

移动荷载作用下土体动力响应的参数影响分析

II 列车—轨道—地基系统

张玉红, 汤卓文, 王长林

(佛山科学技术学院土木工程与建筑系, 广东 佛山 528000)

摘 要: 采用移动坐标系, 用双自由度体系模拟作用于轨道体系的车体荷载, 结合粘弹性半空间积分变换解, 求出列车—轨道—地基系统动力响应基本解。算例验证表明本文分析方法的正确性, 数值分析了荷载移动速度、频率和土体弹性模量对系统动力响应的影响, 并与荷载直接作用在地基上时地基土响应作比较, 给出对工程实践有意义的结论。

关键词: 双自由度车体; 交通荷载; 动力响应

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)01-0044-04

列车沿轨道运行时, 影响振动的主要因素有: 车辆条件、轨道结构、隧道结构(地铁)、环境地质条件、建筑物构造等。随着政府和学术界对城市交通环境振动污染问题的日益重视, 国内外学者对列车—轨道—地基模型及其动力响应分析理论进行了一些研究: 蒋建群、周华飞^[1-2] 分别以移动线源非均布荷载和粘弹性半空间体模拟运动列车荷载和地基; Sheng X.^[3] 研究了固定的简谐点荷载和移动的简谐点荷载作用下轨道—地基体系的响应; 袁俊^[4] 等人用基于双层 Euler-Bernoulli 梁理论对浮置板轨道进行隔振研究; 边学城和陈云敏^[5] 开发了一种 2.5 维有限单元结合薄层单元的数值方法来研究铁路轨道和周围地基在列车运动荷载作用下的振动响应以及应力波在三维地基中的传播问题。从文献分析可见: 为数不多的理论研究分析对列车—轨道—地基体系中轨道结构、路基构成、车体荷载等方面的处理过于简化, 与实际相差较大。

采用移动坐标系, 在用积分变换方法求解 Navier's 动力方程基础上, 加入轨道体系和双自由度车体模型, 分析轨道交通荷载下的粘弹性土体动力响应, 并给出积分形式解析解。算例分析了荷载移动速度和频率以及土体弹性模量变化对列车—轨道—地基系统动力响应的影响, 并与荷载直接作用在地基上时地基土响应作比较, 给出对工程实践有意义的结论。

1 列车—轨道—地基系统动力方程

考虑车体质量、车体与车轮间悬挂的阻尼和刚度、扣件、枕木、碎石路基的影响。采用文献[6]的简化模型: 用两个自由度的移动体系模拟车体, 把轨道模拟为双层连续支撑的符合基本假设的 Euler 梁, 扣件模拟为具有连续分布刚度的竖向弹簧, 枕木模拟为轨道单位长度内连续分布的质量, 以一致质量近似地考虑碎石层, 把碎石层模拟为连续分布的具有刚度的竖向弹簧和质量, 列出如下运动方程:

$$\text{车体运动方程: } m_1 g + m_1 \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} + k(y_1(t) - y_2(t)) + c_m \left(\frac{dy_1(t)}{dt} - \frac{dy_2(t)}{dt} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\text{车轮运动方程: } m_2 g + m_2 \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} + k(y_2(t) - y_1(t)) + c_m \left(\frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dy_1(t)}{dt} \right) = F_0(t) \quad (2)$$

$$\text{轨道运动方程: } EI \frac{\partial^4 y_3}{\partial x^4} + \rho_g \frac{\partial^2 y_3}{\partial t^2} + F_1(x, t) = F_0(t) \delta(x - ct) \quad (3)$$

收稿日期: 2009-08-31 修改稿日期: 2010-02-10

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(06029445); 佛山市科技发展专项资金资助项目(2006034B)

作者简介: 张玉红(1963-), 女, 河南荥阳人, 博士, 教授, 主要从事土体-结构动力相互作用的研究。

$$\text{其中,} \quad F_1(x, t) = k_g(y_3(x, t) - y_4(x, t)) \quad (4)$$

$$\text{枕木控制方程: } m_z \frac{\partial^2 y_4(x, t)}{\partial t^2} - F_1(x, t) = -F_2(x, t) \quad (5)$$

$$\text{碎石层控制方程: } \frac{m_s}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 y_4}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 y_5}{\partial t^2} \end{Bmatrix} + k_s \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_4 \\ y_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_2 \\ -F_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

其中: $y_1(t)$ 为车体的竖向位移, $y_2(t)$ 为车轮的竖向位移, $y_3(x, t)$ 为轨道的竖向位移, $y_4(x, t)$ 为枕木的竖向位移, $y_5(x, t)$ 为地基土表面的竖向位移; $F_0(t)$ 为车辆与轨道之间的相互作用力, $F_1(x, t)$ 为轨道和枕木间的相互作用力, $F_2(x, t)$ 为碎石层上表面与枕木间的相互作用力, $F_3(x, t)$ 为碎石层下表面与地面间的相互作用力; m_1 为车体质量, m_2 为车轮质量, c 为车体移动速度; k 和 c_m 分别为模拟车体与车轮间悬挂体系的弹簧和阻尼器的刚度和阻尼; EI 为轨道的抗弯刚度, ρ_g 为轨道的单位长度质量; m_z 为轨道单位长度内枕木的质量; k_g 为模拟单位长度轨道内扣件的竖向弹簧线刚度; m_s 和 k_s 分别为轨道单位长度内碎石的质量和刚度。

2 系统动力方程基本解

采用积分变换方法求解列车—轨道—地基系统动力方程。

考虑在 $x = ct$ 时, 即在车轮和轨道接触点处, 车轮的竖向位移 Y_2 与轨道的竖向位移 Y_3 相等的边界条件, 得到:

$$F_3 = \frac{-A_1 D_1^2 - E_1 (B_1^2 - A_1 C_1)}{B_1^2 - A_1 C_1} y_5 - \frac{B_1 G_1 D_1}{B_1^2 - A_1 C_1} \quad (7)$$

$$\text{其中: } A_1 = EI\beta^4 - \rho_g \omega_1^2 + k_g + \frac{m_1 k \omega_1^2 + m_1 \omega_1^2 c_m (i\omega - c\beta)}{-m_1 \omega_1^2 + k + c_m (i\omega - c\beta)} + m_2 \omega_1^2 \quad B_1 = -k_g$$

$$C_1 = k_s + k_g - (\frac{m_s \omega_1^2}{3} + m_z \omega_1^2) \quad D_1 = -(\frac{m_s}{6} \omega_1^2 + k_s) \quad E_1 = k_s - \frac{m_s}{3} \omega_1^2$$

$$G_1 = (m_1 + m_2)g - \frac{m_1 g}{-m_1 \omega_1^2 + k + c_m (i\omega - c\beta)}$$

再假设轨道与弹性半空间接触面位移连续, 即道碴位移 Y_5 与弹性半空间体表面位移[7]相等, 得到列车—轨道—地基系统粘弹性半空间表面位移积分变换解:

$$u|_{z=0} = \frac{i}{8\pi^3 ab} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{k'}{\alpha_1^2 - \alpha_2^2} - \frac{\alpha_1 k' (\alpha_1^2 + \beta^2 + \gamma^2) + \alpha_1 - 2\alpha_1 k' (\alpha_2^2 + \beta^2 + \gamma^2)}{\alpha_2 (\alpha_2^2 + \beta^2 + \gamma^2) (\alpha_1^2 - \alpha_2^2)} \right] \times \frac{\sin(\beta b) \sin(\gamma a)}{\tilde{R} \gamma} \times \frac{B_1 G_1 D_1}{[-A_1 D_1^2 - E_1 (B_1^2 - A_1 C_1)] \times \Pi(\beta, \omega) - (B_1^2 - A_1 C_1)} e^{i\beta x + i\gamma y} dx dy \quad (8)$$

$$v|_{z=0} = \frac{i}{8\pi^3 ab} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{\beta^2}{\gamma} \times \frac{\alpha_1 k' (\alpha_1^2 + \beta^2 + \gamma^2) + \alpha_1 - 2\alpha_1 k' (\alpha_2^2 + \beta^2 + \gamma^2)}{\alpha_2 (\alpha_2^2 + \beta^2 + \gamma^2) (\alpha_1^2 - \alpha_2^2)} - \frac{\beta^2 k'}{\gamma (\alpha_1^2 - \alpha_2^2)} - \frac{\alpha_1 \alpha_2 k' (\alpha_1^2 + \beta^2 + \gamma^2) + \alpha_1 \alpha_2}{\gamma} + \frac{i \alpha_1^2 k'}{\gamma (\alpha_1^2 - \alpha_2^2)} + \frac{i}{\gamma} \right] \times \frac{\sin(\beta b) \sin(\gamma a)}{\tilde{R} \beta \gamma} \times \frac{B_1 G_1 D_1}{[-A_1 D_1^2 - E_1 (B_1^2 - A_1 C_1)] \times \Pi(\beta, \omega) - (B_1^2 - A_1 C_1)} e^{i\beta x + i\gamma y} dx dy \quad (9)$$

$$w|_{z=0} = \frac{1}{8\pi^3 ab} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\alpha_1 k' (\alpha_1^2 - \alpha_2^2) + \alpha_1}{(\alpha_2^2 + \beta^2 + \gamma^2) (\alpha_1^2 - \alpha_2^2)} \times \frac{\sin(\beta b) \sin(\gamma a)}{\tilde{R} \beta \gamma} \times \frac{B_1 G_1 D_1}{[-A_1 D_1^2 - E_1 (B_1^2 - A_1 C_1)] \times \Pi(\beta, \omega) - (B_1^2 - A_1 C_1)} e^{i\beta x + i\gamma y} dx dy \quad (10)$$

$$\text{其中, } \Pi(\beta, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\alpha_1 k' (\alpha_1^2 - \alpha_2^2) + \alpha_1}{(\alpha_2^2 + \beta^2 + \gamma^2) (\alpha_1^2 - \alpha_2^2)} \times \frac{1}{2\pi b a \tilde{R}} \times \frac{\sin(\beta b) \sin(\gamma a)}{\beta \gamma} d\gamma$$

其他未说明符号同文献[7].

3 算例数值分析

用自编分析程序,研究荷载移动速度和频率以及土体弹性模量变化对列车—轨道—地基系统动力响应的影响,并与文献[7]中荷载直接作用在地基上时地基土响应作比较.

3.1 算例验证

首先将部分参数退化到与文献[2]一致,以验证本文分析方法正确性.材料参数:土体弹性模量 $\mu = 68.9 \times 10^6$ Pa,荷载 $P = 10.5 \times 10^3$ N,轨道弯曲刚度 $EI = 2.3 \times 10^3$ N·m²,单位长钢轨质量 $m = 48.2$ kg,瑞利波速 $c_{cr} = 128.5$ m·s⁻¹,临界阻尼 $\eta_{cr} = 115.3$ m·s⁻¹,移动荷载与瑞利波速的比值 θ 分别取 0.8 和 2,阻尼比 ξ 取 1.

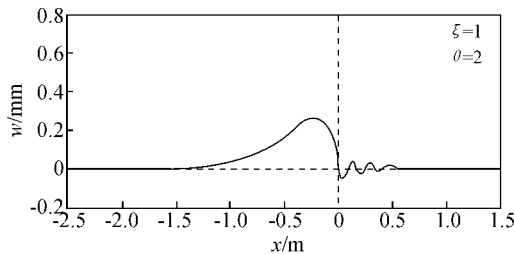


图1 文献[2]计算结果

Fig.1 Calculation with Reference[2]

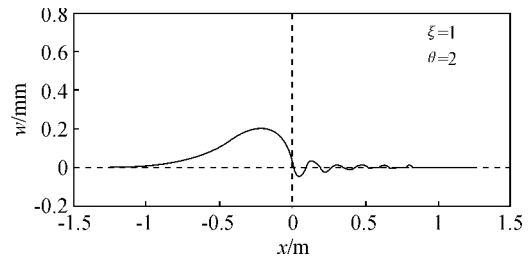


图2 本文计算结果

Fig.2 Calculation by this article

文献[2]是采用 Winkler 地基上无限长梁动力公式进行分析的.对比计算结果可见,本文分析方法正确.

3.2 参数影响分析

参数影响分析计算中,轨道模型参数取自文献[8]:钢轨弯曲刚度 $EI = 1.33 \times 10^7$ N·m⁻¹、单位长钢轨质量 $\rho_g = 120$ kg、单位长垫块刚度 $k_g = 1.5 \times 10^7$ N·m⁻¹、单位长道碴刚度 $k_s = 3.6 \times 10^8$ N·m⁻¹、单位长道碴质量 $m_s = 120$ kg、钢轨枕质量 $m_z = 500$ kg、车体质量 $m_1 = 6 \times 10^4$ kg、车轮质量 $m_2 = 4.4 \times 10^3$ kg、悬挂体系刚度 $k = 1 \times 10^3$ N·m⁻¹、悬挂体系阻尼 $c = 120$;其他材料参数同文献[7].

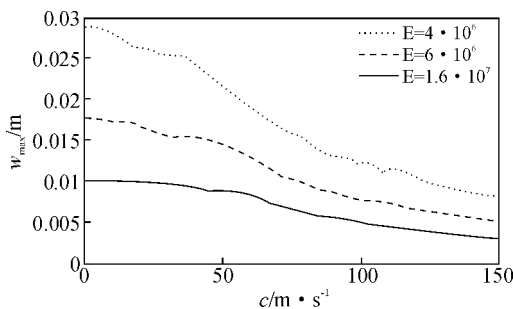


图3 弹性模量的影响

Fig.3 The influence of different elastic modulus

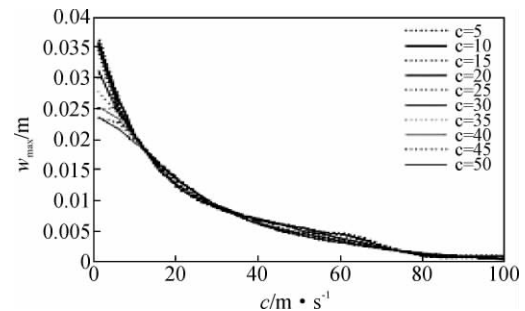


图4 速度和频率的影响

Fig.4 The influence of different speeds and frequencies

(1)从图3分析结果可见:在土体其它材料参数相同的情况下,土体的最大竖向位移 w_{\max} 随弹性模量的增加而减小;

(2)对比文献[7],从图4分析结果可见: w_{\max} 随速度的变化幅度比无轨状态时要小,表明轨道和路基会减小一定的振动幅值;加入轨道系统后,最大竖向位移 w_{\max} 随频率的增大而急剧减小,但同一频率不同速度下的最大竖向位移相差不大,表明轨道体系对高频成分有减振作用.

参考文献 References

[1] 周华飞,蒋建群. 高速列车引起的地基振动[J]. 岩土工程学报,2006,28(12):2104-2110.

- ZHOU Hua-fei, JIANG Jian-qun. Ground-borne vibration induced by high-speed trains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2104-2110.
- [2] 周华飞. 移动荷载作用下结构与地基动力响应特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
ZHOU Hua-fei. Study on dynamic response of structures and ground subjected to moving loads[D]. Hangzhou: Zhejiang Univ., 2005
- [3] SHENG X. Moving Green's functions for a layered circular cylinder of infinite length[R]. England In Technical Memorandum 885 university of Southampton, 2002.
- [4] 袁俊, 吴敏哲, 孟昭博, 等. 基于双层 Euler-Bernoulli 梁理论的浮置板轨道隔振研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(5): 683-688.
YUAN Jun, WU Min-zhe, MENG Zhao-bo, et al. Vibration isolation performance of floating slab track based on double Euler-Bernoulli beam theory[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 41(5): 683-688.
- [5] 边学成, 陈云敏. 基于 2.5 维有限元方法分析列车荷载产生的地基波动[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2335-2341.
BIAN Xue-cheng, CHEN Yun-min. Ground vibration generated by train moving loading using 2.5D finite element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2335-2341.
- [6] 王国波. 移动荷载作用下地基土动力响应计算方法的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
WANG Guo-bo. The study of calculation method on dynamic response of soil induced by moving loads[D]. Wuhan: Wuhan Univ. of Tech., 2003
- [7] 张玉红, 汤卓文, 王长林. 荷载移动速度对土体动力响应的影响分析: I 粘弹性半空间[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(5): 621-624.
ZHANG Yu-hong, TANG Zhuo-wen, WANG Chang-lin. The effect analysis of dynamic response of soils by moving load (I) viscous-elasticity half-space[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(5): 621-624.
- [8] 雷晓燕, 圣小珍. 铁路交通噪声与振动[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
LEI Xiao-yan, SHENG Xiao-zhen. The noise and vibration induced by the railway traffic[M]. Beijing: Science Press, 2004.

The effect analysis of dynamic response of soil under moving load

II Train—track—ground system

ZHANG Yu-hong, TANG Zhuo-wen, WANG Chang-lin

(Department of Civil Engineering and Architecture, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract: Based on the moving coordinate and the Navier's integral transform solutions, simulating the transit load by double freedom degree system, dynamic equations of train—track—ground system are solved, and the analytical solutions are derived exactly. A comparative and verifiable analysis indicates that the solutions are accurate. The effects of velocity and frequency of the moving load and elastic modulus of soils on dynamic response of system are investigated and compared with viscous-elasticity half-space, which is of significance to the engineering.

Key words: double freedom degree system; transit load; dynamic response