

# 饱和分层地基上列车运行引起的地面振动分析

高广运<sup>1,2</sup>, 赵宏<sup>1,2</sup>, 张博<sup>1,2</sup>, 何俊锋<sup>3</sup>

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

3. 四川省宜宾市交通运输局, 四川 宜宾 644000)

**摘要:** 基于薄层法原理, 将圆柱坐标系下饱和土的 Biot 轴对称波动方程在竖向进行离散, 沿切向坐标及轴向分别进行 Fourier 级数分解和 Hankel 变换, 得到饱和层状介质中频域-波数域中的位移基本解表达式, 再利用 Hankel 逆变换和 Fourier 综合, 求得频域柱坐标系下的位移表达式。结合运行列车-轨道-地基的振动模型, 对饱和分层地基上列车运行引起的地面振动进行分析。详细讨论了渗透系数、孔隙率、流体黏滞系数和剪切波速等饱和土层参数对振动传播与衰减的影响规律。研究表明: 地基的第 1 层土体参数对列车运行引起的地面振动的影响比第 2 层土体参数的影响显著, 饱和土体的渗透系数、孔隙率、流体黏滞系数和剪切波速是影响地面振动的主要参数。

**关键词:** 饱和土; 层状地层; 薄层法; 列车-轨道-地基模型; 地面振动

**中图分类号:** P315.966

**文献标志码:** A

## Analysis of Ground Vibration Induced by Trains on Saturated Layered Ground

GAO Guangyun<sup>1,2</sup>, ZHAO Hong<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1,2</sup>, HE Junfeng<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Yibin Municipal Bureau of Transportation, Yibin 644000, China)

**Abstract:** The thin layered method (TLM) is adopted to derive the solution of Lamb's problem for layered saturated foundation under the action of dynamic loads. The displacement expression in the frequency-wave number domain for layered saturated medium is obtained by discretizing Biot's axisymmetric dynamic equation in vertical coordinates, and by the Fourier series decomposition in tangential coordinates and Hankel transform in axial coordinates. Then the inversion of Hankel transform and Fourier synthesis are

used to get the displacement expression in the frequency domain. Combined a moving train-track-ground interaction model, a parametric study is given to evaluate the ground vibration induced by train moving loads on the saturated layered ground. The effect of the soil parameters, such as permeability coefficient, porosity, fluid viscosity coefficient and shear wave velocity, on the attenuation of ground vibration is investigated and discussed in detail. The results show that the parameters of the first layer affect ground vibration induced by train more significantly than those of the second layer. It is also found that the permeability coefficient of soil, the fluid viscosity coefficient, porosity and shear wave velocity have great influence on the ground vibration.

**Key words:** saturated soil; layered ground; thin layered method (TLM); train-track-ground interaction model; ground vibration

随着我国高速铁路建设的快速发展, 列车移动荷载引起的振动对周围环境的影响愈显突出; 同时, 随着经济发展和生活水平的提高, 人们对环境振动的要求越来越高, 快速发展的精密电子生产线对环境振动要求则更加严格。据西方国家统计, 铁路、交通和工业生产引起的环境振动最强烈, 因此, 铁路运行引起的振动已成为当前研究的热点问题之一。

针对铁路交通产生的环境振动问题, 国内外学者开展了大量的研究。Eason<sup>[1]</sup>利用傅里叶(Fourier)变换求解了移动荷载下弹性半空间的动力响应; Sheng 等<sup>[2]</sup>采用半解析的方法研究了移动荷载作用下层状土体的振动响应; 此后, Sheng 等<sup>[3]</sup>采用简化的列车-轨道模型、Huang 等<sup>[4]</sup>采用 FEM-BEM(有限元-边界元)方法分别研究了列车运行引起的地面振动; Krylov<sup>[5]</sup>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; Lomaert

等<sup>[6]</sup>、Takemiya<sup>[7]</sup>则分别针对法国的 TGV、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,研究了列车引起的地面振动。

上述研究局限于单相介质,未考虑孔隙水影响。我国沿海经济发达地区,如长江三角洲、珠三角和渤海湾等均属饱和土地基,而饱和地基在列车荷载作用下产生的动力响应与单相介质不同。因此,采用两相饱和介质理论进行研究更为合理。Burke 等<sup>[8]</sup>首先给出了 2 维多孔饱和半平面在表面移动荷载作用下的解析解,但没有考虑惯性项的影响。蔡袁强等<sup>[9]</sup>基于 Biot 饱和多孔介质的波动方程,通过双重 Fourier 变换求得频域-波数域内的波动方程,再通过 Fourier 逆变换得饱和土在列车荷载作用下轨道-地基的动力响应,结果表明轨道刚度和车速对系统的动力响应影响较大。蔡袁强等<sup>[10]</sup>将地基土分为两层(上部弹性介质、下部完全饱和多孔介质),研究了列车荷载作用下饱和半空间土体的稳态响应。蔡袁强等<sup>[11-12]</sup>对高速移动矩形脉冲荷载作用下多孔弹性半空间介质振动的稳态响应分别进行了理论及数值分析,结果表明车速及土骨架的渗透特性对土骨架的动力响应及孔隙水压力均影响显著。高广运等<sup>[13-16]</sup>采用薄层法-半解析边界元法和 2.5 维有限单元法,分析了饱和均质地基上列车运行引起的地面振动。与弹性地基相比,饱和地基的研究成果较少。

本文把轨道视为饱和地基上的 Euler 梁,建立了考虑轨枕离散支撑作用的列车-轨道-地基振动模型;从饱和土的 Biot 波动方程出发,运用薄层法原理对地基进行建模,结合 Fourier 级数分解和 Hankel 变换方法,获得了饱和层状地基的 Green 函数;运用上述耦合振动模型分析了饱和分层地基上列车运行引起的地面振动特性,详细讨论了渗透系数、孔隙率和流体黏滞系数等对地面振动的影响。

## 1 列车-轨道-地基振动模型

如图 1 所示,将轨道作为饱和地基上的 Euler

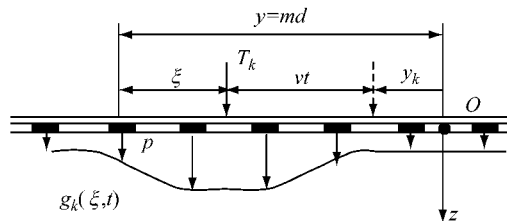


图 1 轨道的竖向挠度曲线

Fig. 1 Vertical deflection curve of the track

梁,其单位长度质量为  $\rho_l$ ,抗弯刚度为  $EI$ ,地基刚度为  $k_s$ ,设列车有  $k$  个车轮,形成垂向轴重集中荷载列  $T_1, T_2, \dots, T_k$ ,则  $T_k$  作用下轨道梁的振动方程为<sup>[5]</sup>

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \rho_l \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + k_s w = T_k \delta(y - y_k - vt) \quad (1)$$

式中: $y_k$  为荷载  $T_k$  在零时刻的位置; $v$  为列车速度。

设轨道移动坐标  $\xi = y - y_k - vt$ ,  $\xi$  是  $t$  时刻  $T_k$  作用点到任意点  $p$  的距离,由式(1)可得竖向位移  $w(\xi)$ <sup>[5]</sup>

$$w(\xi) = \frac{T_k}{8EI\beta^3\delta} \exp(-\beta|\xi|) (\cos \beta\eta\xi + \frac{\delta}{\eta} \sin \beta\eta|\xi|) \quad (2)$$

式中: $\delta = [1 - (v/c_{\min})^2]^{0.5}$  和  $\eta = [1 + (v/c_{\min})^2]^{0.5}$  是与加载速率有关的两个参数,当车速与轨道弯曲自由振动的波速  $c_{\min} = (4k_s EI/\rho_l^2)^{0.25}$  相比很低时, $\delta$  和  $\eta$  均约等于 1;  $\beta = (k_s/4EI)^{0.25}$ 。

由式(2),若  $T_k$  在任意点  $p$  引起竖向位移为  $w(\xi)$  时,由此产生的轨枕反力  $g_k(\xi, t)$  可表示为<sup>[5]</sup>

$$g_k(\xi, t) = \frac{T_k}{N_{\text{sm}}} \frac{w(\xi)}{w_{\text{sm}}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\xi + y_k + vt - md) \quad (3)$$

式中: $\xi = md - y_k - vt$ ;  $d$  为轨枕间距;  $N_{\text{sm}}$  是荷载  $T_k$  所能影响到的最大轨枕数;  $w_{\text{sm}}$  为静荷载  $T_k$  作用下的最大竖向位移;  $m$  为轨枕数。

当列车的  $K$  个车轮通过轨道时,整个荷载列对地基上任意一点的反力可表示为

$$f_z(X, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^K \delta(x) \delta(y - \xi - y_k - vt) \delta(z) g_k(\xi, t) d\xi \quad (4)$$

将式(3)带入式(4),并对时间进行 Fourier 变换,注意到矢量  $\mathbf{X}_s = \{x_s, y_s, z_s\}^T$ , 而  $x_s = 0, y_s = md, z_s = 0$ , 最终可得

$$\tilde{f}_z(X, \omega) = \tilde{F}(\omega) \tilde{C}(\omega) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(X - \mathbf{X}_s) \exp(-i\omega \frac{y_s}{v}) \quad (5)$$

式中,顶划线“ $\sim$ ”表示该变量的频域变化<sup>[13]</sup>。

列车运行时产生的振源在自由场上任一点  $X_R$  处引起的竖向位移  $\tilde{u}_z(X_R, \omega)$  可由下式计算得到:

$$\tilde{u}_z(X_R, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}_{Gz}(X_R, X, \omega) \tilde{f}_z(X, \omega) dX \quad (6)$$

式中,  $\tilde{u}_{Gz}(X_R, X, \omega)$  为饱和地基的动力 Green 函数  $\tilde{u}_{Gij}(X_R, X, \omega)$  的竖向分量。

将式(5)带入式(6)可得

$$\tilde{u}_z(X_R, \omega) = \tilde{F}(\omega) \tilde{C}(\omega) \tilde{u}_{\Sigma}(X_R, \omega) \quad (7)$$

$$\tilde{u}_z(X_R, \omega) = \left[ \tilde{u}_{Gz}(r_0, z_R, \omega) + \sum_{m=1}^{+\infty} 2\cos\left(\omega \frac{md}{v}\right) \tilde{u}_{Gz}(r_m, z_R, \omega) \right] \quad (8)$$

$$\tilde{F}(\omega) = \frac{1}{N_{sm}} \frac{1}{\beta v} \left[ \frac{\delta + \eta + \frac{\omega}{v\beta}}{\delta^2 + \left(\eta + \frac{\omega}{v\beta}\right)^2} + \frac{\delta + \eta - \frac{\omega}{v\beta}}{\delta^2 + \left(\eta - \frac{\omega}{v\beta}\right)^2} \right] \quad (9)$$

$$\tilde{C}(\omega) = \sum_{k=1}^K T_k \exp(i\omega \frac{y_k}{v}) \quad (10)$$

式(10)表明,拾振点  $X_R$  的位移  $\tilde{u}_z(X_R, \omega)$  由 3 部分组成:  $\tilde{F}(\omega)$  为频域内当 1 个轮荷载以速度  $v$  通过钢轨时 1 个枕轨传递的力;  $\tilde{F}(\omega)\tilde{C}(\omega)$  表示当 1 列火车以速度  $v$  在钢轨上运行时 1 个枕轨传递的力;  $\tilde{C}(\omega)$  与列车的组成及运行速度有关;  $\tilde{u}_z(X_R, \omega)$  表示每个枕轨以时间  $d/v$  为间隔依次作用 1 个 Dirac 冲击力时接收点处的位移频谱,包括无限个枕轨贡献的  $\tilde{u}_{Gz}(r_m, z_R, \omega)$  的叠加。

对式(7)进行 Fourier 逆变换,即可地面任意一点的位移时程,进而可以得到振动速度和振动加速度时程。

Krylov<sup>[5]</sup>采用半空间格林函数的 Lamb 近似解,只考虑了面波的贡献。本文运用薄层法求解半空间分层地基的格林函数,可综合考虑体波及面波的贡献。

## 2 饱和层状地基的薄层法基本解答

薄层法属于一种半解析半数值方法,即对波动微分方程在竖向进行与有限单元法(或采用其他数值逼近方法)类似的离散,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。

考虑简谐运动( $e^{i\omega t}$ )的形式,以孔压和土骨架位移为基本量的 Biot 方程为

$$\begin{cases} \mu \left( \nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) + (\lambda + \mu) \frac{\partial \epsilon}{\partial r} - (\alpha - \beta) \frac{\partial p}{\partial r} + F_r = -Hu_r \\ \mu \left( \nabla^2 u_\theta - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) + (\lambda + \mu) \frac{1}{r} \frac{\partial \epsilon}{\partial \theta} - (\alpha - \beta) \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + F_\theta = -Hu_\theta \\ \mu \nabla^2 u_z + (\lambda + \mu) \frac{\partial \epsilon}{\partial z} - (\alpha - \beta) \frac{\partial p}{\partial z} + F_z = -Hu_z \\ \frac{\beta}{\rho_l \omega^2} \nabla^2 p + \frac{1}{M} p + (\alpha - \beta) \epsilon = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ;  $H = \omega^2 (\rho - \beta \rho_l)$ ;  $\beta = -\rho_l \omega^2 / (i\omega b - \rho_l \omega^2 / n)$ ;  $F_r, F_\theta, F_z$  分别为作用在土骨架上的轴向、切向和竖向体积力;  $u_r, u_\theta, u_z$  分别表示极坐标下的位移;  $\mu, \lambda$  为拉梅常数;  $\alpha, M$  为考虑两相材料压缩性的 Biot 参数;  $\epsilon$  为体应变;  $\rho_l$  为孔隙流体密度。

考虑水平面上的应力,并定义水平面上的“等效力” $T = \{\tau_{rz}, \tau_{\theta z}, \sigma_z, q_z\}^T$ ,  $q_z$  为孔隙流体的流量,故有

$$\begin{cases} \tau_{rz} = \mu \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \\ \tau_{\theta z} = \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) \\ \sigma_z = \lambda \epsilon + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} - \alpha p \\ q_z = \frac{i\omega \beta}{\rho_l \omega^2} \left[ \frac{\partial p}{\partial z} - \rho_l \omega^2 u_z \right] \end{cases} \quad (12)$$

首先对竖向坐标  $z$  进行有限元离散,将半空间地基离散为  $n_s$  个水平薄层。当每一层的厚度较小时,对于该层内的位移可采用线形插值模拟。假定沿薄层厚度方向的位移为二次分布,即对层内位移采用二次插值。第  $i$  层内的土体位移  $u_r, u_\theta, u_z, p$  为

$$\begin{aligned} u_r &= Nu_n, \quad u_\theta = Nu_\theta, \\ u_z &= Nu_z, \quad p = Np_i \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $u_n = \{u_n, u_{r(i+1)}\}^T$ ,  $u_\theta = \{u_\theta, u_{\theta(i+1)}\}^T$ ,  $u_z = \{u_z, u_{z(i+1)}\}^T$ ,  $p_i = \{p_i, p_{(i+1)}\}^T$  分别为第  $i$  薄层土相应的结点位移矢量;  $N = [1 - \xi, \xi]$  为插值函数;  $\xi$  为广义坐标,对于第  $i$  层土,当  $z_i \leq z \leq z_{i+1}$  时,  $\xi = (z - z_i) / (z_{i+1} - z_i)$ 。

对于任意第  $i$  层土,可以给出一组合理的位移  $\delta u^*$ , 即  $\delta u^* = \{\delta u_r^*, \delta u_\theta^*, \delta u_z^*, \delta S^*\}^T$ , 使其满足第  $i$  层土体的动力位移微分平衡方程式(3)。按照加权余量法取  $N$  为试探函数,对  $\delta u^*$  进行离散,将离散的位移  $u$  代入第  $i$  层的位移微分平衡方程式(11)和边界条件式(12),可得相应的残余应力。考虑取这些残余应力在可能的位移  $\delta u^*$  上所做的功在整个区域内加权为零,并考虑到  $\delta u^*$  为一组任意合理的位移,经简化,然后沿切向坐标  $\theta$  进行 Fourier 级数分解,只考虑其中第任意  $m$  项,可得新的表达式;对新的表达式分别相加和相减,形成新的方程组,并对该方程组分别沿轴向坐标  $r$  进行  $m-1, m+1$  和  $m$  阶 Hankel 变换,再进行变量代换,可形成新的方程组,对位移  $u$  在每一层内进行线性插值,并代入到新方程中,对竖向坐标  $z$  进行积分,整理得

$$\sum_{i=1}^{n_s} \{\bar{P}_m^{(i)} - K_i \bar{u}_{mi}\} = 0 \quad (14)$$

或  $\bar{P}_m = K \bar{U}_m$  (15)

对于给定的力  $P$  先进行切向坐标的 Fourier 分解, 然后进行轴向坐标  $r$  的 Hankel 变换, 代入式 (15), 即可求出频域-波数域内的位移表达式, 然后对此位移表达式进行 Hankel 逆变换和 Fourier 综合, 即可求得柱坐标系下位移表达式  $\tilde{u}_{Gij}(X_R, X, \omega)$ . 由式 (9) 和式 (10) 可求得  $\tilde{F}(\omega)$ ,  $\tilde{C}(\omega)$ ; 对  $\tilde{F}(\omega)$ ,  $\tilde{C}(\omega)$ ,  $\tilde{u}_{\infty}(X_R, \omega)$  进行 Fourier 逆变换, 即可求得地面振动时程曲线.

### 3 饱和地基上列车运行引起的地面振动

以秦沈客运专线某车站工程为例, 场地为饱和分

层地基, 计算参数如表 1 所示. 采用上述列车-轨道-地基振动模型, 结合推导的饱和分层地基薄层法的基本解答, 分析列车运行时饱和土体土层参数对轨道周围地面振动的影响. 列车和轨道相关计算参数参照文献 [13] 选取, 列车运行速度取  $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

图 2 和图 3 为列车以  $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  运行时, 分别距轨道 5 m 和 15 m 处地面振动的计算竖向加速度时程及其频谱曲线. 由图可知, 当距轨道较近时, 随着列车轮对的通过, 时程曲线出现周期性峰值; 随着距轨道距离的增加, 加速度峰值快速衰减, 轮对的周期性峰值也逐渐难以分辨出来. 而在频谱曲线上, 随着距轨道中心距离的增加, 加速度的高频成分衰减很快,  $60 \sim 110 \text{ Hz}$  的频率快速减少, 频谱主要由低频控制. 此外, 频谱曲线上有几个幅值峰点, 反映了

表 1 饱和地层参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of saturated stratum

土层编号	土层厚度/m	土骨架密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙流体密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	剪切波速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	材料阻尼	泊松比	流体黏滞系数	流体体积模量/GPa	动力渗透系数/ $\text{m}^2$	孔隙率
①	2	1 850	1 000	100	0.050	0.40	0.001	2	$1 \times 10^{-14}$	0.45
②	10	1 760	1 000	130	0.030	0.45	0.001	2	$1 \times 10^{-13}$	0.40
③	10	1 670	1 000	140	0.030	0.45	0.001	2	$1 \times 10^{-14}$	0.40
④	$\infty$	1 910	1 000	160	0.030	0.35	0.001	2	$1 \times 10^{-11}$	0.30

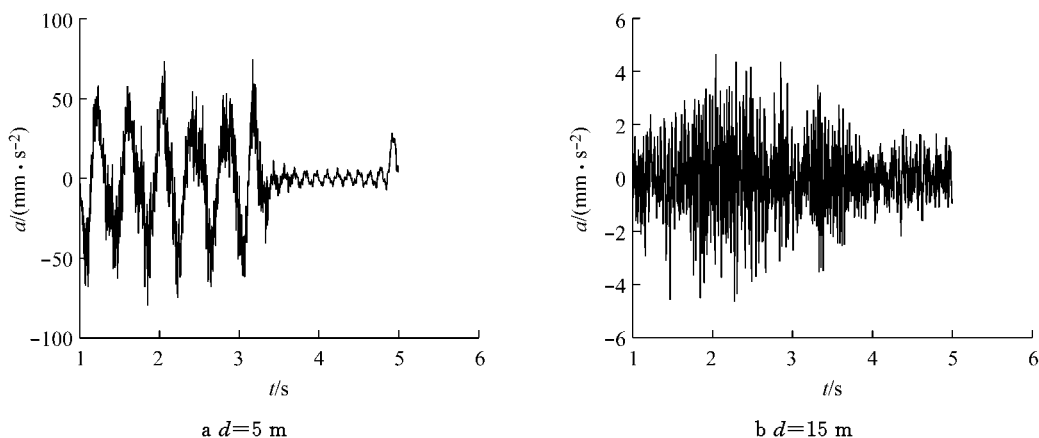


图 2 速度  $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时地面竖向加速度时程曲线

Fig.2 Time history of vertical ground acceleration at the speed of  $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

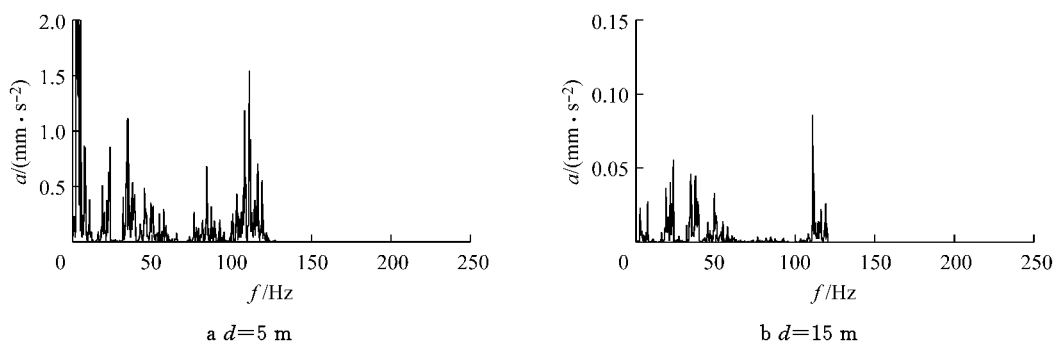


图 3 速度  $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时地面竖向加速度频谱曲线

Fig.3 Fourier spectrum for vertical ground acceleration at the speed of  $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

列车荷载作用以及轨枕的离散作用;即固定轴距 2.5 m 的移动轴重作用率( $f_1 = 69.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/2.5 \text{ m} = 27.76 \text{ Hz}$ )和轨枕间隔作用率( $f_2 = 69.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/0.595 \text{ m} = 116.7 \text{ Hz}$ ).

本文着重于列车引起的周围环境振动,因此,下面主要分析饱和和层状地基的参数变化对地面振动加速度幅值随距离衰减特性的影响.

### 3.1 土体渗透系数对地面振动的影响

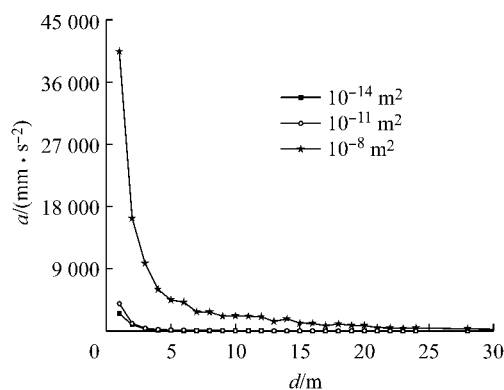
首先,分析第 1 层土体渗透系数的变化对地面振动的影响.为了考察第 1 层土体渗透系数对地面振动的影响规律,这里第 1 层土体的动力渗透系数取值范围为  $10^{-14} \text{ m}^2 \sim 10^{-8} \text{ m}^2$ ,其余计算参数如表 1 所示.图 4a 为第 1 层土体的渗透系数变化时,地面竖向加速度幅值随距离的衰减曲线.由图可知,地面竖向振动加速度幅值随渗透系数的增大而增大,且地面竖向振动加速度随距离的衰减在近源有一定的起伏现象.分析可知,一方面,近振源处体波(P 波、S 波)与 R 波相互干涉共同确定波场特性,远源波场仅由 R 波确定,而体波衰减快,R 波衰减慢,因此近源地面振动衰减快,远源衰减慢<sup>[17]</sup>.另一方面,轨枕为一系列分散扰源,故产生的地面各测点波动存在相位差,导致地表近振源处的振幅并不是随距离单调递减,因为近振源处高频成分多,相位差大,因此地面竖向加速度有一定的起伏;而远振源处高频成分衰减快,因此地面竖向加速度起伏不明显<sup>[18]</sup>.

其次,分析第 2 层土体渗透系数变化对地面振动的影响.第 2 层土体的动力渗透系数的取值范围为  $10^{-13} \text{ m}^2 \sim 10^{-7} \text{ m}^2$ ,其余计算参数如表 1.图 4b 为第 2 层土体的渗透系数变化时,地面竖向振动加速度值随距离的衰减曲线.由图 4b 可得到与图 4a 相似的规律,只是第 2 层土体渗透系数的变化对地面竖向振动的影响较第 1 层土体小.

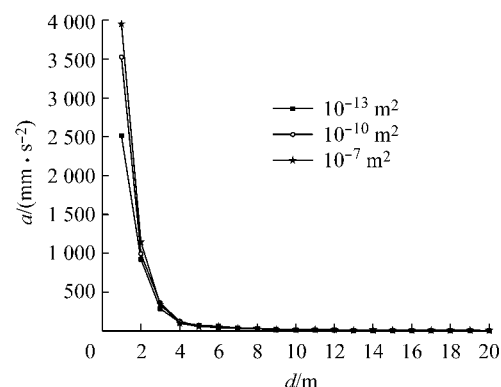
### 3.2 土体孔隙率对地面振动的影响

首先,分析第 1 层土体孔隙率变化对地面振动的影响.当孔隙率在 0.10~0.40 范围内变化时对计算结果影响较大,因此,为了分析第 1 层土体孔隙率的变化对地面竖向振动的影响,这里分别取第 1 层土体的孔隙率为 0.47,0.37,0.27,其余计算参数见表 1.图 5a 为孔隙率取值变化时,地面竖向振动加速度幅值随距离的衰减曲线.由图可知,地面竖向振动加速度幅值受第 1 层土体的孔隙率影响较大,随孔隙率的增加,地面竖向加速度幅值则明显减小.

其次,分析第 2 层土体孔隙率的变化对地面振动的影响.分别取第 2 层土体的孔隙率为 0.53,0.43,



a 第 1 层土



b 第 2 层土

图 4 渗透系数不同时地面竖向加速度随距离的变化  
Fig. 4 Attenuation curves of vertical ground acceleration along distance for various  $k_p$  of the second soil layer

0.33,其余计算参数见表 1.图 5b 为第 2 层土体孔隙率变化时,地面竖向振动加速度随距离的衰减曲线.由图可知,由于第 2 层土体距地面较深,其孔隙率的变化对地面竖向振动加速度幅值的影响较小.

### 3.3 土体流体黏滞系数对地面振动的影响

首先,分析第 1 层土体流体黏滞系数的变化对地面振动的影响.当流体黏滞系数小于 0.05 时才对计算结果影响较大,故为了分析第 1 层土体流体黏滞系数对地面竖向振动的影响,分别取第 1 层土体的流体黏滞系数为 0.100,0.010,0.001,其余计算参数如表 1 所示.图 6a 为第 1 层土体的流体黏滞系数变化时,地面竖向振动加速度幅值随距离的衰减曲线.由图可知,地面竖向振动加速度幅值受第 1 层土体流体黏滞系数的影响较大,随流体黏滞系数的增加,地面竖向振动加速度幅值减小.

其次,分析第 2 层土体流体黏滞系数的变化对地面振动的影响.分别取第 2 层土体的流体黏滞系数为 0.100,0.010,0.001,其余计算参数见表 1.图

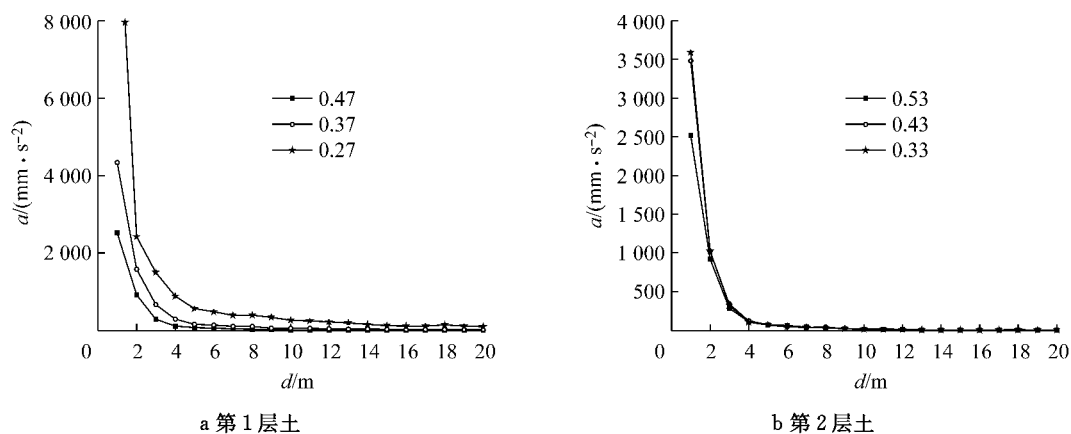


图5 孔隙率不同时地面竖向加速度随距离的变化

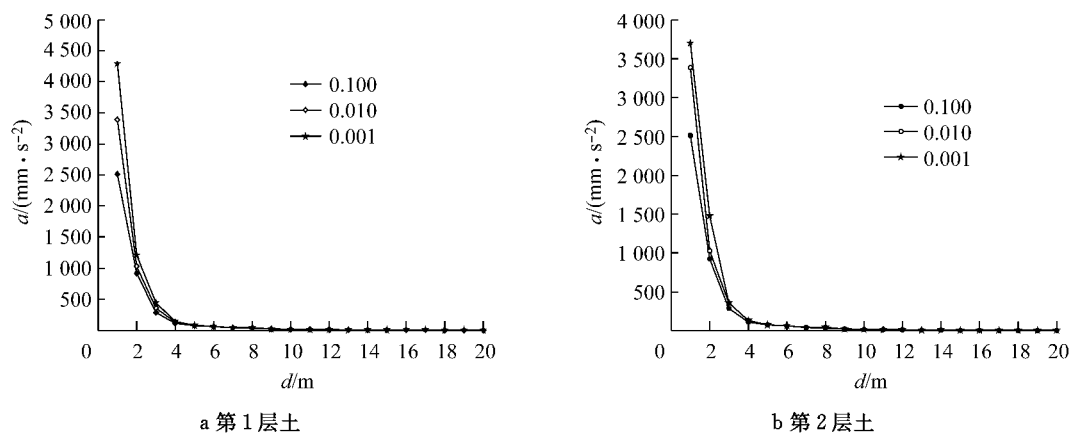
Fig.5 Attenuation curves of vertical ground acceleration along distance for various  $n$  of the second soil layer

图6 流体黏滞系数变化对地面竖向加速度的影响

Fig.6 Attenuation curves of vertical ground acceleration along distance for various  $\eta$  of the second soil layer

6b为第2层土体的流体黏滞系数变化时,地面竖向振动加速度幅值随距离的衰减曲线.由图可知,地面竖向振动加速度受第2层土体流体黏滞系数的影响较小.

### 3.4 土体剪切波速变化对地面振动的影响

首先,分析第1层土体剪切波速变化对地面振动的影响.为了考察第1层土体剪切波速对地面振

动的影响规律,这里分别取第1层土体的剪切波速为50,100,150  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其余计算参数如表1所示.图7a为第1层土体剪切波速取值变化时,地面竖向振动加速度幅值随距离的衰减曲线.由图可知,随土体的剪切波速增加,地面竖向振动加速度值明显减小,即地面竖向振动加速度幅值受第1层土体剪切波速的影响较大.

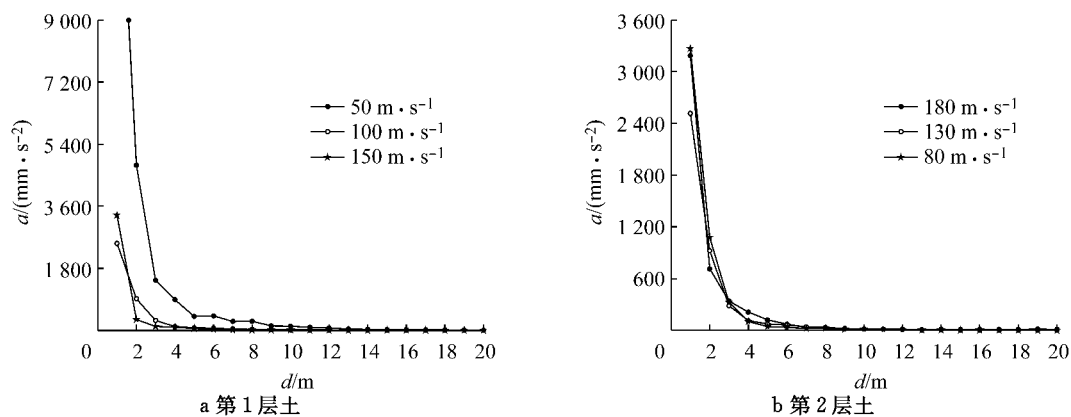


图7 剪切波速不同时地面竖向加速度随距离的变化

Fig.7 Attenuation curves of vertical ground acceleration along distance for various  $v_s$  of the second soil layer

其次,分析第2层土体剪切波速变化对地面振动的影响.分别取第2层土体的剪切波速为80,130,180  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其余计算参数如表1所示.图7b为第2层土体剪切波速取值变化时,地面竖向振动加速度幅值随距离的衰减曲线.由图可知,地面竖向振动加速度值随第2层剪切波速的增加而稍有减小,但相对于第1层土体剪切波速的变化对地面振动的影响,第2层土的剪切波速影响较小.

## 4 结论

(1) 计算表明,相对于第2层土体参数变化而言,第1层土体参数对列车运行引起的地面振动影响较大.

(2) 饱和土体的渗透系数是影响地面振动的主要参数,对地面振动有较大的影响.随着渗透系数的增加,地面的振动幅值增大;但当表层土渗透系数大于 $10^{-8} \text{ m}^2$ 量级或小于 $10^{-14} \text{ m}^2$ 时,再增加或减小渗透系数对地面振动幅值基本没有影响.

(3) 孔隙流体动力黏滞系数对地面振动也有较大影响,由于孔隙流体动力黏滞系数和渗透系数这两个参数在饱和土体动力运动方程中的作用相反,孔隙流体动力黏滞系数对地面振动幅值的影响与渗透系数对地面振动幅值的影响规律也相反.

(4) 土体孔隙率对地面振动有较大影响,地面竖向振动幅值随孔隙率的增大而减小.

(5) 土体剪切波速是影响地面振动的主要因素,随剪切波速的增加,地面竖向振动加速度明显减小.

## 参考文献:

- [1] Eason G. The stresses produced in a semi-infinite solid by a moving surface force[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1965(2): 581.
- [2] Sheng X, Jones C, Petyt M. Ground vibration generated by a load moving along a railway track[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 228(1): 129.
- [3] 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.
- [4] Hung H H, Yang Y B. Elastic waves in visco-elastic half-space generated by various vehicles loads[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21: 1.
- [5] Krylov V V. Ground vibration boom from high-speed trains. *Journal of Low Frequency Noise*[J]. *Vibration and Active Control*, 1999, 18(4): 251.
- [6] Lomaert G, Degrande G. Experimental validation of a numerical prediction model for free field traffic induced vibrations by in-situ experiments[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21(6): 485.
- [7] Takemiya H. Field vibration mitigation by honeycomb WIB for pile foundations of a high-speed train viaduct[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24: 69.
- [8] Burke M, Kingsbury H B. Response of poroelastic layers to moving loads[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1984, 20(5): 499.
- [9] Cai Y Q, Sun H L, Xu C J. Three-dimensional analyses of dynamic responses of track-ground system subjected to a moving train load[J]. *Computers and Structures*, 2008, 86: 816.
- [10] Cai Y Q, Cao Z G, Sun H L, et al. Dynamic response of pavements on poroelastic half-space soil medium to a moving traffic load[J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36: 52.
- [11] Cai Y Q, Sun H L, Xu C J. Response of railway track system on poroelastic half-space soil medium subjected to a moving train load[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45: 5015.
- [12] Cai Y Q, Sun H L, Xu C J. Steady state responses of poroelastic half-space soil medium to a moving rectangular load[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44: 7183.
- [13] 高广运,何俊峰,李志毅,等. 饱和地基上列车运行引起的地面振动特性分析[J]. *振动工程学报*, 2010, 23(2): 179.  
GAO Guangyun, HE Junfeng, LI Zhiyi, et al. Analysis of ground vibration generated by a moving train on saturated ground[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2010, 23(2): 179.
- [14] 高广运,何俊峰,杨成斌,等. 2.5维有限元分析饱和地基列车运行引起的地面振动[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(2): 234.  
GAO Guangyun, HE Junfeng, YANG Chengbin, et al. Ground vibration induced by trains moving on saturated ground using 2.5D FEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(2): 234.
- [15] 高广运,李宁,何俊峰,等. 列车移动荷载作用下饱和地基的地面振动特性分析[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(6): 86.  
GAO Guangyun, LI Ning, HE Junfeng, et al. Analysis of ground vibration generated by train moving loads on saturated soil[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(6): 86.
- [16] Gao G Y, Chen Q S, He J F, et al. Investigation of ground vibration due to trains moving on saturated multi-layered ground by 2.5D finite element method[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 40: 87.
- [17] 高广运,邱畅,吴世明. 动力荷载作用下地面近场和远场的波动性状[C]//环境岩土工程理论与实践——首届全国环境岩土工程学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 2002: 173-179.  
GAO Guangyun, QIU Chang, WU Shiming. Ground vibration propagation characteristic of near field and far field subjected to dynamic loading[C]//Theory and Practice on Environmental Geotechnics—Proceedings of the first National Academic Symposium on Environmental Geotechnics. Shanghai: Tongji University Press, 2002: 173-179.
- [18] 王贻荪. 地面波动分析若干问题[J]. *建筑结构学报*, 1982, 4(2): 16.  
WANG Yisun. Some problems in the ground vibration analysis[J]. *Journal of Building Structures*, 1982, 4(2): 16.