

文章编号: 1000-7598-(2008)12-3186-07

移动荷载作用下层状饱和土的动力响应

徐斌^{1,3}, 陆建飞², 王建华¹, 徐满清³, 黎剑华³

(1. 上海交通大学 土木工程系, 上海 200030; 2. 江苏大学 土木工程系, 江苏 镇江 212013; 3. 南昌工程学院 土木工程系, 南昌 330029)

摘要: 根据 Biot 波动理论, 采用传递、反射矩阵 (TRM) 方法研究了移动荷载作用下层状饱和土动力响应问题。由快速 Fourier 逆变换法 (IFFT) 得到层状土地基位移、应力及孔压在时间-空间域内的数值解。计算结果与已有文献结果相吻合, 验证了算法的正确性。通过算例分析表明: 移动荷载作用下含有软弱夹层的层状土体比均质土具有更显著的动力响应, 同时会引起土体孔隙水压升高、土体波动性增强; 硬夹层时情况则相反。

关键词: 移动荷载; 饱和土; 层状地基; TRM 矩阵法; Fourier 变换

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Dynamic response of layered saturated soil under moving loads

XU Bin^{1,3}, LU Jian-fei², WANG Jian-hua¹, XU Man-qing³, LI Jian-hua³

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Department of Civil Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Department of Civil Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330029, China)

Abstract: Based on the Biot's theory, dynamic responses of layered saturated soil under moving loads are studied with the transmission and reflection matrices (TRM) methods. Numerical results of the displacements, the pore pressures and the stresses are obtained by performing inverse Fourier transformation in time-space domain. Some numerical examples and corresponding analysis are presented. The presented methodology is validated by comparing solutions with some known results. According to the analysis, it is concluded that the occurrence of softer interlayer in the layered half space enhances the vertical displacement and pore pressure. Comparing with the homogeneous soil, the response of the multi layered half space tends to contain higher frequency components and exhibits larger magnitude.

Key words: moving loads; saturated soil; layered foundation; TRM method; Fourier transformation

1 引言

随着高速公路、地铁及磁悬浮列车的大量兴建, 移动荷载引起的地基振动问题越来越引起人们的关注。如: Eason^[1]采用 Fourier 变换方法研究了移动点、圆形及矩形分布荷载作用下的弹性地基的动力响应; Hung 等^[2]研究了各种列车荷载作用下黏弹性半空间土的波动问题; 谢伟平等^[3]基于分层法研究了移动荷载作用下弹性土地基—轨道系统的动力响应。上述文献一般把地基土作为单相弹性介质, 忽略土体中水、土相的耦合问题。研究表明, 对沿海的软土地基中的移动荷载问题, 由于孔隙水压对土的液化及剪切破坏有很大影响, 因此,

必须把地基土处理成饱和土^[4]。在忽略水、土相互作用的惯性项的条件下, Siddharthan 等^[5]讨论了多孔饱和半平面在低速荷载作用下的动力响应; Theodorakopoulos^[6]利用 Fourier 级数方法研究了二维问题的解, 但其忽略了土骨架颗粒的压缩性影响。刘干斌等^[7]研究了二维条件下有限层厚黏弹性饱和土受简谐移动荷载作用的动力问题。

层状土地基模型更接近于工程实际, 目前对于层状土有多种解法, 如: 薄层单元法^[3]、传递矩阵方法^[8]、精确刚度矩阵法^[9]等。但当层间厚度或土层参数相差较大, 特别是在高速、高频动荷载作用下, 利用上述方法极易出现线性方程组的病态问题。为克服上述缺点, Luco 和 Apsel^[10, 11]首次提出传递、

收稿日期: 2007-02-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50578071)。

作者简介: 徐斌, 男, 1971 年生, 博士研究生, 主要从事饱和土体与基础动力相互作用问题的研究。E-mail: xubin1@sjtu.edu.cn

反射矩阵方法 (Transmission and Reflection Matrices Method), 并给出了弹性层状土在移动点荷载作用下的解。陆建飞等^[12]利用 TRM 方法研究了饱和层状土体内部作用简谐荷载时的动力响应。

在上述研究基础上, 根据 Biot 理论, 采用 TRM 方法研究移动荷载作用下层状饱和土的动力响应。由 IFFT 算法得到位移、孔压及应力在时间-空间域内的数值解。利用文中计算方法与已有结果比较, 验证了算法的正确性。算例分析表明: 移动荷载作用下含有软弱夹层的层状土体比均质土具有更显著的动力响应, 同时会引起土体孔隙水压升高、有效应力下降、土体波动性增强; 硬夹层时则情况相反。

2 饱和土控制方程及通解

孔隙介质及孔隙流体的动量守恒方程为^[13]

$$\left. \begin{aligned} \mu u_{i,jj} + (\lambda + \alpha^2 M + \mu) u_{j,ji} - \alpha M w_{j,ji} &= \rho \ddot{u}_i + \rho_f \ddot{w}_i \\ \alpha M u_{j,ji} + M w_{j,ji} &= \rho_f \ddot{u}_i + m \ddot{w}_i + b \dot{w}_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: u_i , w_i ($i=1, 2$) 分别为土骨架的位移及流体相对于土骨架的渗透位移, 位移上方的点表示对时间的导数; λ , μ 为 Lamé 常数; α , M 分别为 Biot 土骨架、水相压缩参数; ρ , ρ_f 分别为饱和土及孔隙水密度; f 为孔隙率; $m = a_\infty \rho_f / f$; a_∞ 为孔隙介质弯曲系数; b 为与孔隙流体的黏度和土体的渗透系数有关的量。

饱和土体及孔隙水的本构方程分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij} &= \lambda e \delta_{ij} + \mu (u_{i,j} + u_{j,i}) - \alpha \delta_{ij} p \\ p &= -\alpha M e + M \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: e , θ 分别为土骨架的体积应变及单位体积孔隙介质中流体体积的增量, $e = u_{i,i}$, $\theta = -w_{i,i}$; σ_{ij} , p 分别为土体总应力分量及孔隙水压; δ_{ij} 是 Kronecker 符号。

在平面问题中, 采用表示土骨架的势函数 Φ_1 和 ψ_1 , 流相的势函数 Φ_2 和 ψ_2 解耦方程, 再进行空间到波数 $x \rightarrow \xi$ 、时间到频率 $t \rightarrow \omega$ 的二维 Fourier 变换, 可求解出变换域内的应力、位移、孔压等通解, 具体求解见文献[9]。 $x \rightarrow \xi$ 和 $t \rightarrow \omega$ 的二维 Fourier 变换对为

$$\left. \begin{aligned} \tilde{f}(\xi, \omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) e^{-i(\xi x + \omega t)} dx dt \\ f(x, t) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(\xi, \omega) e^{i(\xi x + \omega t)} d\xi d\omega \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: 上标 $\sim$ 分别为 $x \rightarrow \xi$ 和 $t \rightarrow \omega$ 的 Fourier 变换

域值。

3 层状土 TRM 法

3.1 层状土地基模型

层状饱和土地基模型如图 1 所示, 假设共有 N 层土覆盖在刚性底层上, 荷载作用在土层顶面并沿 x 轴正向以恒定速度移动。条形移动荷载表达式为

$$F(x, t) = F_z H(|x - ct - L|) \quad (4)$$

根据式 (4) 可得频域、波数域表达式为

$$\tilde{F}(\xi, \omega) = 2F_z \delta(\omega + \xi c) \sin(\xi L) / \xi \quad (5)$$

式中: F_z 为条形分布荷载集度; $2L$ 为分布荷载长; $H(*)$ 为 Heaviside 函数。

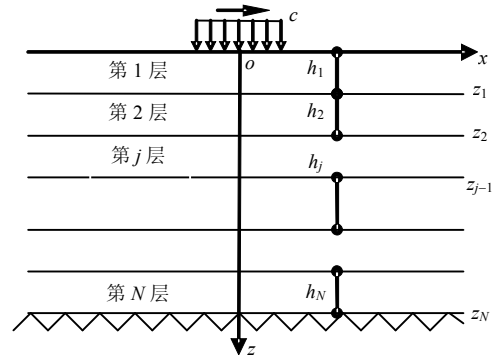


图 1 有下卧刚性层层状饱和土地基受移动荷载示意图
Fig.1 Configuration of layered saturated soil with rigid bedrock subjected to moving surface load

第 j 层层状土的应力、位移、孔压等在频域-波数域内的解可将通解中未知系数 a , c , e , b , d , f 分别替换为 $a^j e^{-\gamma_1^j z_j}$, $c^j e^{-\gamma_2^j z_j}$, $e^j e^{-\gamma_3^j z_j}$, $b^j e^{\gamma_1^j z_{j-1}}$, $d^j e^{\gamma_2^j z_{j-1}}$, $f^j e^{\gamma_3^j z_{j-1}}$; z_j , z_{j-1} 分别为第 j 层层状土上、下表面距顶面的距离, 同时用第 j 层的土体参数代替通解中相应的土体的值而求得。由此可知, N 层有 $6N$ 个未知系数, 采用传递矩阵等方法需求解 $6N$ 个大型线性方程组。对于高频动力问题, 方程组中较多元素不可避免出现极小值或 0 的情况, 导致方程组存在病态问题, 从而影响计算结果的精度。

3.2 移动荷载边值问题

层状饱和土地基覆盖在刚性底层上, 在顶层 $z=0$ 边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xz}^1(x, 0, t) &= 0 \\ \sigma_{zz}^1(x, 0, t) &= -F(x, t) \\ p^1(x, 0, t) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在底层 $z=z_N$ 为不透水刚性层, 边界条件为

$$\left. \begin{aligned} u_x^N(x, z_N, t) &= 0 \\ u_z^N(x, z_N, t) &= 0 \\ \partial p^N(x, z_N, t) / \partial z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

3.3 层状土 TRM 法推导

采用 TRM 矩阵方法, 能使层状土各层 6 个未知系数最终都由顶层 3 个未知系数来表示, 从而避免求解大型线性方程组, 计算结果更准确。其主要推导公式如下。

第 j 层频域-波数内解用矩阵 $\Psi^j(\xi, z, \omega)$ 表示为

$$\left. \begin{aligned} \Psi^j(\xi, z, \omega)_{6 \times 1} &= \begin{bmatrix} i\tilde{u}_x^j & \tilde{u}_z^j & \tilde{w}_z^j & i\tilde{\sigma}_{xz}^j & \tilde{\sigma}_{zz}^j & \tilde{p}^j \end{bmatrix}^T \\ \Psi^j(\xi, z, \omega)_{6 \times 1} &= \begin{bmatrix} D_d^j & D_u^j \\ S_d^j & S_u^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_d^j(z)^T & W_u^j(z)^T \end{bmatrix}^T \\ W_d^j(\xi, z, \omega) &= \begin{bmatrix} b^j e^{-\gamma_1^j(z-z_{j-1})} & d^j e^{-\gamma_2^j(z-z_{j-1})} & f^j e^{-\gamma_3^j(z-z_{j-1})} \end{bmatrix} \\ W_u^j(\xi, z, \omega) &= \begin{bmatrix} a^j e^{\gamma_1^j(z-z_j)} & c^j e^{\gamma_2^j(z-z_j)} & e^j e^{\gamma_3^j(z-z_j)} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $Re(\gamma_i^j) \geq 0$, $i=1, 2, 3$ 。 $D_d^j(\xi, \omega)_{3 \times 3}$, $D_u^j(\xi, \omega)_{3 \times 3}$, $S_d^j(\xi, \omega)_{3 \times 3}$, $S_u^j(\xi, \omega)_{3 \times 3}$ 的表达式为

$$\left. \begin{aligned} D_u^j &= \begin{bmatrix} -\xi & -\xi & i\gamma_3^j \\ \gamma_1^j & \gamma_2^j & -i\xi \\ \gamma_1^j \chi_1^j & \gamma_2^j \chi_2^j & -i\xi \gamma_3^j \end{bmatrix} \\ D_d^j &= \begin{bmatrix} -\xi & -\xi & -i\gamma_3^j \\ \gamma_1^j & -\gamma_2^j & -i\xi \\ -\gamma_1^j \chi_1^j & -\gamma_2^j \chi_2^j & -i\xi \gamma_3^j \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} S_u^j &= \begin{bmatrix} -2\mu^j \xi \gamma_1^j & -2\mu^j \gamma_2^j \xi & i\chi_3^j \\ c_1^j & c_2^j & -2i\mu^j \xi \gamma_3^j \\ a_1^j & a_2^j & 0 \end{bmatrix} \\ S_d^j &= \begin{bmatrix} 2\mu^j \xi \gamma_1^j & 2\mu^j \gamma_2^j \xi & i\chi_3^j \\ c_1^j & c_2^j & 2i\mu^j \xi \gamma_3^j \\ a_1^j & a_2^j & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中:

$$\chi_k^j = (\alpha + \kappa_k^j) M (L_k^j)^2 \quad (11)$$

$$\gamma_k^j = \sqrt{\xi^2 - L_k^{j2}} \quad (k=1, 2) \quad (12)$$

$$c_k^j = 2\mu^j \gamma_1^{j2} - \lambda^j (L_k^j)^2 - \alpha \chi_k^j \quad (k=1, 2) \quad (13)$$

$$\kappa_k^j = \frac{(\lambda^j + \alpha^2 M + 2\mu^j)(L_k^j)^2 - \rho \omega^2}{[\rho_f \omega^2 - \alpha M (L_k^j)^2]} \quad (k=1, 2) \quad (14)$$

$$\chi_3^j = \mu^j [\xi^2 + (\gamma_3^j)^2] \quad (15)$$

$$\kappa_3^j = \rho_f \omega^2 / (ib\omega - m\omega^2) \quad (16)$$

$$(S^j)^2 = (\rho_f \kappa_3^j + \rho) \omega^2 / \mu^j \quad (17)$$

$$\gamma_3^j = \sqrt{\xi^2 - (S^j)^2} \quad (18)$$

$$(L_1^j)^2 = \frac{1}{2} (\beta_1^j - \sqrt{(\beta_1^j)^2 - 4\beta_2^j}) \quad (19)$$

$$(L_2^j)^2 = \frac{1}{2} (\beta_1^j + \sqrt{(\beta_1^j)^2 - 4\beta_2^j}) \quad (20)$$

$$\beta_1^j = \frac{[(m\omega^2 - ib\omega)(\lambda + \alpha^2 M + 2\mu^j) + \rho \omega^2 M - 2\alpha M \rho_f \omega^2]}{[(\lambda^j + 2\mu^j)M]} \quad (21)$$

$$\beta_2^j = \frac{[(m\omega^2 - ib\omega)\rho \omega^2 M - \rho_f^2 \omega^4]}{[(\lambda^j + 2\mu^j)M]} \quad (22)$$

由式 (8) 可知, 第 j 层未知系数可用该层下、上行波矢量 $W_d^j(\xi, z_{j-1}, \omega)$ 、 $W_u^j(\xi, z_j, \omega)$ 表示为

$$\left. \begin{aligned} W_d^j(\xi, z_{j-1}, \omega) &= \begin{bmatrix} b^j(\xi, \omega) & d^j(\xi, \omega) & f^j(\xi, \omega) \end{bmatrix}^T \\ W_u^j(\xi, z_j, \omega) &= \begin{bmatrix} a^j(\xi, \omega) & c^j(\xi, \omega) & e^j(\xi, \omega) \end{bmatrix}^T \\ W_d^j(\xi, z, \omega) &= E^j(\xi, z - z_{j-1}, \omega) W_d^j(\xi, z_{j-1}, \omega) \\ W_u^j(\xi, z, \omega) &= E^j(\xi, z_j - z, \omega) W_u^j(\xi, z_j, \omega) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

其中:

$$E^j(h) = \begin{bmatrix} e^{-\gamma_1^j h} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\gamma_2^j h} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\gamma_3^j h} \end{bmatrix}, \quad (j=1, 2, \dots, N) \quad (24)$$

层状土在变换域的层间连续条件为

$$\Psi^j(\xi, z_j, \omega) = \Psi^{j+1}(\xi, z_j, \omega), \quad (j=1, 2, \dots, N-1) \quad (25)$$

将式 (8) 代入可得

$$\begin{bmatrix} -D_d^{j+1} & D_u^j \\ -S_d^{j+1} & S_u^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_d^{j+1}(z_j) \\ W_u^j(z_j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_d^j & D_u^{j+1} \\ -S_d^j & S_u^{j+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_d^j(z_j) \\ W_u^{j+1}(z_j) \end{bmatrix} \quad (26)$$

对上式进行矩阵逆运算:

$$\begin{bmatrix} W_d^{j+1}(z_j) \\ W_u^j(z_j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_d^j(\xi, \omega) & R_u^j(\xi, \omega) \\ R_d^j(\xi, \omega) & T_u^j(\xi, \omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_d^j(z_j) \\ W_u^{j+1}(z_j) \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中: R_u^j , R_d^j , T_d^j , T_u^j 分别为上行、下行波反射、透射矩阵, 且有:

$$\begin{bmatrix} T_d^j(\xi, \omega) & R_u^j(\xi, \omega) \\ R_d^j(\xi, \omega) & T_u^j(\xi, \omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_d^{j+1} & D_u^j \\ -S_d^{j+1} & S_u^j \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -D_d^j & D_u^{j+1} \\ -S_d^j & S_u^{j+1} \end{bmatrix} \quad (28)$$

当 $j = N$ 时, 由底层边界条件式 (7) 在空间-时间变换域有:

$$\begin{cases} D_u^N W_u^N(z_N) + D_d^N W_d^N(z_N) = 0 \\ W_u^N(z_N) = R_d^N W_d^N(z_N) \end{cases} \quad (29)$$

式中: $R_d^N = -(D_u^N)^{-1} D_d^N$ 。

当 $j = N-1$ 时, 由式 (27) 可得

$$\begin{cases} W_d^N(\xi, z_{N-1}, \omega) = T_d^{N-1} W_d^{N-1}(z_{N-1}) + R_u^{N-1} W_u^N(z_{N-1}) \\ W_u^{N-1}(\xi, z_{N-1}, \omega) = R_d^{N-1} W_d^{N-1}(z_{N-1}) + T_u^{N-1} W_u^N(z_{N-1}) \end{cases} \quad (30)$$

将式 (29) 代入式 (30) 可得

$$\begin{cases} W_d^N(\xi, z_{N-1}, \omega) = T_d^{N-1} W_d^{N-1}(z_{N-1}) \\ W_u^{N-1}(\xi, z_{N-1}, \omega) = R_d^{N-1} W_d^{N-1}(z_{N-1}) \\ T_d^{N-1} = (I - R_u^N R_d^N E^N(z_N))^{-1} T_d^{N-1} \\ R_d^{N-1} = R_d^{N-1} + T_u^{N-1} E^{N-1}(z_{N-1}) R_d^N T_d^{N-1} \end{cases} \quad (31)$$

式中: I 为 3×3 单位矩阵。

从式 (31) 中可以看出: 每层下行波矢量可用上层的波矢量表示, 而上行波矢量可用该层的下行波矢量表示, 由此类推。每层波矢量都用第一层下行波矢量表示为

$$\begin{cases} W_d^j(\xi, z_{j-1}, \omega) = T_{de}^{j-1} T_{de}^{j-2} \dots T_{de}^2 T_d^1 W_d^1(\xi, z_1, \omega) \\ W_u^j(\xi, z_j, \omega) = R_d^j W_d^j(\xi, z_j, \omega) \\ R_d^j = R_d^j + T_{ue}^j R_{de}^{j+1} T_d^j \\ T_{de}^j = (I - R_{ue}^j R_{de}^{j+1})^{-1} T_{de}^j \end{cases} \quad (32)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} T_{de}^j & R_{ue}^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_d^j & R_u^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E^j(z_j) & 0 \\ 0 & E^{j+1}(z_{j+1}) \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\begin{bmatrix} T_{de}^{gj} & R_{ue}^{gj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_d^{gj} & R_u^{gj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E^j(z_j) & 0 \\ 0 & E^{j+1}(z_{j+1}) \end{bmatrix}, \quad (j=2, 3, \dots, N-1) \quad (34)$$

由边界条件式 (6) 及式 (32) 可得第一层下、上行波矢量为

$$\begin{cases} W_d^1(\xi, z_0, \omega) = S(\xi, \omega) \tilde{\tilde{Q}}(\xi, \omega) \\ W_u^1(\xi, z_1, \omega) = R(\xi, \omega) \tilde{\tilde{Q}}(\xi, \omega) \end{cases} \quad (35)$$

式中: $S(\xi, \omega) = [S_d^1 + S_u^1 E^1(z_1) R_{de}^{g1}]^{-1}$, $R(\xi, \omega) = R_{de}^{g1} S(\xi, \omega)$, $\tilde{\tilde{Q}}(\xi, \omega) = [0 \quad -\tilde{F}(\xi, \omega) \quad 0]^T$ 。

由式 (35) 求解出第一层波矢量后, 再由式 (32) 可求解出其他各层波矢量, 最后由式 (8) 即可得到频率-波数域内各层土的位移、应力、孔压表达式。根据上述推导, 不失一般性, 设用 $\tilde{\tilde{Q}}$ 表示所有频率波数域内的变量, 则有:

$$\tilde{\tilde{Q}}(\xi, z, \omega) = \tilde{\tilde{Q}}^*(\xi, z, \omega) F_z \delta(\omega + \xi c) \sin(\xi L) / \xi \quad (36)$$

3.4 时间-空间域内的解及算例

对式 (36) 进行双重 Fourier 逆变换可得到时间-空间域内的解。考虑到 Dirac- δ 函数的性质, 双重 Fourier 逆变换可简化为

$$\Omega(x, z, t) = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^2 F_z \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{\tilde{Q}}(\xi, z, -\xi c) \sin(\xi L) / \xi e^{i\xi(x-ct)} d\xi \quad (37)$$

由于被积函数表达式较为复杂, 因此, 很难得出 Fourier 逆变换的封闭形式解, 本文采用 FFT 方法完成该 Fourier 逆变换。此外, 由于饱和土体内孔隙流体与固体骨架之间存在内摩擦力, 所以水平波数 ξ 的积分路径上也不会出现分支点和奇点。波数 ξ 的离散点数为^[6] $N = 4\,096$, 空间间隔为 $\Delta x = 0.1$, 空间计算区间为 $Lx = N\Delta x$ 。

4 算例分析

4.1 算例 1

层状土的各层土参数值相同时, 则层状土退化为均质土。考察有下卧刚性层的退化为均质饱和土受移动荷载的动力响应, 土体参数如下: $h = 18.0$ m, $f = 0.4$, $a_\infty = 3.0$, $M = 2.4 \times 10^9$ N/m², $\alpha = 1.0$, $b = 1.0 \times 10^7$ kg·m⁻³·s, $\mu = 0.77 \times 10^8$ Pa。在饱和土上表面作用沿 x 轴正方向以某一恒定速度 c 移动条形线荷载, 荷载集度 $F_z = 1.0 \times 10^5$ N/m¹, $L = 2.0$ m, 移动荷载速度 c 分别为 20.0, 100.0 m/s。图 2 为观察点 A (160.0 m, 0.0 m) 处土体垂直位移随时间 t 变化; 图 3 为观察点 B (160.0 m, 2.0 m) 处土体孔隙水压力随时间 t 变化。文献[6]中给出了相同条件下的计算结果。

从图 2、图 3 中可以看出, 本文计算结果与文献[6]结果基本吻合。

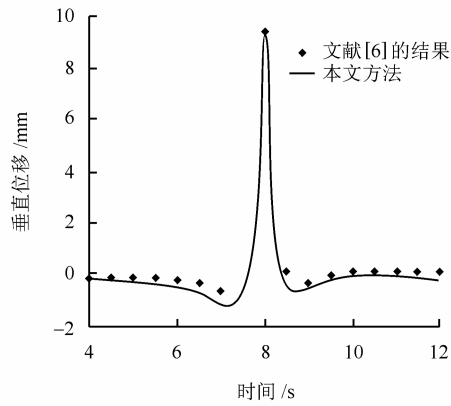
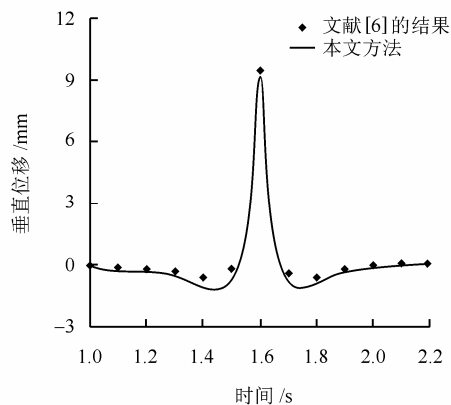
(a) 荷载速度 $c = 20.0$ m/s(b) 荷载速度 $c = 100.0$ m/s

图2 点A垂直位移随时间变化与文献[6]比较

Fig.2 In comparison with the vertical displacements at point A and results of reference [6]

4.2 算例2

地基为3层层状饱和土模型,第3层下卧有刚性层,3层土厚分别为: $h_1 = h_2 = 2.0$ m, $h_3 = 14.0$ m, 各层土剪切模量的取值分3种情况: (1) $\mu_1 : \mu_2 : \mu_3 = 1:1:1$; (2) $\mu_1 : \mu_2 : \mu_3 = 5:1:5$; (3) $\mu_1 : \mu_2 : \mu_3 = 1:5:1$, 其中 $\mu_3 = 10 \times 10^8$ Pa, 荷载以不同的速度在土体表面沿 x 轴正向移动, 其他计算参数值同算例1。定义土体对荷载移动速度 c 响应的放大系数 β 为土体最大垂直位移 u_z 与荷载作用在均质土且 $c=0$ 时的最大垂直位移的比值, 图4为移动荷载作用下3种情况的层状土在观测点A(0.0 m, 0.0 m)处的放大系数 β 对荷载移动速度 c 的变化。当荷载速度 c 达到瑞利波速 c_R 时, 位移响应最大。从图中可以看出: 3种情况的层状土, 瑞利波速 c_R 不同, 分别为 $0.94c_s$, $0.85c_s$, $1.05c_s$; 荷载速度 c 达到瑞利波速 c_R 时放大系数 β 分别为 2.47, 2.3, 1.85 倍; 在 $c = 0.5c_s \sim c_R$ 时, 含软弱夹层的层状土放大系数 β 比含有较硬层的 β 增加得更快。

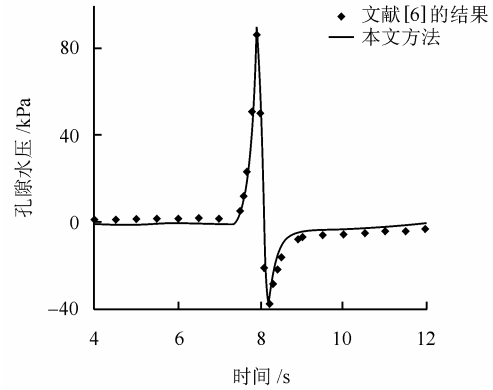
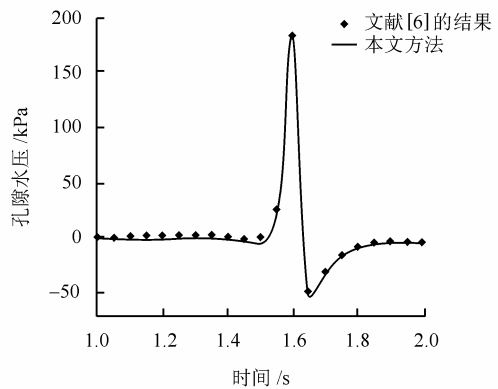
(a) 荷载速度 $c = 20.0$ m/s(b) 荷载速度 $c = 100.0$ m/s

图3 点B孔压随时间变化与文献[6]比较

Fig.3 In comparison with the pore pressure at point B and results of reference [6]

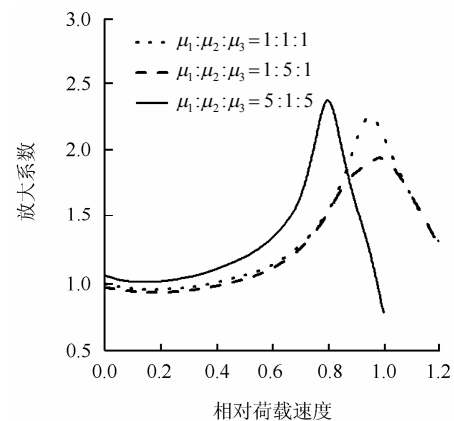


图4 层状土对移动荷载速度的最大垂直位移动力响应

Fig.4 Maximum vertical displacements for layered soil varied with velocity c

图5为观测点A(0.0 m, 0.0 m)处土体垂直位移随时间 t 变化。图6为点B(0.0 m, 2.0 m)处土体超静孔隙水压力随时间 t 变化。图中位移及孔压的无量纲化 $u^* = \mu_3 u_z / F_z$, $p^* = p z_B / F_z$, $c_s = \sqrt{\mu_3 / \rho_s}$ 。

从图中可以看出: 含软弱夹层的层状土的位移、

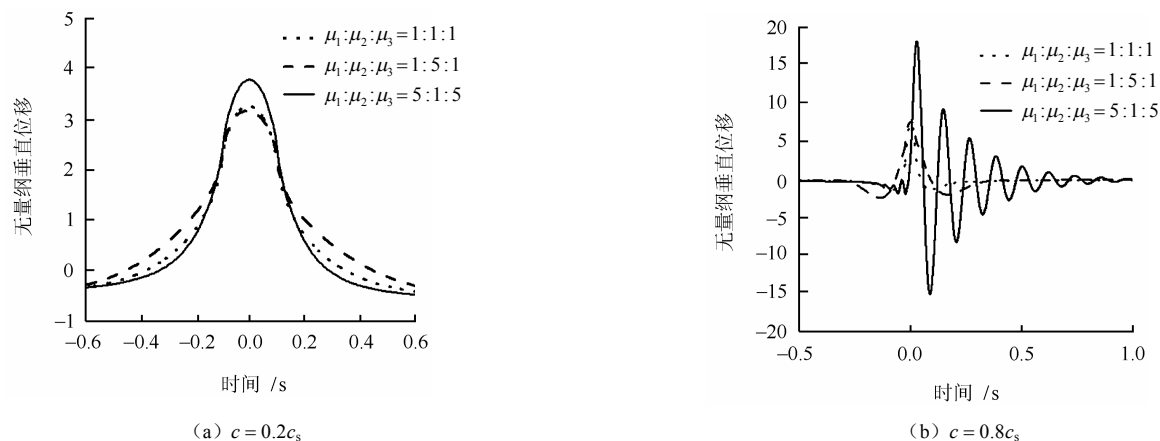


图 5 观测点 $A(0.0 \text{ m}, 0.0 \text{ m})$ 处土体垂直位移随时间 t 变化
Fig.5 Vertical displacements for the three-layer soil via time at the received point $A(0.0 \text{ m}, 1.0 \text{ m})$

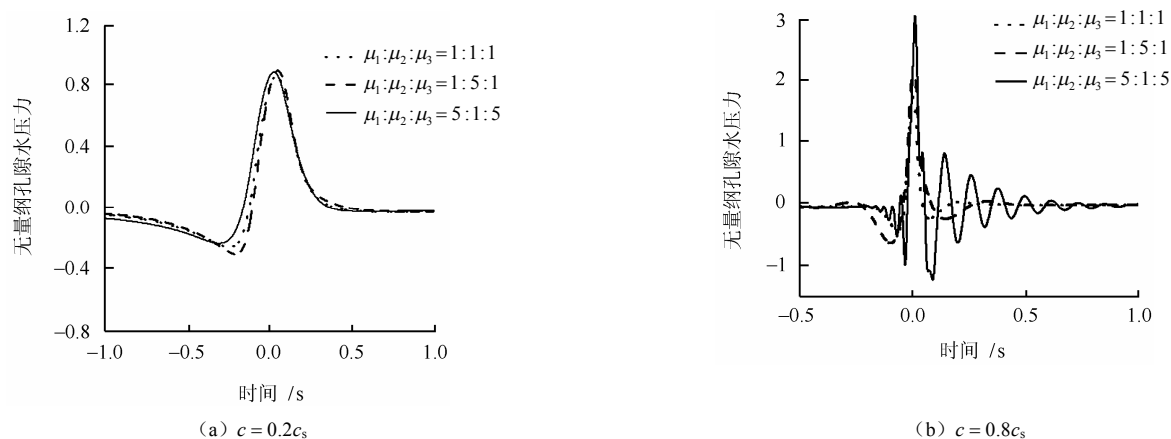


图 6 点 $B(0.0 \text{ m}, 2.0 \text{ m})$ 处土体超静孔隙水压力随时间 t 变化
Fig.6 Pore pressures for the three-layer soil via time at the received point $B(0.0 \text{ m}, 2.0 \text{ m})$

孔压比含有较硬层的大, 在 $c = 0.2c_s$ 时, 3 种层状土体孔压响应几乎相同, 含软弱夹层的层状土的位移比含有较硬层的大, 而在 $c = 0.8c_s$ 时, 含软弱夹层土体的位移、孔压都高, 且有明显的波动性。

5 结 论

利用 Biot 理论, 采用 TRM 方法研究了移动荷载作用下饱和层状土动力响应问题, 给出了工程中较为关心的移动荷载引起的土体表面的位移及土体内部孔压随层状性改变的动力响应情况。从计算结果中可以得出如下结论:

(1) 与文献[6]的结果相比较, 验证了本文算法的正确性。利用文中方法可考察土骨架颗粒的压缩性影响对移动荷载作用下土体动力响应的影响。

(2) 当层状土体含有软弱夹层时, 土体表面垂直位移增大, 孔隙水压力会升高, 并随移动荷载速度增加, 该现象越显著且伴随有明显波动性。

(3) 含有较硬层时, 动力响应刚好与有软弱夹

层时相反。

参 考 文 献

- [1] EASON G. Stresses produced in a semi-infinite solid by a moving surface force[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1965, 2: 581—609.
- [2] HUNG H H, YANG Y B. Elastic waves in visco-elastic half-space generated by various vehicle loads[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21(1): 1—17.
- [3] 谢伟平, 王国波. 移动荷载作用下基于薄层单元法的土动力分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2004, (2): 8—11.
XIE Wei-ping, WANG Guo-bo. Dynamic analysis of soil induced by moving load based on thin-layered element method[J]. *Urban Science Edition of HUST*, 2004, (2): 8—11.
- [4] JIN B, YUE Z Q, THAM L G. Stresses and excess pore pressure induced in saturated poroelastic halfspace by moving line load[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24: 25—33.

- [5] SIDDHARTHAN R, ZAFIR Z, NORRIS G M. Moving load response of layered soil[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, 1993, 119(10): 2 052—2 071.
- [6] THEODORAKOPOULOS D D, CHASSIAKOS A P, BESKOS D E. Dynamic effects of moving load on a poroelastic soil medium by an approximate method[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2004, 41: 1 801—1 822.
- [7] 刘干斌, 汪鹏程, 陈运平, 等. 运动荷载附近有限层厚软土地基的振动研究[J]. **岩土力学**, 2006, 27(9): 1 670—1 712.
LIU Gan-bin, WANG Peng-cheng, CHEN Yun-ping, et al. Ground vibration of a finite layer of soft foundation in the vicinity of a moving load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1 670—1 712.
- [8] 郭大智. 层状弹性体系力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.
- [9] SENJUNTICHAJ T, RAJAPAKSE R K N D. Exat stiffnedd method for quasi-statics of a multi-layered poroelastic medium[J]. **Solids and Structures**, 1995, 32: 1 535—1 553.
- [10] LUCO J E, APSEL R J. On the Green's functions for a layered half-space: Part I [J]. **Bulletin Seismetic Social America**, 1983, 73: 909—929.
- [11] APSEL R J, LUCO J E. On the Green's functions for a layered half-space: Part II [J]. **Bulletin Seismetic Social America**, 1983, 73: 931—951.
- [12] LU J F, HANYGA A. Fundamental solution for a layered porous half space subject to a vertical point force or a point fluid source[J]. **Computational Mechanics**, 2005, 35(5): 376—391.
- [13] BIOT M A. Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media[J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1962, 34: 1 254—1 264.

中国科学院武汉岩土力学研究所喜迎建所 50 周年

金秋十月, 丹桂馥郁。中国科学院武汉岩土力学研究所迎来建所 50 周年华诞, 全国人大常委会副委员长、中科院院长路甬祥为建所 50 周年题辞: “创新岩土科学技术, 服务国家建设工程”。

2008 年 10 月 23 日上午, 中国科学院武汉岩土力学研究所召开了建所 50 周年庆祝大会暨岩土力学与工程发展战略研讨会, 隆重纪念建所 50 周年。国家科技部基础司、中国科技大学、清华大学、香港大学等近 50 家高等院校和科研单位发来了贺电贺信, 赠送了贺礼。葛修润院士从加拿大发来了贺信。庆典仪式由中国科学院武汉岩土所党委书记兼副所长汪大国主持, 朱耀仲所长致辞并回顾了武汉岩土所 50 年的发展历程, 指出: 武汉岩土所半个世纪以来没有仅仅埋首在科学研究中, 时刻不忘科技报国、创新为民, 为国家 and 人民服务。不论在岩石力学科学研究方面, 还是在发展国家经济方面, 岩土所都取得了举世瞩目的成绩。

朱耀仲所长指出: 50 年的改革发展, 武汉岩土所不仅形成了较为完整的科研组织架构, 建成岩土力学与工程国家重点实验室等多个创新主体; 同时也建成中国岩土工程研究中心、武汉中科智创岩土技术有限公司等新技术研发及应用单元, 建立了岩土工程模型试验系统多个综合科研平台, 使武汉岩土所成为在国内外有较大影响的综合性研究机构。

朱耀仲所长还指出: 50 年来, 武汉岩土所参与了众多国家重大工程建设项目, 解决了一系列关键的技术难题。在南水北调、西电东送、西气东输和青藏铁路四大国家标志性工程和多个重大工程中共承担各类科研项目 500 余项, 获得省部级三等以上成果奖 147 项, 授权专利 105 项, 专著与译著 42 部, 计算机软件著作权登记权 47 项。特别是近 5 年来, 在中科院知识创新工程的牵引下, 武汉岩土所进入了创新跨越、持续发展的阶段。作为依托单位, 承担国家 973 项目 2 项, 主持或参加国家自然科学基金重点项目 8 项; 获得国家科技进步二等奖 3 项, 省部级特等奖 1 项, 省部级一等奖 5 项, 省部级二等奖 8 项。50 年来, 通过持续的科学积累, 在计算岩石力学、智能岩石力学、施工过程力学、特殊土土力学、岩石动力学、岩石流变力学、地下工程与地下空间、边坡工程与滑坡防治、地基工程、能源地下储存与废弃物处置等方面特色鲜明, 并形成了一定的优势。自主研发了一系列岩土力学专业设备, 为岩土力学与工程学科发展和国家重大工程建设作出了应有的贡献。在人才队伍中, 涌现出以陈宗基、葛修润院士为代表的杰出人物, 形成了以优秀中青年专家为骨干的科研人才队伍。本所科技人员提交的“三峡库区国家重点保护文物白鹤梁水下保护”、“国家石油战略储备”、“核废料地质处置”、“CO₂ 地中隔离计划”等建议, 得到党和国家领导人的批示, 国家思想库的作用日益显现, 为研究所的发展积淀了厚实的基础。

党委书记汪大国宣读授予“中科院武汉岩土力学所创业者”荣誉称号的名单, 为 18 名武汉岩土所的建所“开国将帅”颁发了荣誉证书。随后, 职工代表、研究生代表以及离退休职工代表先后发言, 表达出对武汉岩土所的深厚感情。

中国岩石力学学会理事长钱七虎院士代表中国岩石力学学会, 香港大学副校长李焯芬院士代表来宾讲话, 对武汉岩土所建所 50 周年表示祝贺。

中国科学院武汉分院罗志强副院长代表武汉分院讲话, 罗志强副院长首先对武汉岩土所建所 50 周年表示衷心的祝贺, 同时也充分肯定了武汉岩土所 50 年来取得的成绩, 希望研究所在未来有更辉煌的成就。

王思敬、钱七虎、郑颖人、李焯芬四名院士以及国内外岩石力学与工程学科领域的著名科学家和学者, 武汉分院地区各兄弟单位的领导、来宾及全所职工 300 余人共同出席了庆祝大会。庆典大会结束后, 作为建所 50 周年庆典活动重要内容, 举办了岩土力学与工程发展战略研讨会, 与会的专家学者齐聚一堂共同就我国岩土力学学科发展及战略研究进行了研讨。