及不平顺幅值对轨道板竖向位移的影响

Fig. 7 Influence of speed and track irregularity amplitude on vertical displacement of slab

由图 5 可见, 轮轨竖向作用力对车速及轨道不平顺幅值都很敏感。要降低高速铁路轮轨竖向作用力, 必须改善轨道不平顺状况。

由图 6 可见, 车速对钢轨竖向位移有一定影响, 而且随着轨道不平顺幅值的增大而增大。

由图 7 可见, 车速及轨道不平顺幅值对轨道板竖向位移有影响, 但是, 与钢轨竖向位移相比, 其影响要小。

2.2 CA 砂浆刚度的影响

固定其他计算参数, 只变化 CA 砂浆刚度(K_{CA}), 则系统各响应最大值随 K_{CA} 变化的趋势如图 8~9 所示。

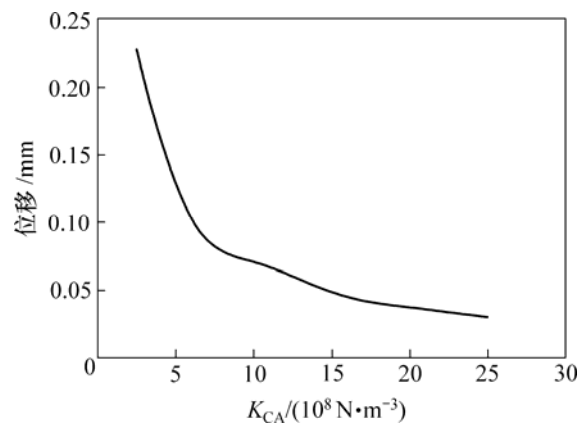


图 8 CA 砂浆刚度对轨道板竖向位移的影响

Fig. 8 Influence of stiffness of CA mortar on vertical displacement of slab

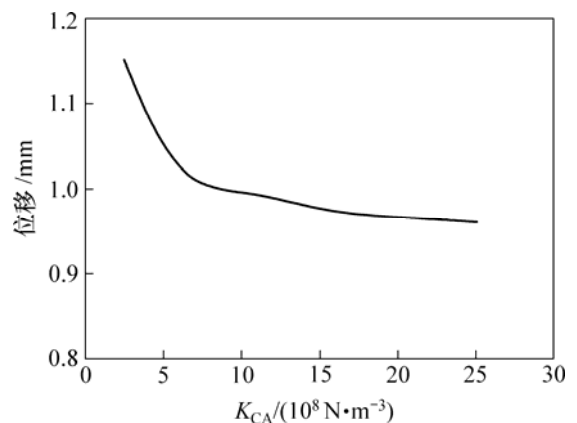


图 9 CA 砂浆刚度对钢轨竖向位移的影响

Fig. 9 Influence of stiffness CA mortar on vertical displacement of rail

由图 8 和图 9 可见, 轨道板及钢轨竖向位移均随 CA 砂浆刚度的增大而减小, 当 CA 砂浆刚度小于 1.0 GPa/m 时, 轨道变形急剧增大, 当 CA 砂浆刚度超过

1.5 GPa/m 时, 二者减小的幅度不大。由此可见, 增大 CA 砂浆刚度, 可以明显减小轨道变形, 但 CA 砂浆刚度过大对于提高板式轨道弹性、减缓振动不利。因此, 较合理的 CA 砂浆刚度值范围应取为 1.0~1.5 GPa/m。

2.3 CA 砂浆阻尼的影响

固定其他计算参数, 只变化 CA 砂浆阻尼(C_{CA}), 则系统各响应最大值随 C_{CA} 的变化规律如图 10~13 所示。由图 10~13 可见, 随着 CA 砂浆阻尼 C_{CA} 的增大, 钢轨位移和加速度、轨道板位移和轨道板加速度均减小, 但钢轨位移、钢轨加速度及轨道板位移减小的幅度不大, 而轨道板加速度下降明显。可见, 应尽量采用较大阻尼的板下 CA 砂浆垫层, 以减小轨道板的振动加速度, 这有利于减小轨道板的振动, 减轻维修工作量, 延长板式轨道的使用寿命。

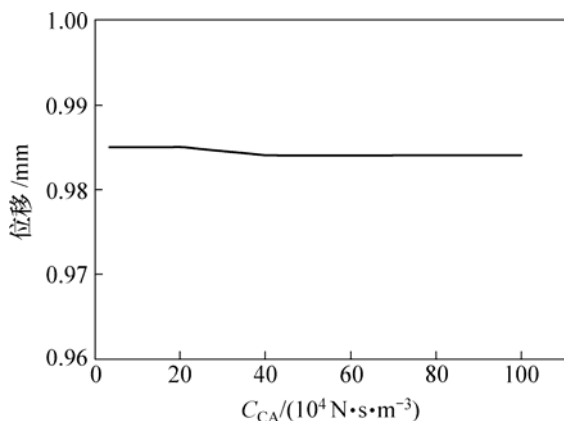


图 10 CA 砂浆阻尼对钢轨竖向位移的影响

Fig. 10 Influence of CA mortar damping on vertical displacement of rail

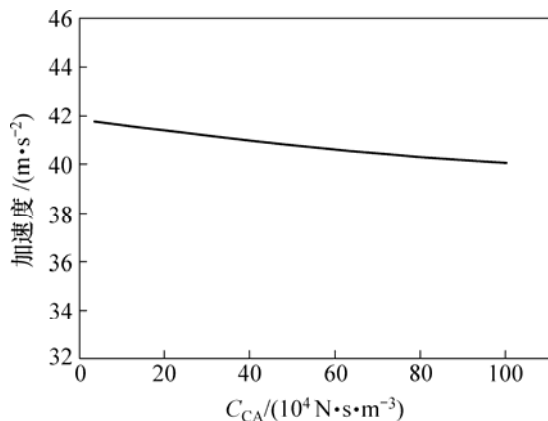


图 11 CA 砂浆阻尼对钢轨竖向加速度的影响

Fig. 11 Influence of CA mortar damping on vertical acceleration of rail

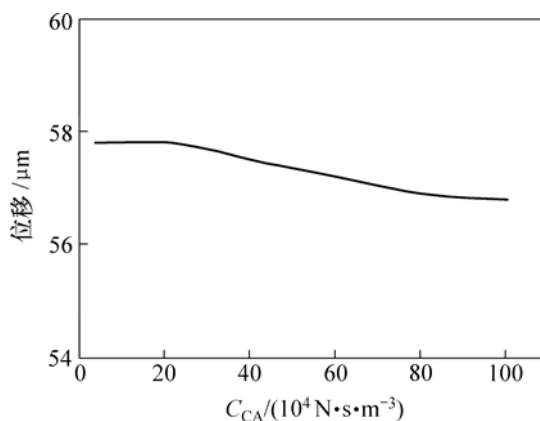


图 12 CA 砂浆阻尼对轨道板竖向位移的影响

Fig. 12 Influence of CA mortar damping on vertical displacement of slab

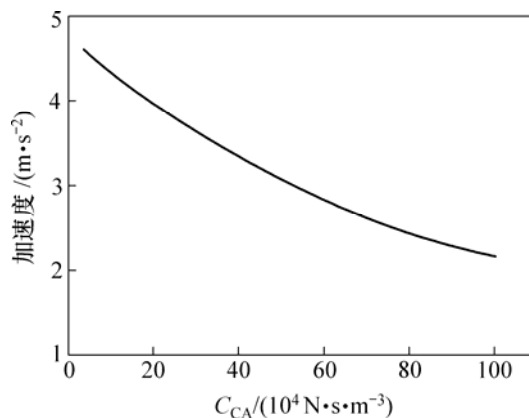


图 13 CA 砂浆阻尼对轨道板竖向加速度的影响

Fig. 13 Influence of CA mortar damping on vertical acceleration of slab

3 结 论

a. 基于高速列车-板式无砟轨道时变系统竖向振动分析理论, 研究了车速及轨道几何不平顺幅值对此系统竖向振动响应的影响。得出: 此系统竖向振动响应均随车速及轨道不平顺幅值的增大而增大; 高速铁路应具有高平顺性。

b. 合理的 CA 砂浆刚度值范围为 1.0~1.5 GPa/m; 对于 CA 砂浆阻尼, 应尽可能取较大值, 这样有利于减小轨道板的振动, 减轻维修工作量, 延长板式无砟轨道的服役周期。

参考文献:

[1] 赵国堂. 高速铁路无砟轨道结构[M]. 北京: 中国铁道出版社,

2005.
ZHAO Guo-tang. High-speed railway ballastless track[M]. Beijing: China Railway Press, 2005.
- [2] 辛学忠. 德国铁路无碴轨道技术分析及建议[J]. 铁道标准设计, 2005(2): 1-6.
XIN Xue-zhong. Technical analysis of ballastless track of DB and proposals[J]. Railway Standard Design, 2005(2): 1-6.
- [3] 何华武. 无碴轨道技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
HE Hua-wu. Ballastless track technology[M]. Beijing: China Railway Press, 2005.
- [4] 何华武. 我国客运专线应大力发展无碴轨道[J]. 中国铁路, 2005(1): 11-15.
HE Hua-wu. Ballastless track shall be developed in great efforts on Chinese passenger dedicated lines[J]. Chinese Railways, 2005(1): 11-15.
- [5] 卢祖文. 解决关键技术, 发展无碴轨道[J]. 中国铁路, 2005(1): 16-19.
LU Zu-wen. Resolve the key technology and develop ballastless track[J]. Chinese Railways, 2005(1): 16-19.
- [6] XIANG Jun, LI De-jian, ZENG Qing-yuan. Simulation of spatially coupling dynamic response of train-track time-variant system[J]. Journal of Central South University of Technology, 2003, 10(3): 226-230.
- [7] 曾庆元, 向俊, 周智辉, 等. 列车脱轨分析理论与应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006.
ZENG Qing-yuan, XIANG Jun, ZHOU Zhi-hui, et al. Train derailment analysis theory and its application[M]. Changsha: Central South University Press, 2006.
- [8] 向俊, 赫丹. 高速列车与博格板式轨道系统竖向振分析模型[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3): 1-5.
XIANG Jun, HE Dan. Analysis model of vertical vibration of high-speed train and Bögl slab track system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(3): 1-5.
- [9] 向俊, 赫丹, 曾庆元. 横向有限条与无碴轨道板段单元的车轨系统竖向振动分析法[J]. 铁道学报, 2007, 29(4): 64-69.
XIANG Jun, HE Dan, ZENG Qing-yuan. Analysis method of vertical vibration of train and ballastless track system with the lateral finite strip and slab segment element[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(4): 64-69.
- [10] 曾庆元, 郭向荣. 列车桥梁时变系统振分析理论与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
ZENG Qing-yuan, GUO Xiang-rong. Theory and application of train-bridge time-variant system vibration analysis[M]. Beijing: China Railway Press, 1999.
- [11] ZENG Qing-yuan, LOU Ping, XIANG Jun. The principle of total potential energy with stationary value in elastic system dynamics and its application to the analysis of vibration and dynamic stability[J]. Journal of Huangzhong University of Science & Technology: Urban Science Edition, 2002, 19(1): 7-14.
- [12] 曾庆元, 杨平. 形成矩阵的“对号入座”法则与桁梁空间分析的桁段有限元法[J]. 铁道学报, 1986, 8(2): 48-59.
ZENG Qing-yuan, YANG Ping. The “set-in-right-position” rule for forming structural matrices and the finite truss-element method for space analysis of truss bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 1986, 8(2): 48-59.
- [13] Clough R W, Penzien J. Dynamics of structures[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1993.