

文章编号:1671-6833(2010)03-0073-04

饱和地基上铁路交通引起的地面振动分析

毕苏萍¹, 时刚¹, 高广运²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 针对饱和地基上列车运行引起的地面振动问题, 利用列车-轨道有限元模型计算得到轨道与路基间的相互作用力, 经傅立叶变换后作为地面振动计算的激励荷载; 在此基础上, 结合由薄层法得到的饱和地基动力 Green 函数, 对饱和地基上列车行驶条件下所产生的地面振动进行了计算分析和振动评价。结果表明: 列车车速在一定范围内对振动有较大影响; 列车引起的地面振动在近轨道处基本能够满足住宅区振动标准。

关键词: 铁路交通; 地面振动; 饱和地基; 薄层法; 振动评价

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A

0 引言

随着我国高速铁路建设的迅猛发展以及既有铁路的全面提速, 高速列车和重载列车引起的振动对周围环境的影响愈显突出。因此, 铁路交通引起的振动已成为当前研究的热点问题之一。针对此问题, 国内外学者开展了大量的研究。Sheng 等^[1]采用简化的列车-轨道模型研究了列车引起的地面振动问题; Krylov^[2]基于周期性支撑的 Euler 梁模型, 分析了高速列车引起的地面振动放大现象; Takemiya^[3]对瑞典的 X2000 高速列车运行引起的轨道和环境振动进行了分析研究。

针对饱和地基的问题, 左迎辉等^[4]采用半解析法求解了移动条形荷载下饱和地基的动力响应; 金波等^[5]采用 Fourier 变换的方法研究了匀速荷载作用下饱和地基及置于其上的无限长梁的动力响应。由于未考虑轨枕的周期性支撑作用, 上述研究结果较难反映铁路振动的实际情况。

笔者利用列车-轨道相互作用的有限元模型计算得到轨道与路基间的相互作用力, 经 Fourier 变换后作为饱和地基表面的激励荷载, 结合饱和地基的薄层法 Green 函数, 建立了列车-轨道-地基简化计算模型, 对饱和地基上列车运行产生的地面振动进行了计算分析和振动评价。

1 列车-轨道-饱和地基的简化计算模型

1.1 列车-轨道相互作用模型

当列车通过轨道时, 车辆和轨道在空间各方向产生振动, 振动通过轨道传递到地基, 对周围环境产生影响。为计算轨枕与道床间的相互作用力, 笔者采用文献[6]建立的列车-轨道相互作用有限元模型, 将轨道视为支撑在弹性支座上的长梁, 考虑垫层、道床及路基的弹性支撑和阻尼效应, 将轨枕和道渣的质量作为集中质量, 施加于各支座节点上, 计算过程可参考文献[6]。

1.2 列车-轨道-地基计算模型

为计算列车运行引起的地面振动, 把每个轨枕的反力作为一个振源, 对地面产生激励, 综合每一根轨枕的作用, 得到列车引起的地面振动。

轨枕分布如图 1 所示, 设坐标原点处轨枕反力为 $f_0(t)$, 当不考虑轨道不平顺时, 由于轨枕的周期性离散作用, 第 m 个轨枕反力 $f_m(t)$ 为

$$f_m(t) = f_0(t \pm t_m) = f_0(t \pm md/v) \quad (1)$$

式中: d 为轨枕间距; v 为列车行驶速度; m 为轨枕数目。对式(1)进行 Fourier 变换可得

$$\bar{F}_m(\omega) = e^{z i \omega m d / v} \bar{F}_0(\omega) \quad (2)$$

式中: $\bar{F}_0(\omega)$ 、 $\bar{F}_m(\omega)$ 分别为频域内坐标原点处和第 m 个轨枕反力。

在频域内, 列车运行时产生的轨枕反力在自由场上任一点 X^R 处引起的竖向位移 $\bar{u}_i(X^R, \omega)$

收稿日期: 2010-01-12; 修订日期: 2010-03-18

作者简介: 毕苏萍(1965-), 女, 河南郑州人, 高级工程师, 主要从事结构工程研究工作, E-mail: bisuping@zzu.edu.cn.

可用表示为:

$$\tilde{u}_z(X^R, \omega) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \tilde{u}_{zz}(X^m, X^R, \omega) \tilde{F}_m(\omega) \quad (3)$$

式中: $u_{zz}(X^m, X^R, \omega)$ 为 Green 函数 $\tilde{u}_{ij}^G(X^m, X^R, \omega)$ 的竖向分量; $X^m = (x, md, z)$.

对式(3)进行 Fourier 逆变换, 即可得到地面任意一点振动的位移时程, 进而可以得到振动速度和加速度时程。

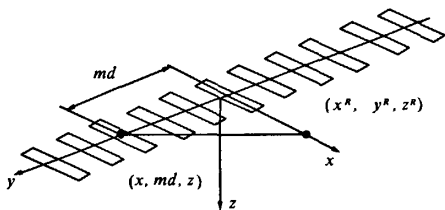


图1 轨枕与振动计算点示意图

Fig.1 Sketch of sleepers and point of vibration calculation

1.3 饱和地基的 Green 函数

由式(3)可知, 要获得列车运行引起的地面任意一点的振动, 关键在于饱和地基 Green 函数 $\tilde{u}_{ij}^G(X^m, X^R, \omega)$ 的求解。考虑土骨架与流体的惯性耦合和黏性耦合作用, 考虑简谐运动 ($e^{i\omega t}$) 的形式, 并消去流体相对于土骨架的位移, 以孔压和土骨架位移为基本量 Biot 波动控制方程为^[7]:

$$\begin{cases} \mu \tilde{u}_{i,jj} + (\lambda + \mu) \tilde{u}_{j,i} - (\alpha - \beta) \tilde{p}_{,i} + \\ \omega^2 (\rho - \beta \rho_f) \tilde{u}_i + F_i = 0 \\ \frac{\beta}{\rho_f \omega^2} \tilde{p}_{,ii} + (\alpha - \beta) \tilde{u}_{i,i} + \frac{1}{M} \tilde{p} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\beta = -\frac{\rho_f \omega^2}{i\omega b - m\omega^2}$; \tilde{u}_i 为土骨架位移分量; \tilde{p} 孔压; F_i 为作用在土骨架上的体积力; μ, λ 为拉梅常数; α, M 为考虑两相材料压缩性的 Biot 参数; $b = \eta/k_d$ 为黏性耦合系数, 其中, η 为流体动力黏滞系数; k_d 为动力渗透系数; $\rho = \rho_s n + \rho_f (1-n)$, n 为土体孔隙率; ρ_s, ρ_f 分别为土骨架和孔隙流体的密度; $m = \rho_f/n$.

根据饱和和半空间边界条件, 即可对式(4)进行求解, 得到饱和地基的 Green 函数。笔者采用薄层法进行求解, 薄层法属于一种半解析半数值的方法, 即对式(4)在竖向进行类似于有限元法的离散, 将土层划分为有限个薄层, 而在其余坐标方向进行解析求解。求解过程, 可参考文献[8]。

2 计算结果与分析

列车-轨道相互作用模型的计算参数取秦沈

客运专线和“先锋号”试验机车的相关参数。“先锋号”试验列车由两个单元计6辆车组成, 每2辆动车和1辆拖车组成一个单元。列车总长158.4 m, 拖车长度25.5 m, 动车长度26.6 m, 共有12个轮对。转向架中心距离18.0 m, 固定轴距2.5 m, 每台载重车平均轴重为12 674.46 kg。列车-轨道系统计算参数可参见文献[9]。

为简化起见, 假定铁路轨道直接修筑在均质饱和地基上, 不考虑路堤及地基分层的影响。地基土的计算参数如表1所示。

表1 饱和地基的计算参数

Tab.1 Parameters of poroelastic soil

v	$\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho_f / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	ζ
0.3	2700	1000	200	0.03
n	η	M/Pa	κ_d/m^2	α
0.3	0.001	2.2×10^{10}	1×10^{-11}	0.97

注: 表中 v_s 为剪切波速; ζ 为材料阻尼系数。

2.1 列车引起的地面振动特性分析

分别取列车行驶速度为180和250 km/h进行计算。由式(3)经 Fourier 反变换可得到地面各点的位移时程, 经微分后最终可得地面的竖向振动加速度时程及其频谱, 结果如图2、3所示。

由图可知, 在距离轨道较近时, 随着列车轮对的通过, 时域曲线都出现明显的周期性峰值, 单个轮对的作用基本上能够分辨出来; 随着距离的增加, 周期性峰值仍能够分辨出; 直至距轨道距离较远时 (如图2中的(b)图), 周期性峰值才难以明显分辨。

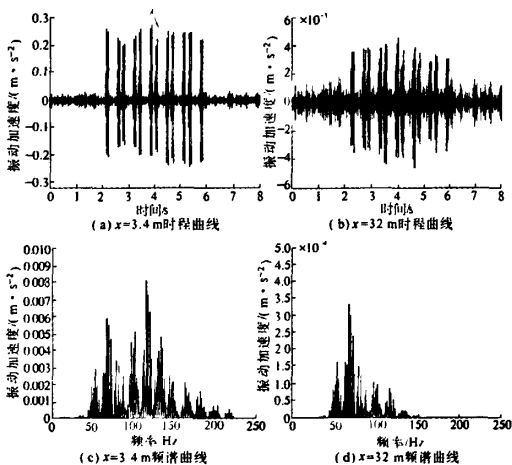


图2 地面竖向振动加速度时程曲线及其频谱(180 km/h)

Fig.2 Vertical acceleration time history and corresponding Fourier spectrum (180 km/h)

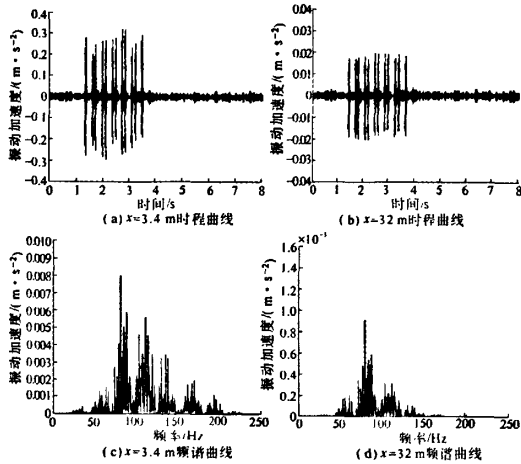


图3 地面竖向振动加速度时程曲线

及其频谱(250 km/h)

Fig.3 Vertical acceleration time history and corresponding Fourier spectrum (250 km/h)

由加速度频谱曲线可知,在距轨道较近时,高频振动占主导地位;随距离的增加,高频成份衰减较快,低频振动逐渐起到主导作用。此外,频谱中的几个峰值点反映了列车荷载作用率和地基的频谱特性的影响,例如,轨枕间隔的离散作用率($v = 250 \text{ km/h}$, $f = 116.7 \text{ Hz}$)在频谱曲线中都能很好的表现出来,并且随着距轨道距离的增加,这种离散作用逐渐减弱。此外,随着列车行驶速度的增加,频谱曲线中对应的峰值频率逐渐向高频移动,但在 $50 \sim 90 \text{ Hz}$ 间的峰值点基本无较大频移,表明这些峰值点不依赖于车速,更多反映了列车、轨道、地基间的动力相互作用。

2.2 地面振动衰减特性分析

列车行驶引起周围地面振动,对铁路沿线的工厂、民居等产生不利影响。因此,分析地面振动随距离的衰减规律具有重要的意义。

不同列车行驶速度下地面振动加速度衰减曲线如图4所示。由图4可知,列车行驶速度不同时,列车运行引起的地面振动加速度的衰减规律基本相同:距轨道较近时($< 30 \text{ m}$),地面振动加速度峰值衰减较快;随着距离的进一步增加,振动加速度衰减逐渐趋于平缓;列车行驶速度越高,同一距离处对应的地面振动加速度峰值就越高;距离轨道越近,这种差别就越大,随着距离的增加,这种差别逐渐减小。其中,列车行驶速度为 120 km/h 时,地面振动加速度的量级远小于另外三种情况,这表明车速对地面振动加速度的影响

较大,随着车速的增加,地面振动幅值有较大增幅,这一点值得注意。

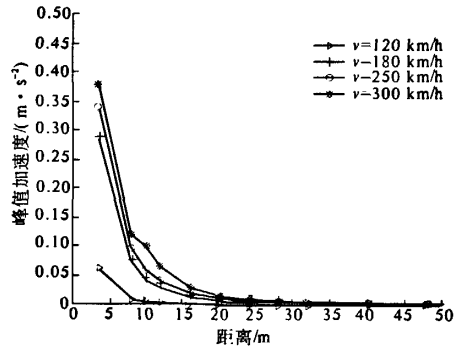


图4 列车行驶速度不同时地面振动加速度

峰值衰减曲线

Fig.4 Simulated reduction of peak ground vertical acceleration with distance as function of train speed

2.3 地面振动的评价

根据国际振动标准与灵敏设备振动标准的规定,通常将振动分为工厂、办公大楼、住宅区、手术室4个ISO振动标准和VC-A~VC-E5个灵敏设备标准。

按1/3倍频程分析方法,对列车运行引起的地面振动进行振动等级评价,将计算结果绘制在振动诺模图中,如图5所示。由图可知,当频率高于 8 Hz 时,在距离轨道 3.5 m 左右时,基本上满足住宅区振动控制标准;随着距离的增大,振动量级逐渐降低,逐渐满足灵敏设备的振动控制标准。近源处列车运行速度对振动量级的影响不大;随着距离的增加,车速对振动量级的影响显著,车速越快,地面振动量级越大。当频率在 $4 \sim 8 \text{ Hz}$ 时,车速较大时,距轨道 3.5 m 处的地面振动超过了住宅区振动控制标准;但随着距离的增加,地面振动基本上都能满足手术室振动控制标准。频率小于 4 Hz 时,地面振动的速度值较大;在近轨道处,地面振动甚至超过了工厂振动控制标准;随着距离的增加,振动量级减弱幅度较小,说明了低频振动的衰减相对较慢。

3 结论

利用车辆-轨道相互作用有限元模型计算得到轨道与地基间的相互作用力,经傅立叶变换后作为激励荷载;结合薄层法推导的饱和地基Green函数,计算分析饱和地基上高速列车行驶条件下产生的周围地面振动。主要结论如下:

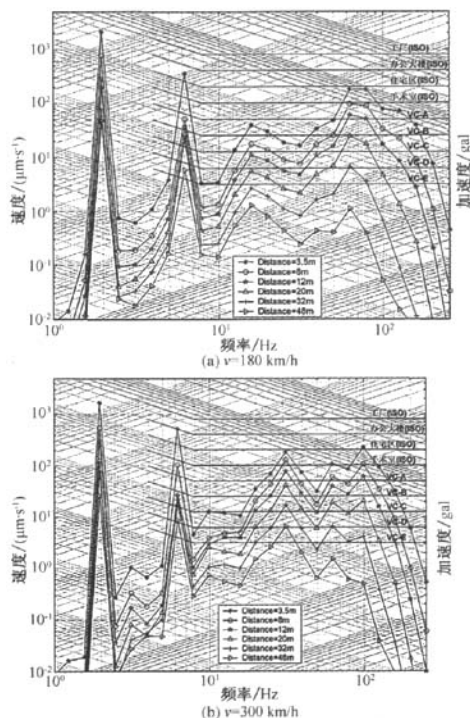


图5 列车引起的地面振动的1/3倍频程分析

Fig.5 One-third octave band analysis of ground vibrations

(1) 列车速度较大时,产生的地面振动幅值也较大,但受车速影响不大。

(2) 列车引起的地面振动,在低频段振动速度和位移量级较大,而高频段振动速度量级较大。近轨道处,地面振动能够满足住宅区振动标准,随

距离的增加,逐渐满足灵敏设备的振动标准。

参考文献:

- [1] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J. A theoretical study on the influence of the track on train-induced ground vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 272: 909-936.
- [2] KRYLOV V V. Ground vibration boom from high-speed trains. Journal of Low Frequency Noise[J]. Vibration and Active Control. 1999, 18(4): 251-283.
- [3] TAKEMIYA H. Field vibration mitigation by homeycomb WIB for pile foundations of a high-speed train viaduct[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24: 69-87.
- [4] 左迎辉,蔡波强,徐长节. 移动荷载下饱和半空间的动力响应[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4352-4357.
- [5] 金波. 高速荷载下多孔饱和地基的动力响应. 力学季刊, 2004, 25(2): 165-174.
- [6] 雷晓燕. 轨道力学与工程新方法[M]. 北京:中国铁道出版社, 2002.
- [7] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 179-191.
- [8] 时刚. 饱和地基中 Rayleigh 波的传播与屏障隔振研究[D]. 上海:同济大学地下建筑与工程系, 2008.
- [9] 孙雨明. 铁路交通产生的地面振动与排桩隔振[D]. 上海:同济大学地下建筑与工程系, 2003.

Ground Vibration Due to Railway Traffic on Saturated Half-space

BI Su-ping¹, SHI Gang¹, GAO Guang-yun²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the paper, in view of the problems of ground vibration due to railway traffic on saturated half-space, the sleeper-embankment interaction forces are calculated with FEM using train-track interaction model, which can be used as exciting loads for calculating ground vibration after Fourier transform. Then in combination with the Green's function for saturated ground derived by thin layer method, ground vibrations due to high-speed railway traffic are calculated and effects of train speed and soil parameters on ground vibration are investigated and discussed in detail. The results show that increasing train speed can substantially increase the ground vibration. Moreover, the ground vibration level in nearfield can satisfy the vibration criterion set for the residence area.

Key words: railway traffic; ground vibration; saturated layered ground; thin layer method; vibration assessment