

文章编号: 1005-0523(2008)02-0010-06

铁路环境振动单排桩隔振数值分析

韦红亮, 吕绍棣

(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 采用有限元软件 ANSYS 建立了列车—大地—排桩耦合动力分析模型, 运用瞬态动力学方法, 针对单排桩桩深、桩径、截面形式和材料等结构参数对隔振效果的影响进行了分析, 得出排桩的隔振机理和规律。分析表明, 单排桩桩深、桩径和材料的变化对隔振效果的影响比较大, 而桩身截面形式的变化对隔振效果的影响不大, 这主要是由排桩的衍射效应决定其隔振效果引起的。

关键词: 地面列车; 铁路环境振动; 排桩屏障; 有限元

中图分类号: U211.3

文献标识码: A

随着我国进入高速铁路时代, 高速铁路在给人们生活带来种种便利的同时, 也会带来一系列的环境问题, 如对邻近振动敏感的精密仪表、设备和建筑物等有不可忽视的影响, 也时常干扰人们的生产和生活, 因此防止环境振动的研究有重要的社会和经济意义。隔振屏障是有效防止和减轻地面振动的有效措施。

目前, 国内外学者对屏障隔振主要从理论分析、计算机数值模拟及现场实测 3 方面进行研究。Woods^[1] 和 Haupt^[2-3] 通过一系列现场测试、理论分析和实验室试验分析了空沟和地下混凝土墙的隔振机理和规律。Haupt^[4], May, Bolt^[5] 和杨永斌等^[6] 采用二维有限元方法分析了隔振沟的隔振机理和规律。Fuykui and Matsumoto^[7] 通过有限差分法研究了矩形空沟对瑞利波的散射效应。Aviles^[8-9] 等采用解析的方法分析了单排桩对 SH 波、SV 波和 P 波的散射效应, 研究表明刚性大的排桩较刚性小的排桩对振波具有更好的散射效应。Kattis 等^[10] 采用三维边界元理论在时域内分析了单排桩的隔振效果。高广运等^[11] 通过 Lamb 问题的格林函数推导出 Rayleigh 波散射的正交控制方程, 并通过控制方程研究了多排桩体系对大地振动的隔振效果。李志毅^[12] 视排桩

为弹性半空间中的异质体, 以瑞利波散射积分方程为基础, 首次对多排桩屏障的远场被动隔振效果进行了三维分析, 详细讨论了影响隔振效果的几个主要参数。

综上所述, 隔振沟作为一种隔振措施具有良好的隔振效果并在实际工程中得到广泛应用。而当现场地质比较松软, 土体中振波长很大时, 隔振沟要想取得良好的隔振效果必须将沟深加大, 而由于松软土体稳定性差和地下水位高的现场情况限制了隔振沟的隔振效果。在此种情况下, 排桩体系以施工方便、不受地质条件影响等优点而成为一种可行的隔振措施。

本文通过建立列车—排桩—大地耦合动力有限元模型, 采用瞬态动力学方法进行求解, 分析了排桩体系 4 个参数对隔振效果的影响, 并与在现场实测数据进行了对比, 得出了排桩体系的隔振规律。

1 基本理论

1.1 动力学有限元基本方程

系统求解方程, 即运动方程, 可以根据达朗贝尔直接平衡法、虚功原理或者哈密顿原理建立, 其表达

收稿日期: 2008-01-18

基金项目: 江西省研究生创新基金项目(YC07C001); 国家 973 项目(2007GC416607)。

作者简介: 韦红亮(1982-), 男, 广西百色人, 硕士研究生, 从事铁路环境振动控制研究。

式为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中 $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 和 $\{u\}$ 分别是系统节点加速度向量、节点速度向量和节点位移向量; $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 和 $\{F(t)\}$ 分别是系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和节点荷载向量,分别由各自的单元矩阵和向量集成。若上式 $\{F(t)\}$ 等于0,则是系统的自由振动方程。

1.2 八节点六面体单元刚度矩阵和质量矩阵

采用三维直角坐标系,利用虚功原理,八节点六面体单元刚度矩阵和质量矩阵可以表示为

$$[M]^e = \int_{\Omega^e} \rho \cdot [N]^T \cdot [N] d\Omega \quad (2)$$

$$[K]^e = \int_{\Omega^e} [B]^T \cdot [D] \cdot [B] Nd\Omega$$

其中, $[N]$ 为八节点六面体单元的插值函数矩阵, $[B]$ 和 $[D]$ 分别为单元的几何矩阵和材料系数矩阵, ρ 为质量密度。

1.3 粘弹性边界

在利用有限元方法进行土一结构动力分析时,必须设置合理的人工边界条件,以模拟无限域对计算区域的影响,从而实现对真实波动的直接模拟。在模拟无限域波动问题时采用的人工边界中,三维时域粘弹性人工边界具有较高精度、等效离散后与有限元方法相结合,可方便求解无限域介质瞬态波动问题,因而得到广泛使用。在实际的有限元实现过程中,粘弹性人工边界可以采用弹簧阻尼单元进行模拟,物理元件的参数为

$$K_1 = K_2 = \frac{2G}{R} \sum_{i=1}^1 A_i$$

$$C_1 = C_2 = \rho c_s \sum_{i=1}^1 A_i \quad (3)$$

$$K_3 = \frac{4G}{R} \sum_{i=1}^1 A_i$$

$$C_3 = \rho c_p \sum_{i=1}^1 A_i$$

式中: K_1 和 K_2 为切向边界弹性系数; K_3 为法向边界弹性系数; C_1 和 C_2 为切向边界阻尼系数; C_3 为法向边界阻尼系数; G 为介质的剪切模量; R 为边界距振源的距离; $\sum A_i$ 为人工边界上节点所代表的面积。

1.4 阻尼矩阵

阻尼矩阵在一般情况下是依赖于振动频率的。因此,在实际分析中,要精确地得出阻尼矩阵是相当困难的。同时,在体系的运动方程中,阻尼力与惯性力和阻力相比要小得多,因此,通常将实际结构的阻尼矩阵简化为质量矩阵 $[M]$ 和刚度矩阵 $[K]$ 的线

性组合。

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$

α 、 β 为瑞利阻尼常数计算为

$$\alpha = \frac{2(\xi_j \omega_i - \xi_i \omega_j)}{(\omega_i + \omega_j)(\omega_i - \omega_j)} \omega_i \omega_j \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_i \omega_i - \xi_j \omega_j)}{(\omega_i + \omega_j)(\omega_i - \omega_j)} \quad (5)$$

只要实测两种振型下的圆频率 ω 和阻尼比 ξ 值,便可以根据式(4)和式(5)计算出 α 和 β 。这种方法的缺点是一般只能测出低频阻尼比,按此确定的系数用于动态分析,结果会使得体系的高频反应被“阻尼掉”很多。

1.5 大地振动的评价方法

按照 ISO2631/1-1985 和 GB10071-88 规定的全身振动不同频率铅垂向振动之加权因子修正后得到的振动加速度级,简称为 Z 振级,记为 VL_z ,单位为 dB。 VL_z 计算方法为

(1) 取某处测量到的加速度信号 $a(t)$, t 为时间加权区域,其功率谱密度函数 $S_a(f)$ 为

$$s_a(f) = 2 \frac{|a(f)|^2}{T} \quad (6)$$

$a(f)$ 为 $a(t)$ 傅立叶变换幅值, T 为 $a(t)$ 时间周期, f 为频率。

(2) 计算某一频带的总功率 $P_{fl, fu}$

$$P_{fl, fu} = \int_{fl}^{fu} S_a(f) df \quad (7)$$

fu 为该频带的上限频率, fl 为该频带的下限频率,国际标准 ISO2631 规定频带计算采用 1/3 倍频程。

(3) 计算该频带中心频率的有效值 a_{frms}

$$a_{frms} = \sqrt{P_{fl, fu}} \quad (8)$$

(4) 计算修正后的有效值

$$a'_{rms} = \sqrt{\sum a_{frms}^2 \times 10^{0.1c_f}} \quad (9)$$

式中: a_{frms} 表示频率为 f 的加速度有效值; c_f 为振动加速度的感觉修正值。

(5) Z 振动级 VL_z

$$VL_z = 201 \lg(a'_{rms}/a_0) \quad (10)$$

式中: a'_{rms} 为振动加速度有效值 (m/s^2); a_0 为基准加速度,一般取为 $a_0 = 10^{-6} m/s^2$ 。感觉修正值见文献 [5]。

2 计算模型和参数

2.1 有限元模型

排桩体系的散射效应决定隔振效果,而衍射效应决定其影响范围.故在实际分析中选取了长 $\times$ 宽 $\times$ 深为 $90\text{ m}\times 90\text{ m}\times 66\text{ m}$ 的计算区域,本文采用大型有限元软件 ANSYS 对排桩隔振进行三维分析,计算模型见图 1.模型中,土体采用 solid45 八节点实体单元,单元尺寸为 $2\text{ m}\times 3\text{ m}\times 3\text{ m}$,排桩单桩采用 beam188 三维梁单元,为避免在人工截断边界产生反射波而对计算结果产生影响,在模型对称面上采用对称边界,其它侧面均采用式(3)所表述的粘弹性人工边界.

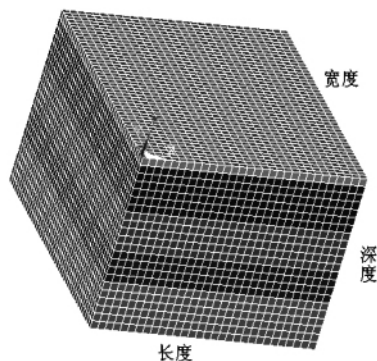


图1 排桩—大地的三维有限元模型

2.2 地基材料参数

有限元计算区域的地基材料参数由文献[3]得出,具体数值见表1.

表1 地基材料参数表

序号	层厚 (m)	密度 (kg/m^3)	弹性模量 (MPa)	泊松比	阻尼比
1	3	1 960	31	0.33	0.03
2	6	1 880	77	0.33	0.026
3	12	1 890	137	0.33	0.031
4	15	1 890	260	0.33	0.028
5	12	1 910	377	0.33	0.029
6	18	1 885	491	0.33	0.032

2.3 列车动荷载模型

当列车以一定的速度行驶时,在列车本身重力

荷载和轨道基础的不连续支撑以及轮轨不平顺多种因素的影响下,车体和轨道结构通过轮轨接触耦合产生振动.忽略车辆本身各部件的耦合振动,将轮轨力简化为恒力加载于钢轨上,采用积分变换法研究轨道结构在轮轨力作用下的响应,傅立叶积分变换法的思路为将运动方程通过傅立叶变换转化到波数域或频域中进行求解,最后再通过反变换得到时域或空间域的解.

取轨道模型为三层轨道平面模型如图2所示,车辆编组参数取 CRH2 动车组参数,轨道参数取文献[4]的我国铁路干线参数,求得道碴作用于路基顶部的动力时程曲线,如图3所示,为单排桩隔振有限元模型提供荷载依据.

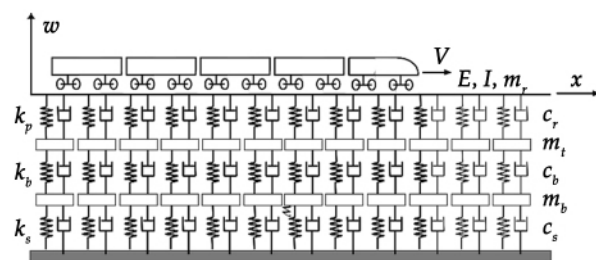


图2 列车—轨道—路基相互作用平面三层梁模

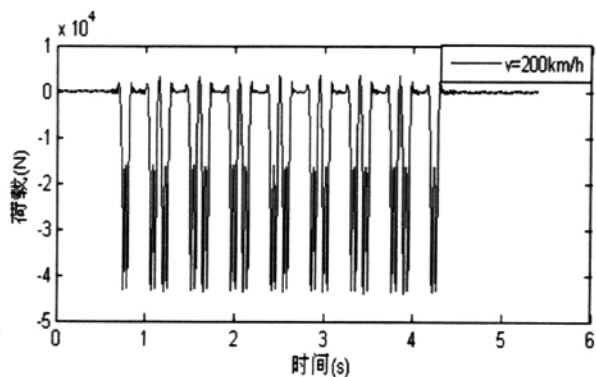


图3 作用于路基顶面的列车荷载

表2 CRH2 动车组数据参数表

编组型式	动力配置	编组重量	编组长度	转向架轴距	转向架中心距	中间车长度	头车长度	定员
8 节	4M+4T	359.7 t	201.4 m	2.5 m	17.5 m	25 m	25.7 m	610 人

3 计算结果及分析

首先,忽略排桩隔振体系对系统自振频率的影响,采用薄层法求解得到不含排桩体系的整个大地区域的频散曲线,通过频散曲线得到体系的第一阶

和第四阶自振频率为 5 Hz 和 21 Hz .然后将其带入式(4)和(5),计算得到瑞利阻尼系数 $\alpha=0.48$, $\beta=9E-4$,相当于在 13 Hz 时提供 0.03 的阻尼比.大地振动模型计算结果与文献[5]的实测结果对比吻合表明,该模型具有良好的精度.

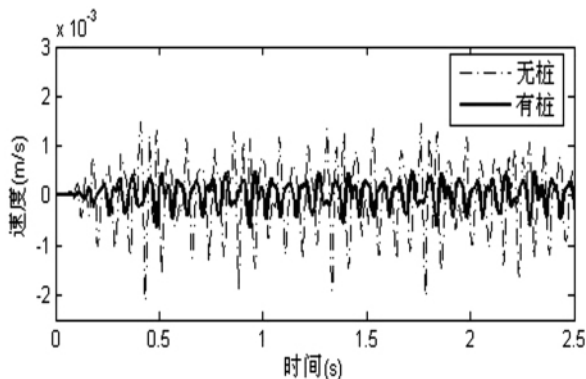


图4 排桩对振波时域的影响

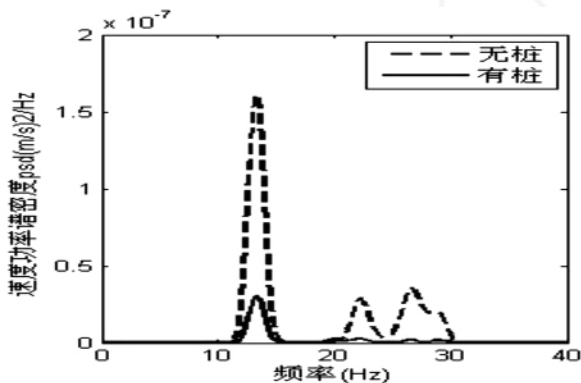


图5 排桩对振波频域的影响

3.1 排桩体系对振波时频域的影响

设排桩体系排数为一排,桩截面为圆形截面,桩的中心距离轨道中心线为 10 m,桩中心间距为 3 m,桩材料为混凝土材料,桩深为 21 m. 为分析排桩对振波的影响,分别取距振源 12 m 处无桩和有桩两种情况进行时域和频域的比较. 图 4 与图 5 为排桩对振波在时域和频域上的影响.

图 4 和图 5 表明,单排桩不仅对低频(0 ~ 20 Hz)波具有衰减的作用,而且对中频(20 ~ 100 Hz)波具有滤波的作用,在时域上,排桩对振波的幅值具有减小的作用.

3.2 排桩体系深度对减振效果的影响

设桩截面为圆形截面,桩中心距离轨道中心线为 10 m,桩间距为 3 m,桩材料为混凝土材料. 为分析排桩深度对隔振效果的影响,分别设桩的深度为 9 m、15 m、21 m、27 m、33 m 和 39 m,建立不同的有限元模型进行瞬态分析,获得地表不同位置各点的振动响应值. 图 6 为不同深度单排桩地表振动级与位置的关系.

图 6 表明,桩深对单排桩的隔振效果具有很大影响,桩深越大,排桩的隔振效果越好.

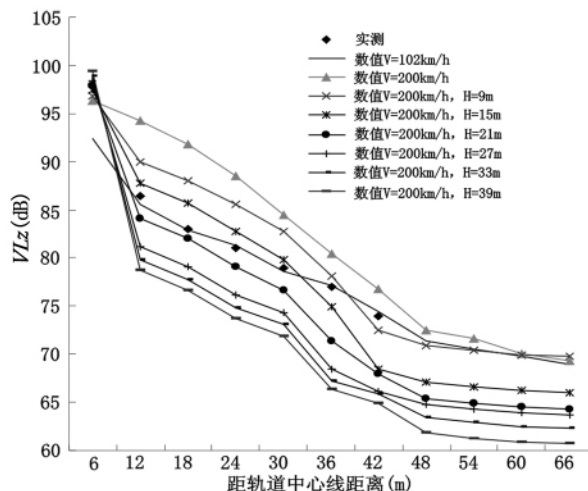


图6 桩深对隔振效果的影响

3.3 单排桩体系桩半径对减振效果的影响

设桩截面为圆形截面,桩中心距离轨道中心线为 10 m,桩中心间距为 3 m,桩深为 21 m,桩材料为

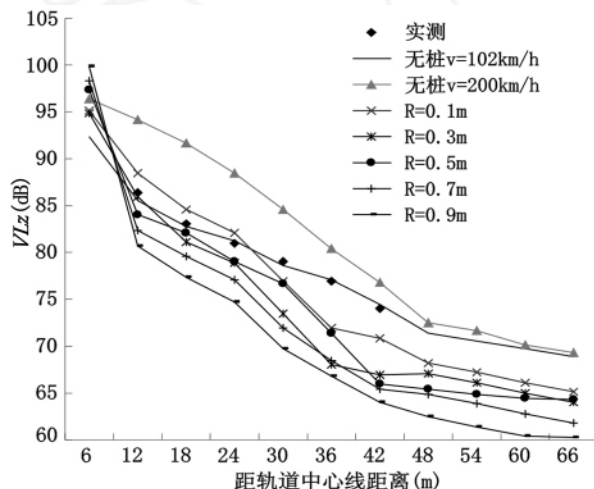


图7 桩深对隔振效果的影响

混凝土材料. 为分析桩半径对隔振效果的影响,分别设桩半径为 0.1 m、0.3 m、0.5 m、0.7 m、和 0.9 m,建立不同的有限元模型进行瞬态分析,获得地表不同位置各点的振动响应值. 图 7 为不同半径排桩地表振动级与位置的关系.

图 7 表明,桩身半径对单排桩的隔振效果具有影响,半径越大,排桩的隔振效果越好.

3.4 排桩体系截面型式对减振效果的影响

设桩截面为圆形截面,桩中心距离轨道中心线为 10 m,桩间距为 3 m,桩深为 21 m,桩材料为混凝土材料,截面半径为 0.5 m. 为分析桩截面对隔振效果的影响,分别设桩截面为三角形、四边形、五边形、六边形和圆形,建立不同有限元模型进行瞬态分析,获得地表不同位置各点的振动响应值. 图 8 为不同

截面形式排桩体系地表振动级与位置的关系.

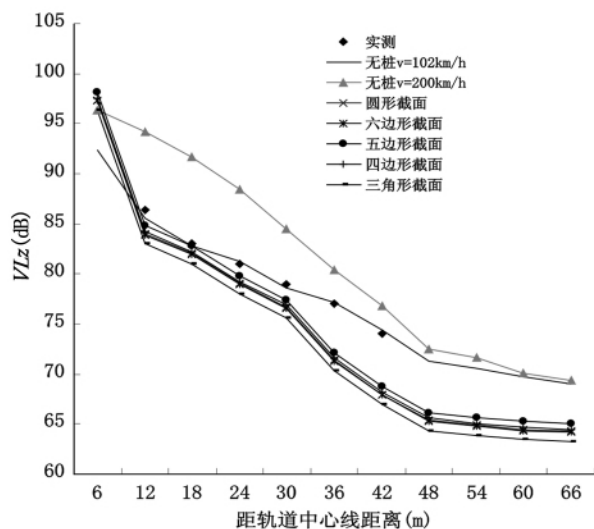


图8 桩身截面形式对隔振效果的影响

图8表明,截面形式对单排桩的隔振效果影响不大,不同截面形式的排桩体系隔振效果相差不大.

3.5 排桩体系材料对减振效果的影响

设桩截面为圆形截面,桩中心距离轨道中心线为10 m,桩中心间距为3 m,桩深为21 m,桩材料为混凝土,桩截面半径为0.5 m.为分析桩材料对隔振效果的影响,分别设排桩材料为钢材、混凝土、木材、细沙、橡胶和泡沫,建立不同有限元模型进行瞬态分析,获得地表不同位置各点的振动响应值.图9为不同桩身材料排桩地表振动级与位置的关系.

图9表明,桩身材料对单排桩的隔振效果具有影响,刚性材料排桩的隔振效果要比柔性材料排桩好.

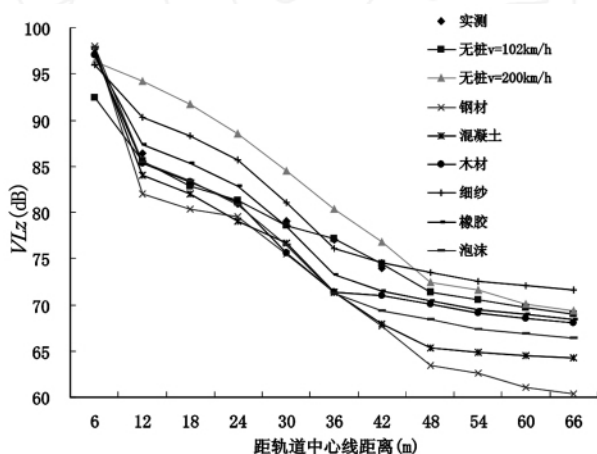


图9 桩身材料对隔振效果的影响

4 结论

单排桩对由高速列车引发大地振动的隔振机理是比较复杂的,对其隔振规律的认识和掌握还需要进行大量的现场试验和理论分析研究.本文的计算给出了下面的一些结论可供参考:

(1) 单排桩不仅对低频(0 ~ 20 Hz)波具有衰减的作用,而且对中频(20 ~ 100 Hz)波具有滤波的作用.

(2) 单排桩桩深对隔振效果具有很大影响,桩深越大,排桩的隔振效果越好.

(3) 桩身半径对单排桩的隔振效果具有影响,半径越大,排桩的隔振效果越好.

(4) 截面形式对单排桩的隔振效果影响不大,不同截面形式的排桩体系隔振效果相差不大.

(5) 桩身材料对单排桩的隔振效果具有影响,桩身材料刚性越大,隔振效果越好.

参考文献:

- [1] Woods R D. Screening of surface waves in soils [J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1968, 94(4): 221-314.
- [2] Haupt W A. Surface waves in nonhomogeneous halfspace [J]. Proc of Dyn Methods in Soil and Rock Mech, Karlsruhe, 1978. 335-367.
- [3] Haupt W A. Model tests on screening of surface waves [J]. Proceedings of 10th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Balkema A A, Rotterdam, 1981: 215-222.
- [4] Haupt W A. Isolation of vibrations by concrete core walls [J]. In Proceedings of the ninth international conference on soil mechanics and foundation engineering, Tokyo, Japan, 1977, 2: 251-256.
- [5] May TW, Bolt BA. The effectiveness of trenches in reducing seismic motion [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1982, 10(6): 195-210.
- [6] Yang Y B, Hung H H. A parametric study of wave barriers for reduction of train-induced vibration [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, 40(3): 3729-3747.
- [7] Fuyuki M, Matsumoto Y. Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench [J]. Bull Seismol Soc Am, 1980, 70(6): 2051-2069.
- [8] Aviles J, Sanchez-Sesma F J. Piles as barriers for elastic waves [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109

- (9): 1134 – 1146
- [9] Aviles J, Sanchez – Sesma F J. Foundation isolation from vibration using piles as barriers [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1988, 114(11): 1854 – 1870.
- [10] Kattis S E, Polyzos D, Beskos D E. Vibration isolation by a row of piles using a 3 – D frequency domain BEM [J]. Int. J. Numer. Meth. Engng. 1999, 46(5): 713 – 728.
- [11] Gao G Y, Lia Z Y. Three – dimensional analysis of rows of piles as passive barriers for ground vibration isolation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(11): 1015 – 1027.
- [12] 李志毅. 多排桩屏障远场被动隔振分析 [J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 2(21): 3990 – 3995.
- [13] 西北综合勘察设计院. 普陀区建民村旧区改造一期岩土工程勘察报告 [R]. 西安. 2005: 18 – 20.
- [14] 雷晓燕. 轨道力学与工程新方法 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [15] 韦红亮. 列车引发地面振动的现场测试及预测分析 [J]. 环境污染与防治, 2008, 2(1): 65 – 73.

Numeric Analysis on Railway Environment Vibration Isolation by Row of Piles

WEI Hong – liang, LV Shao – di

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The paper uses finite element software ANSYS to establish the train – ground – piles coupled dynamic model. By means of the transient dynamic method, it analyzes isolation effect on four kinds of structure parameters including the pile depth, the pile diameter, the section form and the material. The vibration isolation mechanism and the rule of piles are studied. The analysis indicates that the change of pile depth, the pile diameter and the material have sharp influence on the vibration isolation effect, but change of the pile section form has little influence on the vibration isolation effect, because the effectiveness of piles depends on its diffraction effect to waves.

Key words: railway trains; railway environment vibration; row of piles; finite elements

(责任编辑: 王全金)