

层状地基中埋置管道动力阻抗函数的分析方法

张海廷¹, 杨林青², 郭芳³

(1. 河南水利与环境职业学院, 河南 郑州 450008;

2. 广东技术师范学院 天河学院, 广东 广州 510540; 3. 河南农业职业学院, 河南 中牟 451450)

摘 要: 目前地下管道已经广泛地被用于能源、市政和水利工程等领域中。寻求一种求解层状地基内埋置管道动力阻抗函数算法对管道-地基动力相互作用问题具有重要的意义和实用价值。针对横观各向同性层状地基, 利用容积法, 结合方程转换和精细积分算法, 计算并分析层状地基中埋置管道的动力阻抗函数。通过与已有算法的对比算例验证了本体提出算法的准确性, 并分析了层状地基的横观各向同性属性对地基中埋管动力阻抗函数的影响。分析表明, 水平和竖直向杨氏模型的比值对地基中埋置管道的动力阻抗函数有着重要的影响, 在实际工程中应予以考虑。

关键词: 层状地基; 埋置管道; 精细积分算法; 容积法; 动力阻抗函数

中图分类号: TU81

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)05-0105-06

Analysis Method of Dynamic Impedence Function of Buried Pipe in Multi-layered Soil

ZHANG Haiting¹, YANG Linqing², GUO Fang³

(1. He'nan Vocational College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou, He'nan 450008, China;

2. Tianhe College of Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou, Guangdong 510540, China;

3. He'nan Vocational College of Agriculture, Zhongmou, He'nan 451450, China)

Abstract: Underground pipelines have been widely used in energy, municipal and hydraulic engineering projects. It is of great significance and practical value to find an algorithm to solve dynamic impedance function of buried pipeline in multi-layered foundation. In this paper, the flexible volume method is introduced to solve and analyze the dynamic impedance function of buried pipe in multi-layered soil by combining with equation transform and precise integration method. Numerical example is used to verify the accuracy of this proposed algorithm. Meanwhile an extensive parametric analysis is carried out to analyze the influence of the transverse isotropic properties on the dynamic impedance function of buried pipes in the soil. Analysis shows that the ratio between Yang's modulus in horizontal and vertical direction has significant effects on the dynamic impedance function for the buried pipe, which can't be ignored or simplified in actual engineering.

Keywords: multi-layered soil; buried pipe; precise integration method; flexible volume method; dynamic impedance function

地下管道已经广泛地被用于能源、市政和水利工程等领域中,且国际上称地下管道工程为生命线工程^[1]。目前求解地基中埋管的动力阻抗函数的主要方法为数值法和解析法相结合。数值法包括经典有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)、边界法(BEM)等^[2-3];解析法通常采用波函数求解地基中埋管的

动力阻抗函数。Pao等^[4]利用数值法求解了半无限空间中洞室在入射波作用下的响应问题。Lee等^[5]随后计算了半无限空间中有洞室存在的情况下SH波的散射问题。在弹性半空间的研究领域,蒋通等^[6]利用解析法求解埋管的地基轴向刚度函数,然后蒋通等^[7]对薄层法的原理与应用进行了详细的描

收稿日期:2018-06-10

修稿日期:2018-07-20

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51508203);广东省水利科技创新项目(2015-17)

作者简介:张海廷(1976—),男,河南郑州人,讲师,主要从事工程结构抗震及耐久性等方面的工作。E-mail:haitingzh1976@163.com。

通讯作者:杨林青(1986—),女,广东广州人,讲师,主要从事层状地基动力响应求解等方面的工作。E-mail:ylq0313@126.com

述,并用薄层法对弹性层状地基中条形基础及各种基础的阻抗函数进行了分析^[8]。由于薄层法具有一定的局限性,对于层状地基的动力分析计算,韩泽军等^[9-11]针对复杂层状地基进行深入研究,利用精细积分算法提出了更加精确的算法,随后王朋等^[12]利用此算法求解得到了层状地基内桩基础的动力阻抗函数。

目前对于地基的研究,多是将地基各向同性层状属性,而实际工程中的地基都有着不同程度的各向异性属性,本文就针对层状地基横观各向同性这一属性进行理论分析,利用方程变换和精细积分算法得到地基表面和内部任意点的位移响应,然后与容积算法相结合得到地基中埋置管道的动力阻抗函数。与文献结果对比的数值算例验证了本文算法的准确性,本文同时分析了层状地基的横观各向同性属性对地基中埋管动力阻抗函数的影响,将为今后的实际工程提供理论支持。

1 横观各向同性层状地基波动方程

本文针对层状地基中埋置管道的动力阻抗函数进行研究,如图 1 所示。管道埋置在横观各向同性层状地基中,埋置深度为 D ,表示埋置管道中心参考点距离地表的距离。第 i 层($i = 1, 2, \dots, l$)地基的弹性参数见图 1 所示($E_h^i, E_v^i, v_{hh}^i, v_{vh}^i$ 和 G_{vh}^i 分别表示第 i 层地基的水平向和竖直向杨氏模量、水平面和竖直面的泊松比以及竖直面剪切模量, $E_h^\infty, E_v^\infty, v_{hh}^\infty, v_{vh}^\infty$ 和 G_{vh}^∞ 分别为半无限地基层的水平向和竖直向杨氏模量、水平面和竖直面的泊松比以及竖直面剪切模量)。将埋管 - 地基体系分解为埋管和地基两个单独部分,先求解没有埋置管道的地基内节点的位移响应,然后在埋管位置进行开挖,利用容积算法进行求解。在市政工程和土木工程等建筑结构中,埋置在地基底下的管道或隧道通常都是非常长的,隧道甚至可以长达几公里,即地下埋置管道的长度远大于它的宽度。因此对于地下埋置管道或隧道的动力响应分析,可以将其简化为沿横向切面的广义平面应变问题进行处理,而对于轴向的变形可以忽略不计。将直角坐标系的坐标原点设置在层状横观各向同性地基的表面($z = z_0 = 0$)处,并假设水平向为 x 轴,竖直向下为 z 轴正向,如图所示。假设地基有 l 层层状地基,每一层为均质属性,可以是各向同性,也可为横观各向同性, $h_m = z_m - z_{m-1}$ ($m = 1, 2, \dots, l - 1, l$) 表示第 m 层的厚度。

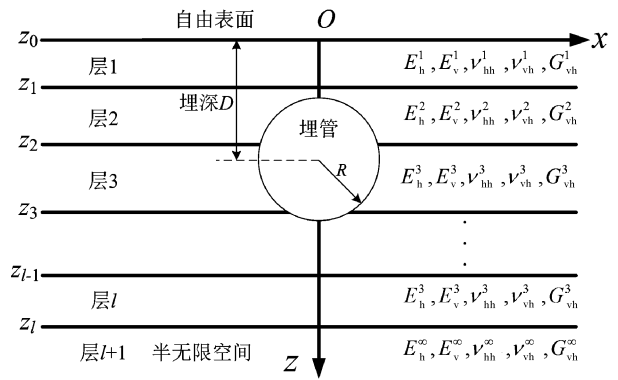


图 1 层状横观各向同性地基中埋置管道

层状横观各向同性地基广义平面波动问题波动方程中应力和位移只是 x, z 的函数,其频率 - 空间域内广义平面波动问题的动力控制方程为:

$$\begin{aligned} R_{55} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + (R_{13} + R_{55}) \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x \partial z} + R_{11} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \rho \omega^2 \bar{u} &= 0 \\ R_{55} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + (R_{55} + R_{13}) \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z \partial x} + R_{33} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} + \rho \omega^2 \bar{w} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

弹性矩阵系数与弹性参数的关系为:

$$\begin{aligned} R_{11} &= (E_h/v)(1 - nv_{vh}^2), R_{12} = (E_h/v)(nv_{vh}^2 - v) \\ R_{13} &= (E_h/v)v_{vh}(1 + v_{hh}) \\ R_{33} &= (E_h/v)(1 - v_{hh}^2), R_{55} = G_{vh} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $n = E_h/E_v, v = (1 + v_{hh})(1 - v_{hh} - 2nv_{vh}^2), G_{vh}$ 可由试验测得或由下式经验公式给出^[13]:

$$G_{vh} = \frac{R_{11}R_{33} - R_{13}^2}{R_{11} + 2R_{13} + R_{33}} \quad (3)$$

利用傅里叶积分变换,可定义频率 - 空间域和频率 - 波数域之间的关系转换式为:

$$\begin{aligned} f(k, z, \omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, z, \omega) e^{-ikx} dx \\ f(x, z, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(k, z, \omega) e^{ikx} dk \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ω 表示的是角频率, k 表示沿 x 方向上的波数; $f(x, z, \omega)$ 和 $f(k, z, \omega)$ 表示位移或应力函数,前者是空间域内的,后者是波数域内的。

由方程(1)可以看出,波动方程解耦为 $x - z$ 平面内的 P - SV 波(第(1)式和第(3)式)和 $x - z$ 平面外的 SH 波(第(2)式),本文只针对关于平面内的 P - SV 波的问题进行分析。因此,将方程(1)中的(1)式和(3)式合并后,利用公式(4)所示的傅里叶积分变换的第(1)式可以得到层状横观各向同性地基频率 - 波数域内的波动方程为:

$$\mathbf{K}_{22}\mathbf{q}'' + (\mathbf{K}_{21} - \mathbf{K}_{12})\mathbf{q}' - (\mathbf{K}_{11} - \rho\omega^2\mathbf{I})\mathbf{q} = 0 \quad (5)$$

其中, $\mathbf{I}$ 为 2×2 的单位矩阵;且

$$\mathbf{q} = \begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix}, \mathbf{K}_{11} = k^2 \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ 0 & R_{55} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_{21} = -\mathbf{K}_{12}^T = ik \begin{bmatrix} 0 & R_{55} \\ R_{13} & 0 \end{bmatrix}$$

引入一个位移变量 $\mathbf{q}$ 的对偶应力向量 $\mathbf{p} = -[\tau_{zx} \quad \sigma_z]^T$, 其与广义平面波动问题中的层状横观各向同性地基问题的位移向量 $\mathbf{q}$ 满足以下关系:

$$\mathbf{p} = -(\mathbf{K}_{22}\mathbf{q}' + \mathbf{K}_{21}\mathbf{q}) \quad (7)$$

利用位移向量 $\mathbf{q}$ 和引入的对偶应力向量 $\mathbf{p}$ 可以将层状横观各向同性地基频率 - 波数域内的波动方程(5) 转换为以下形式的状态方程:

$$\Phi' = \mathbf{H}\Phi \quad (8)$$

其中 $\Phi = [\mathbf{q} \quad \mathbf{p}]^T$, 且

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{A} = -\mathbf{K}_{22}^{-1}\mathbf{K}_{21}, \mathbf{B} = -\mathbf{K}_{22}^{-1}$$

$$\mathbf{C} = -\mathbf{K}_{11} + \mathbf{K}_{12}\mathbf{K}_{22}^{-1}\mathbf{K}_{21} + \rho\omega^2\mathbf{I}, \mathbf{D} = \mathbf{K}_{12}\mathbf{K}_{22}^{-1}$$

层状地基自由表面需要满足边界条件:

$$\mathbf{p}_0(z=0) = 0 \quad (10)$$

另外, 层与层之间的交界处还应满足连续条件:

$$\mathbf{q}_a^+ = \mathbf{q}_a^-, \mathbf{p}_a^+ = \mathbf{p}_a^- (a = 1, 2, \dots, l-1, l) \quad (11)$$

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \mathbf{p}_k \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11}^1 & \mathbf{K}_{12}^1 & & & \\ \mathbf{K}_{21}^1 & \mathbf{K}_{22}^1 + \mathbf{K}_{11}^2 & \mathbf{K}_{12}^2 & & \\ & \mathbf{K}_{21}^2 & \mathbf{K}_{22}^2 + \mathbf{K}_{11}^3 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & \mathbf{K}_{11}^n & \mathbf{K}_{12}^n \\ & & & & & \mathbf{K}_{21}^n & \mathbf{K}_{22}^n + \mathbf{K}_{\infty} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_k \\ \vdots \\ u_{n-1} \\ u_n \end{Bmatrix} \text{ 或 } \mathbf{P} = \mathbf{KU} \quad (14)$$

上式中 $\mathbf{K}$ 为频率 - 波数域内的刚度矩阵; $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{U}$ 分别为层面处施加的荷载向量和位移向量。对矩阵 $\mathbf{K}$ 求逆可得任意点的位移解为:

$$\mathbf{U}(\kappa, z_i, \omega) = \mathbf{F}_{ik}\mathbf{P}(\kappa, z_k, \omega) \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

式中 $\mathbf{F} = \mathbf{K}^{-1}$, 动力柔度矩阵中的每一项 $\mathbf{F}_{ik}$ 表示 z_i 平面上单位均布荷载作用下上的位移响应。

公式(15) 可以写成以下形式:

$$\begin{Bmatrix} u(\kappa, z_i, \omega) \\ w(\kappa, z_i, \omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{xx} & F_{xz} \\ F_{zx} & F_{zz} \end{bmatrix}_{ik} \begin{Bmatrix} p_x(\kappa, z_k, \omega) \\ p_z(\kappa, z_k, \omega) \end{Bmatrix} \quad (16)$$

式中 $u(k, z, \omega)$ 和 $p_x(k, z, \omega)$ 为点在频率 - 波数域

式中: + 和 - 分别表示相邻两地基层交界处的上、下平面。

多层地基底部仍假定为半无限地基, l 层底部的边界条件为:

$$\mathbf{p}_l = \mathbf{K}_{\infty}\mathbf{q}_l \quad (12)$$

式中: $\mathbf{K}_{\infty}$ 为半无限地基表面的动力刚度矩阵。

对于层状地基中的波动问题, 本文采用精细积分算法进行求解, 不仅可以有效地避免指数溢出的问题, 并且具有较高的精度, 具体求解过程可参见文献[14]。

2 层状地基内部任意点的位移响应

为了求解层状横观各向同性地基内部任意点的位移响应, 必须先得到层状地基内部体系的动力柔度矩阵。对于多层体系, 假设在 z_k 层面施加半宽为 Δb 幅值为 $\mathbf{p}_k$ 的均布线荷载, 求解任意层面 ($z_k (k = 0, 1, 2, \dots, n)$) 上节点的位移响应, 如图 1 所示。利用精细积分算法求解公式(8), 可以得出在任意线性保守体系内, 层状地基上下面位移和应力向量的关系并将其转化成以下统一形式:

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{p}_a \\ -\mathbf{p}_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{aa} & \mathbf{K}_{ab} \\ \mathbf{K}_{ba} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_a \\ \mathbf{q}_b \end{Bmatrix} \quad (13)$$

利用公式(12) 和公式(13) 组装得到所有层面的应力 - 位移方程:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_k \\ \vdots \\ u_{n-1} \\ u_n \end{Bmatrix} \text{ 或 } \mathbf{P} = \mathbf{KU} \quad (14)$$

内的 x 向位移和荷载; $w(k, z, \omega)$ 和 $p_z(k, z, \omega)$ 为竖直 z 向位移和荷载。

对于公式(16), 利用傅里叶积分变换(公式(4))的第二式进行逆变换后可得地基内任意点位移和施加荷载点荷载的关系式为:

$$\begin{Bmatrix} \tilde{u}(x, z, \omega) \\ \tilde{w}(x, z, \omega) \end{Bmatrix} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \begin{bmatrix} F_{xx} & F_{xz} \\ F_{zx} & F_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_x(k, z, \omega) \\ p_z(k, z, \omega) \end{Bmatrix} e^{ikx} dk \quad (17)$$

(1) 作用在水平 x 向的荷载。在区间 $-\Delta b/2 < x < \Delta b/2$ 内作用有合力等于 1 的水平 x 向均布谐和力时, 频率 - 空间域内的应力强度为 $\tilde{p}_x = 1/\Delta b$, 如

图 2 所示。利用傅里叶积分变换(公式(4)) 的一式可得频率 - 波数域内的均布荷载 $p_x(k, z, \omega)$ 为:

$$p_x(k, z, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{p}_x(x, z, \omega) e^{-ikx} dx = \int_{-\Delta b/2}^{\Delta b/2} \frac{1}{\Delta b} e^{-ikx} dx = \frac{2}{\Delta b k} \sin \frac{\Delta b k}{2} \quad (18)$$

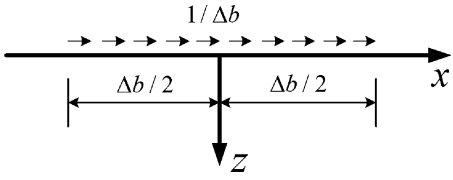


图 2 水平 x 向某个区间内作用有均布谐和力

对于水平 x 向均布荷载,利用公式(17) 可得节点 (x, z) 处的位移响应为:

$$\begin{aligned} \tilde{q}_{x_x}^x(x, z, \omega) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} F_{xx} \left(\frac{2}{\Delta b k} \sin \frac{\Delta b k}{2} \right) \cos(kx) dk \\ \tilde{q}_{z_x}^x(x, z, \omega) &= \frac{i}{\pi} \int_0^{+\infty} F_{zx} \left(\frac{2}{\Delta b k} \sin \frac{\Delta b k}{2} \right) \sin(kx) dk \end{aligned} \quad (19)$$

(2) 作用在竖直 z 向的荷载。在区间 $-\Delta b/2 < x < \Delta b/2$ 内作用有合力等于 1 的竖直 z 向均布谐和力时,频率 - 空间域内的应力强度为 $\tilde{p}_z = 1/\Delta b$,如图 3 所示。利用傅里叶积分变换(公式(4)) 的一式可得频率 - 波数域内的均布荷载 $p_z(k, z, \omega)$ 为:

$$p_z(k, z, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{p}_z(x, z, \omega) e^{-ikx} dx = \int_{-\Delta b/2}^{\Delta b/2} \frac{1}{\Delta b} e^{-ikx} dx = \frac{2}{\Delta b k} \sin \frac{\Delta b k}{2} \quad (20)$$

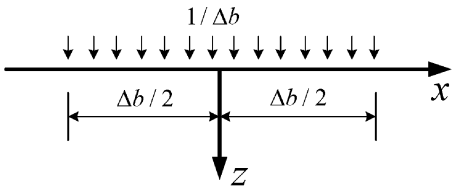


图 3 竖直 z 向某个区间内作用有均布谐和力

对于竖直 z 向均布荷载,利用公式(17) 可得节点 (x, z) 处的位移响应为:

$$\begin{aligned} \tilde{q}_{x_z}^x(x, z, \omega) &= \frac{i}{\pi} \int_0^{+\infty} F_{xz} \left(\frac{2}{\Delta b k} \sin \frac{\Delta b k}{2} \right) \sin(kx) dk \\ \tilde{q}_{z_z}^x(x, z, \omega) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} F_{zz} \left(\frac{2}{\Delta b k} \sin \frac{\Delta b k}{2} \right) \cos(kx) dk \end{aligned} \quad (21)$$

需要提出的是,公式(19) 和公式(21) 中的积分虽然为无穷 Bessel 函数积分,但低波数段部分对积分的结果起到了决定性作用,因此可以将无穷积分转化为有限积分进行处理,根据经验选取截断区间,对积分结果的影响很小。本文采用五点高斯积分进行求解,保证了数值计算的精度。

3 埋置管道的动力阻抗函数

本文针对埋管 - 层状地基体系,结合容积分法进行求解。埋置管道 - 地基体系动力阻抗函数的主要求解思路为(见图 4)。

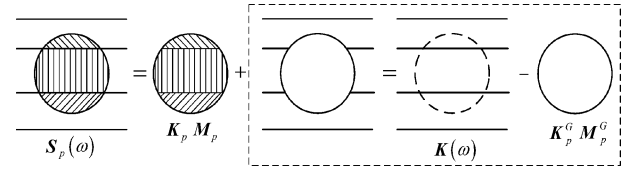


图 4 容积分法的原理

(1) 先不在原层状横观各向同性地基内埋置管道,然后将准备要埋置管道的区域离散成节点群(含 n 个节点),求解区域内离散节点群各自的位移响应,组成节点群的动力柔度矩阵:

$$\begin{Bmatrix} \tilde{q}_1 \\ \tilde{q}_2 \\ \vdots \\ \tilde{q}_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{F}_{1,1} & \tilde{F}_{1,2} & \cdots & \tilde{F}_{1,n} \\ \tilde{F}_{2,1} & \tilde{F}_{2,2} & \cdots & \tilde{F}_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{F}_{n,1} & \tilde{F}_{n,2} & \cdots & \tilde{F}_{n,n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{p}_1 \\ \tilde{p}_2 \\ \vdots \\ \tilde{p}_n \end{Bmatrix} \text{ 或 } \tilde{Q} = \tilde{F} \tilde{P} \quad (22)$$

其中, $\tilde{q}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示 i 节点上的位移, $\tilde{p}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示作用在 i 节点上的应力。

式中 $\tilde{Q}$ 为所有节点的位移向量, $\tilde{P}$ 为作用在所有节点上的应力向量, $\tilde{F}$ 为对应的动力柔度矩阵。对 $\tilde{F}$ 求逆得到动力刚度矩阵 $K(\omega) = \tilde{F}^{-1}$,因此,公式(22) 可转化为用节点动力刚度矩阵表示的形式:

$$\tilde{P} = K(\omega) \tilde{Q} \quad (23)$$

(2) 分别求解埋置管道的刚度矩阵 K_p 和质量矩阵 M_p ,以及与埋置管道同体积的地基土的刚度矩阵 K_p^G 和质量矩阵 M_p^G 。则埋置管道 - 地基体系的动力刚度矩阵为:

$$S_p(\omega) = K_p - K_p^G + K(\omega) - \omega^2 (M_p - M_p^G) \quad (24)$$

式中: $K(\omega)$ 为节点群的动力刚度矩阵。

由于地基中的埋管都是空心的,根据阻抗函数的定义,可以假设埋管为无质量刚体,因此公式(24) 中埋置管道的刚度矩阵 K_p 和质量矩阵 M_p 都不需要进行考虑。而刚度矩阵定义是发生单位位移时所

需要的力,由于地基中的土是有限域,周围都没有约束,因此公式(24)中地基土的刚度矩阵 $\mathbf{K}_p^c$ 数值上可以作零处理。所以埋管-地基体系的动力阻抗矩阵为:

$$S_p(\omega) = \mathbf{K}(\omega) + \omega^2 \mathbf{M}_p^c \tag{25}$$

4 数值算例与参数分析

4.1 均质半无限地基中埋置刚性条带基础

因为广义平面波动问题中横观各向同性半无限地基中埋置管道的动力刚度矩阵计算方法类似于横观各向同性半无限地基中埋置有刚性条带基础的计算方法,所以这里引入一个刚性条带基础埋置于均质半无限地基中动力刚度矩阵的算例进行验证。宽度为 $2R$ 的刚性条带基础埋置于均质半无限地基中,埋置深度为 $D = R/4$ (参考点到地基表面的距离,参考点取条带基础底部中心)。本算例中将分别选取两种均质材料来进行求解,两种材料各自的属性参数见表1,其中 G 为水平面的剪切模量,阻尼比 $\xi_s = \xi_p$ 均取5%。为方便与已有的文献结果进行对比,条带基础的动力刚度矩阵系数按照下式转化为无量纲形式:

$$\mathbf{S}_p(a_0) = \pi G \begin{bmatrix} K_{hh} & 0 & K_{hr} \\ 0 & K_{vv} & 0 \\ K_{rh} & 0 & K_{rr} \end{bmatrix} \quad a_0 = \frac{\omega R}{c_s} \tag{26}$$

其中, $a_0 = \omega R/c_s$,为无量纲频率,且 $c_s = \sqrt{R_{44}/\rho}$; K_{hh} 、 K_{vv} 和 K_{rr} 分别为水平、竖直和摇摆动力刚度; $K_{rh} = K_{hr}$ 为水平与摇摆耦合动力刚度。这里把此算例的计算结果与Wang等^[15]的计算结果进行对比,两者结果基本一致,从而验证了本文算法的正确性和计算结果的精确性。

表 1 横观各向同性半无限地基材料属性

材料	E_h/G	ν_{hh}	E_v/G	ν_{vh}	G_{vh}/G
1	1.966	0.170	2.406	0.185	1.0
2	3.864	0.301	2.863	0.185	1.0

4.2 横观各向同性的影响

半径为 R 的圆形管道埋置于层状横观各向同性半无限地基中,埋置深度为 $D = 2R$ 。为了研究层状地基的横观各向同性属性对地基中埋置管道动力阻抗函数的影响,本算例中选取两层地基且下卧弹性半无限地基的情况来进行分析。两个地基层及半无限地基层的材料属性见表2所示,对不同的地基层选取相同的比值 $n = E_h/E_v$,并针对不同的水平向和竖直向弹性模量的比值 n 对埋管动力阻抗函数

的影响进行分析研究($n = 0.33, n = 1.00, n = 2.00$)。将计算得到的埋管的动力刚度矩阵系数按照公式(26)转化为无量纲形式。计算结果显示 n 取不同的值时,地基中埋管动力刚度矩阵系数曲线的形状大致相同。当无量纲频率 a_0 很小时,尽管比值 n 不同,水平、竖直刚度矩阵系数的实部和虚部变化均较小。随着 a_0 的增大,水平刚度矩阵系数 K_{hh} 的实部和虚部与比值 n 的大小成正比;竖直刚度矩阵系数 K_{vv} 的实部和虚部曲线就越早趋于平缓。而摇摆刚度矩阵系数 K_{rr} 的实部和虚部与比值 n 的大小成反比。

表 2 两层层状地基和半无限地基材料属性

地基层	E_h/G	ν_{hh}	ν_{vh}	ρ	h
层 1	2.50	0.25	0.25	1.00	1.0R
层 2	1.30	0.30	0.30	1.00	0.5R
层 3	0.53	0.33	0.33	0.89	无限

5 结 论

本文运用方程变换和精细积分算法,并结合容积法来求解层状地基中埋置管道的动力阻抗函数。此算法不仅对层状地基的厚度、层数及材料属性没有任何限制,而且过程中利用到精细积分算法,使得计算结果具有很高的精度。求解过程中涉及到的矩阵维数均较少,使计算更加简便,求解效率也得以保证,且矩阵数值求解稳定。利用算例得出的结果与文献的计算结果相比较,验证了本文算法的准确性。并结合算例针对层状地基的横观各向同性进行参数分析,结果表明地基的横观各向同性属性对层状地基中埋置管道的动力阻抗函数有着十分重要的影响。

参考文献:

[1] 冯忠居,顾安全.大型沟埋式管道侧向土压力的研究[J].西安公路学院学报,1995(1):27-30.

[2] 徐建国,胡会明,李松涛,等.地下管道脱空渗漏高聚物注浆抬升修复与数值分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(3):35-40.

[3] 李荣华,刘伟华,王鹏宇,等.沉降及外部荷载作用下盖阳管廊防护效果分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):107-111.

[4] Pao Y H, Mow C C. Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations[M]. New York: Crane Russak and Company, 1973.

[5] Lee V W, Trifunac M D. Response of tunnels to incident SH-waves[J]. Journal of Engineering Mechanics, American Society of Civil Engineers, 1979,105(4):643-659.

- [6] 蒋 通,宋晓星.层状地基中埋管地基阻抗函数的分析方法[J].力学季刊,2009,30(2):244-249.
- [7] 蒋 通,田治见宏.地基-结构动力相互作用分析方法——薄层法原理及应用[M].上海:同济大学出版社,2009.
- [8] 蒋 通,宋晓星.用薄层法分析层状地基中条形基础的阻抗函数[J].力学季刊,2009,30(1):63-70.
- [9] 韩泽军.基础-复杂层状地基动力相互作用研究[D].大连:大连理工大学,2014.
- [10] 韩泽军,林 皋,周小文,等.横观各向同性层状地基上埋置刚性条带基础动力刚度矩阵求解[J].岩土工程学报,2016,38(6):1117-1124.
- [11] Han Z, Lin G, Li J. Dynamic impedance functions for arbitrary-shaped rigid foundation embedded in anisotropic multi-layered soil[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2015, 141(11):04015045.
- [12] 王 朋,韩泽军,胡志强.桩基础动阻抗函数计算方法研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(4):135-140.
- [13] Gazatas G. Strip foundations on a cross-anisotropic soil layer subjected to dynamic loading[J]. Geotechnique, 1981, 31(2):161-179.
- [14] Gao Q, Zhong W X, Howson W P. A precise method for solving wave propagation problems in layered anisotropic media[J]. Wave Motion, 2004,40:191-207.
- [15] Wang Y, Rajapakse R K N D. Dynamic of rigid strip foundations embedded in orthotropic elastic soils[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010, 20(10):927-947.

(上接第 51 页)

(6) 建议实施有针对性的支护设计,尤其注意加强隧道顶部左侧和底部右侧的加固支护措施,可有效防止发生初期支护混凝土开裂掉块、右侧底板开裂破坏情况,为后续的隧道设计及围岩加固提供了参考,有效地保证了隧道的安全顺利施工。

参考文献:

- [1] 马 林,关 伟,张 军.考虑结构性影响的黄土隧道围岩力学响应分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(5):114-118.
- [2] 张 旭.软弱围岩隧道侧压力系数反演分析及变形特性研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2013.
- [3] 陶云平.软弱围岩隧道变形破坏机制及处治措施研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(1):69-72.
- [4] 杨建明,孙西能,石晨晨,等.深部巷道围岩松动圈厚度测试及演化规律研究[J].云南冶金,2017,46(2):18-23.
- [5] 史兴国.巷道围岩松动圈理论的发展[J].河北煤炭,1995,4(1):1-5.
- [6] 周希圣,宋宏伟.国外围岩松动圈支护理论概况[J].建井技术,1994(Z1):67-71.
- [7] 周黎明,肖国强,尹健民.巴昆水电站发电洞开挖松动区岩体弹性模量测试与研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(2):3971-3975.
- [8] 樊克恭,蒋金泉.岩性弱结构巷道围岩的塑性区与松动圈形态[J].岩石力学与工程学报,2005,24(1):5275-5280.
- [9] 王 睿,袁崇洋,张进增,等.基于 Hoek-Brown 强度准则的隧道围岩松动圈分析[J].中国安全生产科学技术,2017,13(3):58-63.
- [10] 陈庆发,周科平,胡建华,等.缓倾薄层弱结构松动圈声波测试时测孔布置的理论依据与验证[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(5):1406-1410.
- [11] 陈庆发,张世雄,王官宝,等.倾斜薄层岩体巷道围岩松动圈测试研究[J].矿山压力与顶板管理,2005(2):61-65.
- [12] 伍文峰.溪洛渡水电站超大型地下厂房围岩监测资料分析和稳定性评价[J].水利与建筑工程学报,2014,12(2):112-116,124.
- [13] 邹红英,肖 明.地下洞室开挖松动圈评估方法研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(3):513-519.
- [14] 张建华,胡著秀,杨永涛,等.地下厂房围岩松动圈声波拟合及监测反馈分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1191-1197.
- [15] 杨 栋,李海波,夏 祥,等.高地应力下隧道围岩动力损伤分析[J].岩土力学,2013,34(2):311-317.
- [16] 吴 涛,戴 俊,杜美利,等.基于声波发测试技术的巷道围岩松动圈测定[J].煤炭安全,2015,46(1):169-172.