

文章编号: 1000-7598 (2014)增 2-0121-08

顶管推进引起施工场地竖向附加荷载分析

张治国^{1,2,3}, 张孟喜³, 王卫东⁴

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;
3. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 4. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘 要: 基于层状体系解析刚度矩阵理论解, 结合 5 节点 Gauss-Legendre 求积公式, 提出了层状地基中顶管施工正面附加推力、掘进机与土体之间摩擦力以及共同作用力引起的附加荷载计算方法, 分析了顶管推进引起的土体竖向附加荷载分布规律, 也研究了地基等效均质性、土层力学参数、计算点间距以及顶管埋深等因素对顶管施工诱发附加荷载的影响效应。研究结果表明, 掘进摩擦力引起的附加荷载在掘进面前方迅速达到压应力峰值, 其量值大小和影响范围均要大于正面附加推力, 是顶管施工引起临近地层附加荷载的主要影响因素。此外, 层状地基土体参数的改变会对顶管施工扰动地层的附加荷载产生一定影响, 地基等效均质性、计算点间距以及顶管埋深等因素对附加荷载大小及分布均存在显著影响。成果可为合理制定顶管开挖对周围土工环境的保护措施提供一定理论依据, 也可为其他盾构隧道工程提供一定的理论参考。

关 键 词: 顶管施工; 层状地基; 竖向附加荷载; 影响因素; 解析刚度矩阵解

中图分类号: U 45

文献标识码: A

Analysis of soil vertical additional loads induced by pipe jacking construction

ZHANG Zhi-guo^{1,2,3}, ZHANG Meng-xi³, WANG Wei-dong⁴

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

3. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 4. East China Architecture Design Institute, Shanghai 200002, China)

Abstract: Based on the analytical stiffness matrix solution for layered soil, the calculated method for additional loads induced by the pipe bulkhead additional pressure, and the propulsion friction force between the shield and surrounding soil, and the interaction forces, is derived by means of five-node Gauss-Legendre integral arithmetic. The distribution rule for vertical additional loads induced by pipe jacking construction is analyzed. Furthermore, the influences of equivalent uniform characteristics, soil mechanical parameters, spacing distance for calculation point, and pipe buried depth on additional loads are discussed. The research results show that the peak compressive stress is rapidly achieved ahead by the shield opening according to the additional loads due to the friction force. The value and influence scope of propulsion effects due to the friction force is more obvious than that due to bulkhead additional pressure. The friction force is the main influence factor of additional loads induced by pipe jacking. In addition, the change of layered soil parameters will lead to a certain extent impact on additional loads. The equivalent uniform characteristics, spacing distance for calculation point, and pipe buried depth have distinct influences on the magnitude and distribution of additional loads. The results may provide certain basis to draw up correctly protective measurements of geotechnical environments influenced by pipe jacking construction. The research results can also provide theoretical references to the other projects such as metro tunnel engineering.

Key words: pipe jacking; layered soil; vertical additional load; influence factor; analytical stiffness matrix solution

1 引 言

随着我国城市基础设施建设的快速发展, 地铁、越江隧道、通讯管道和合流污水管道等各种市政工程大量出现, 盾构和顶管是最为常见的两种隧

道管道施工方式。顶管推进施工时必将诱发周围地层扰动而使临近既有构筑物承受附加荷载, 甚至会造成结构屈曲变形直至开裂破坏, 如何控制顶管推进施工引起的土体附加荷载影响, 对于确保既有构筑物的结构安全以及顶管的顺利掘进都具有重要的

收稿日期: 2014-01-16

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51008188, No. 41172238); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室基金 (No. SKLGDUEK1205); 中国博士后科研基金 (No. 201104266)。

第一作者简介: 张治国, 男, 1978 年生, 博士后, 副教授, 硕士生导师, 主要从事地下工程施工对周围环境影响评估方面的教学与研究。

E-mail: zgzhang@usst.edu.cn

指导意义。

目前国内外学者针对顶管及盾构施工引起周围地层以及地下构筑物包括隧道、市政管道等影响的研究主要采用数值模拟方法^[1-10]、模型试验方法^[11-12]以及现场监测等方法^[13-14]。研究大多集中于顶管及盾构施工引起的地表沉降以及既有构筑物变形,针对顶管及盾构施工所引起的周围地层附加荷载研究却很少。胡昕等^[15]利用弹性力学 Mindlin 解,分析了顶管正面推力引起的附加荷载在相邻管道上的分布规律。黄宏伟等^[16]采用三维数值分析方法,对机头正面推力、地层损失、注浆以及共同作用等进行了模拟研究。齐静静等^[17]结合镜像法基本原理以及 Mindlin 解,针对双线平行盾构法隧道施工引起的附加荷载进行了计算。赵玉勃等^[18]基于弹性力学 Mindlin 解,推导了盾构推进时正面推力、盾构与土体间摩擦力引起的周围土体附加应力沿圆周方向的计算表达式。张明聚等^[19]通过现场监测,研究了小净距平行盾构隧道施工中后行隧道掘进引起的先行隧道管片附加应力的变化规律。

上述针对顶管及盾构施工所引起的周围地层附加荷载研究的理论方法一般假定土体为均匀线弹性半无限体,没有考虑地基土体的非均质性。实际中顶管施工场地土体往往呈现层状分布,各层间的土体力学特性也不尽相同,甚至相邻土层特性差别很大,因此,应针对层状施工场地中顶管推进引起的地层附加荷载理论进行深入研究。

为获得层状地基基本解,本文从单层地基初始函数的解析解推导出对称的解析刚度矩阵,根据有限元总刚装配方法构造出层状地基总体刚度矩阵,再结合边界条件求解总体刚度矩阵形成的代数方程,得到相应问题的精确解。由于总体刚度矩阵的对称性及其元素仅存在负指数这一优点,不仅避免了因正指数存在导致的计算溢出问题,提高了计算精度,也在很大程度上简化了整个计算过程。基于层状体系解析刚度矩阵理论解,本文得到了顶管正面附加推力、掘进机与土体之间摩擦力以及共同作用力引起的附加荷载计算公式,分析了正面附加推力和摩擦力以及共同作用下土体竖向附加荷载分布规律,同时也研究了各影响因素下顶管推进引起的地层附加荷载分布规律,取得了一些有意义的工程结论,可以为预防临近构筑物受力开裂以及保护临近地下构筑物的结构安全提供较为可靠的理论依据。

2 附加荷载理论分析方法

基本假定为:(1)施工场地为层状非均质土体,

是由 n 个具有有限厚度的水平层以及半无限空间体组成,各土层间完全接触;(2)考虑顶管掘进施工扰动地层影响时,场地不排水固结;(3)顶管沿直线推进,不考虑掘进机纠偏、旋转的影响;(4)顶管正面附加推力沿推进面均匀分布,机壳与土体之间摩擦力沿机壳均匀分布。顶管掘进力学模型如图 1 所示。图中,正面附加推力和掘进摩擦力所示方向为周围土体所受到的方向,顶管掘进机长 L ,外径为 D ,轴线埋深为 H ,正面附加推力集度为 F_1 ,掘进摩擦力集度为 F_2 。

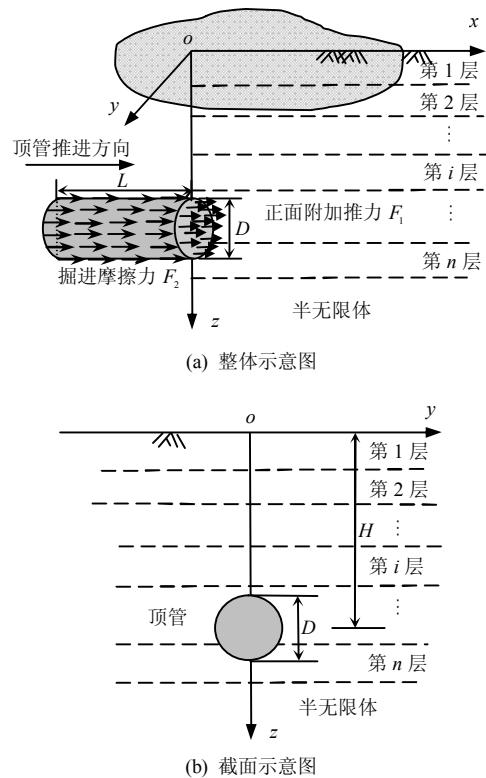


图1 附加荷载计算模型

Fig.1 Calculation model for additional loads

从弹性力学中平衡微分方程、几何方程和物理方程出发,施工场地单层地基中各物理量满足如下关系式:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = -\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = -\frac{E}{1-\mu^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{E}{2(1-\mu)} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} - \frac{E}{2(1+\mu)} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\mu}{1-\mu} \frac{\partial \sigma_z}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = -\frac{E}{1-\mu^2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - \frac{E}{2(1-\mu)} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} - \frac{E}{2(1+\mu)} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\mu}{1-\mu} \frac{\partial \sigma_z}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xz} - \frac{\partial w}{\partial x} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz} - \frac{\partial w}{\partial y} \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)E} \sigma_z - \frac{\mu}{1-\mu} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\mu}{1-\mu} \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6)$$

式中: σ_z 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} 为土体任意一点应力分量; u 、 v 、 w 为土体任意一点位移分量; E 为单层土体模量; μ 为单层土体泊松比。

根据双重 Fourier 积分变换的定义, 对于任意函数 $f(x, y, z)$ 可进行 Fourier 积分正变换和逆变换, 即

$$\tilde{f}(\xi, \eta, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y, z) e^{-i(\xi x + \eta y)} dx dy \quad (7)$$

$$f(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(\xi, \eta, z) e^{i(\xi x + \eta y)} d\xi d\eta \quad (8)$$

式中: ξ 、 η 为 Fourier 积分变换复变量。

基于式 (7)、(8), 针对式 (1)~(6) 做双重 Fourier 积分变换, 并表示成矩阵形式:

$$\frac{\partial}{\partial z} [\tilde{\beta}(\xi, \eta, z)] = \phi(\xi, \eta) \tilde{\beta}(\xi, \eta, z) \quad (9)$$

式中:

$$\tilde{\beta}(\xi, \eta, z) = \begin{bmatrix} \frac{i\sigma_z(\xi, \eta, z)}{G} & \frac{\tau_{xz}(\xi, \eta, z)}{G} & \frac{\tau_{yz}(\xi, \eta, z)}{G} \\ u(\xi, \eta, z) & v(\xi, \eta, z) & iw(\xi, \eta, z) \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

$$\phi(\xi, \eta) = \begin{bmatrix} 0 & \xi & \eta & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{\mu-1} \xi & 0 & 0 & \frac{2\xi^2}{1-\mu} + \eta^2 & \frac{1+\mu}{1-\mu} \xi \eta & 0 \\ \frac{\mu}{\mu-1} \eta & 0 & 0 & \frac{1+\mu}{1-\mu} \xi \eta & \frac{2\eta^2}{1-\mu} + \xi^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -\xi \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -\eta \\ \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 & 0 & \frac{\mu\xi}{1-\mu} & \frac{\mu\eta}{1-\mu} & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据常微分方程理论可得方程式 (9) 的通解, 即单层地基的初始函数解答:

$$\tilde{\beta}(\xi, \eta, z) = \Phi(\xi, \eta, z) \tilde{\beta}(\xi, \eta, 0) \quad (12)$$

式中: $\Phi(\xi, \eta, z) = \exp[z\phi(\xi, \eta)]$ 。

为了获取简洁对称的刚度矩阵, 现将式 (12) 中积分变换域内的变量作进一步定义, 并经过推导可以得到关系式:

$$\begin{bmatrix} \tilde{r}(\xi, \eta, z) \\ -\tilde{r}(\xi, \eta, 0) \end{bmatrix} = K(\xi, \eta, z) \begin{bmatrix} \tilde{U}(\xi, \eta, z) \\ \tilde{U}(\xi, \eta, 0) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:

$$\begin{cases} \tilde{r}(\xi, \eta, z) = [i\sigma_z(\xi, \eta, z) \quad \tau_{xz}(\xi, \eta, z) \quad \tau_{yz}(\xi, \eta, z)]^T \\ \tilde{U}(\xi, \eta, z) = [iw(\xi, \eta, z) \quad u(\xi, \eta, z) \quad v(\xi, \eta, z)]^T \end{cases} \quad (14)$$

$K(\xi, \eta, z)$ 为 6×6 阶的对称刚度矩阵, 建立了在 Fourier 变换域内任一单层土层单元上表面与下表面应力与位移量之间的关系, 并具有解析解的性质, 故称之为解析刚度矩阵。

解析刚度矩阵 $K(\xi, \eta, z)$ 中具体元素为式 (15)。

$$\begin{aligned} k_{11} &= \frac{2E\sqrt{\xi^2 + \eta^2}(1-\mu)[(e^{-4z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - 1)(3-4\mu) - 4z^2 e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \sqrt{\xi^2 + \eta^2}]}{[(e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - 1)^2(4\mu-3)^2 - 4z^2(\xi^2 + \eta^2)e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}](1+\mu)} \\ k_{12} &= k_{21} = -k_{45} = -k_{54} = \frac{E\xi[(e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - 1)^2(1-2\mu)(3-4\mu) - 4z^2 e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}(\xi^2 + \eta^2)]}{[(e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - 1)^2(4\mu-3)^2 - 4z^2(\xi^2 + \eta^2)e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}](1+\mu)\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \\ k_{13} &= k_{31} = -k_{46} = -k_{64} = \frac{\eta}{\xi} k_{12} \\ k_{14} &= k_{41} = \frac{4E\sqrt{\xi^2 + \eta^2} e^{-z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} (e^{-4z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} + 1)(\mu-1)[(e^{-4z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} + 1)(3-4\mu) + z\sqrt{\xi^2 + \eta^2} (e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - 1)]}{[(e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - 1)^2(4\mu-3)^2 - 4z^2(\xi^2 + \eta^2)e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}](1+\mu)(e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - 1)} \\ k_{15} &= k_{51} = -k_{24} = -k_{42} = \frac{4E\sqrt{\xi^2 + \eta^2} e^{-z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} (e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - 1)(1-\mu)z}{[(e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - 1)^2(4\mu-3)^2 - 4z^2(\xi^2 + \eta^2)e^{-2z\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}](1+\mu)} \\ k_{16} &= k_{61} = -k_{34} = -k_{43} = \frac{\eta}{\xi} k_{15} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_{22}=k_{35} &= \frac{E\{(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)^2(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}+1)(3-4\mu)[\xi-4(1-\mu)]+4z\sqrt{\xi^2+\eta^2}e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}[z\eta^2\sqrt{\xi^2+\eta^2}(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}+1)-4\xi^2(1-\mu)(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)]\}}{2(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)\sqrt{\xi^2+\eta^2}[(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)^2(4\mu-3)^2-4z^2(\xi^2+\eta^2)e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}](1+\mu)} \\
k_{25}=k_{32} &= \frac{Ee^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}\{4z\sqrt{\xi^2+\eta^2}[\xi^2(1-\mu)(e^{-4z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)-\eta^2e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}z\sqrt{\xi^2+\eta^2}-(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)^2(3-4\mu)[\eta^2-4(1-\mu)(\xi^2+\eta^2)]\}}{(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)\sqrt{\xi^2+\eta^2}[(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)^2(4\mu-3)^2-4z^2(\xi^2+\eta^2)e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}](1+\mu)} \\
k_{26}=k_{62}=k_{35}=k_{53} &= \frac{\xi\eta Ee^{-z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}[(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)(3-4\mu)+4(\xi^2+\eta^2)z^2e^{-4z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}+4(e^{-4z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)(1-\mu)]}{[(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)^2(4\mu-3)^2-4z^2(\xi^2+\eta^2)e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}](1+\mu)\sqrt{\xi^2+\eta^2}(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)} \\
k_{33}=k_{66} &= \frac{E\{(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)(\xi^2+\eta^2)[4\xi^2z^2(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-2)-(3-4\mu)(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}+1)^2]-\xi^2[(e^{-4z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)(3-4\mu)+16z\sqrt{\xi^2+\eta^2}e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}(1-\mu)]\}}{2(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)^2(4\mu-3)^2-4z^2(\xi^2+\eta^2)e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}(1+\mu)\sqrt{\xi^2+\eta^2}(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)} \\
k_{36}=k_{63} &= \frac{Ee^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}\{2(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)^2[\eta^2+(\xi^2+\eta^2)(3-4\mu)](3-4\mu)+4z\sqrt{\xi^2+\eta^2}[\xi^2ze^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-\eta^2(1-\mu)(e^{-4z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)]\}}{2[(e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}-1)^2(4\mu-3)^2-4z^2(\xi^2+\eta^2)e^{-2z\sqrt{\xi^2+\eta^2}}](1+\mu)}
\end{aligned} \quad (15)$$

显然, 式(15)解析刚度矩阵的元素仅存在负指数函数, 计算时不会出现溢出现象, 具有计算精度高、稳定性好的特点, 便于工程应用。

对于 n 层分层地基 (包括荷载作用面), 假定 h_i 为第 i 层土层底至地表面的距离 ($i=1, 2, \dots, n$), 则第 i 层土厚度可表示为 $\Delta h_i = h_i - h_{i-1}$, $\Delta h_1 = h_1$ 。假定任意荷载作用面也作为一土层分层面, 设为第 s 层, 其到地表面距离为 h_s , 该荷载在 x, y, z 方向上的分量分别为 $P(x_0, y_0, h_s)$ 、 $Q(x_0, y_0, h_s)$ 和 $R(x_0, y_0, h_s)$ 。

根据式(15), 定义第 i 层土的解析刚度矩阵为 $\mathbf{K}^{(i)}(\xi, \eta, \Delta h_i)$, 基于各土层间完全接触的层间连续条件, 并结合式(13), 进行矩阵叠加得到表达式:

$$\begin{bmatrix} -\tilde{T}(\xi, \eta, 0) \\ 0 \\ \vdots \\ \tilde{T}(\xi, \eta, h_s) \\ \vdots \\ 0 \\ \tilde{T}(\xi, \eta, h_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}^{(1)} & & & 0 \\ & \mathbf{K}^{(2)} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{K}^{(n-1)} \\ 0 & & & & \mathbf{K}^{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{U}(\xi, \eta, 0) \\ \tilde{U}(\xi, \eta, h_1) \\ \vdots \\ \tilde{U}(\xi, \eta, h_s) \\ \vdots \\ \tilde{U}(\xi, \eta, h_{n-1}) \\ \tilde{U}(\xi, \eta, h_n) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: 将相邻解析刚度矩阵 $\mathbf{K}^{(1)}(\xi, \eta, \Delta h_1)$ 、 $\mathbf{K}^{(2)}(\xi, \eta, \Delta h_2)$ 、 $\dots$ 、 $\mathbf{K}^{(n-1)}(\xi, \eta, \Delta h_{n-1})$ 、 $\mathbf{K}^{(n)}(\xi, \eta, \Delta h_n)$ 按照有限元总刚装配方法两两叠加得到一个 $(3n+3) \times (3n+3)$ 阶对称矩阵, 即为多层地基作用任意荷载时的总刚度矩阵; 各土层计算点处的位移变量经双重 Fourier 积分变换后的物理量表示为 $[\tilde{U}(\xi, \eta, 0) \tilde{U}(\xi, \eta, h_1) \cdots \tilde{U}(\xi, \eta, h_s) \cdots \tilde{U}(\xi, \eta, h_{n-1}) \tilde{U}(\xi, \eta, h_n)]^T$; 各土层计算点处的外荷载 (边界荷载) 变量经积分变换后的量表示为 $[-\tilde{T}(\xi, \eta, 0) 0 \cdots \tilde{T}(\xi, \eta, h_s) \cdots 0 \tilde{T}(\xi, \eta, h_n)]^T$ 和 $\tilde{T}(\xi, \eta, h_s) = [\tilde{u}(\xi, \eta, h_s) \tilde{p}(\xi, \eta, h_s) \tilde{q}(\xi, \eta, h_s)]^T$,

而

$$\left. \begin{aligned} p(x, y, h_s) &= P(x_0, y_0, h_s) \delta(x - x_0, y - y_0) \\ q(x, y, h_s) &= Q(x_0, y_0, h_s) \delta(x - x_0, y - y_0) \\ r(x, y, h_s) &= R(x_0, y_0, h_s) \delta(x - x_0, y - y_0) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: $\delta(x - x_0, y - y_0)$ 为 Dirac 奇异函数^[20]。

考虑到地表面和距离地表无穷远位置处的边界条件分别为

$$\left. \begin{aligned} \tilde{T}(\xi, \eta, 0) &= 0 \\ \tilde{U}(\xi, \eta, h_n) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

将式(18)代入式(16), 从而求出在变换域内任意深度处的位移量。将其代入式(13), 就可以进一步求得变换域内层状地基任意深度处的应力, 表示为

$$\tilde{\Gamma}(\xi, \eta, h_i) = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} & -k_{15} & k_{25} & k_{26} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} & -k_{16} & k_{26} & k_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{U}(\xi, \eta, h_i) \\ \tilde{U}(\xi, \eta, h_{i-1}) \end{bmatrix} \quad (19)$$

最终根据式(8)对式(19)结果进行双重 Fourier 逆变换, 便可以得到层状地基中应力基本解。

本文以土体竖向应力 σ_z 为例, 讨论顶管推进引起的周围地层附加荷载分布。在正面附加推力作用下, 图 1 取微元面积 $rdrd\theta$, 微元荷载为 $F_1 r dr d\theta$, F_1 为正面附加推力荷载集度, r 、 θ 为开挖面极坐标积分参数, 则正面附加推力引起扰动地层中任一点 (x, y, z) 的竖向附加应力 σ_z^1 为

$$\sigma_z^1 = \iint_{S_1} F_1 \rho(r, \theta) r dr d\theta \quad (20)$$

式中: S_1 为顶管开挖面面积, 其积分区域为 $0 \leq$

$r \leq D/2$, $0 \leq \theta \leq 2\pi$, D 为掘进机外径; $\rho(r, \theta)$ 为单元正面附加推力引起扰动地层中任一点的竖向附加应力, 采用层状地基中应力基本解式 (19) 计算。

此外, 在机壳与土体之间摩擦力作用下在图 1 坐标系中, 取微元面积 $\frac{D}{2} d\theta$, 微元荷载 $\frac{F_2 D}{2} d\theta$, F_2 为摩擦力荷载集度, D 为掘进机外径, l 为掘进机沿推进方向积分参数。则机壳与土体间摩擦力引起扰动地层中任一点 (x, y, z) 的竖向附加应力 σ_z^2 为

$$\sigma_z^2 = \iint_{S_2} \frac{F_2 D}{2} \rho(l, \theta) d\theta \quad (21)$$

式中: S_2 为机壳侧面积; 其积分区域为 $0 \leq l \leq L$, $0 \leq \theta \leq 2\pi$; L 为掘进机长; $\rho(l, \theta)$ 为单元摩擦力引起扰动地层中任一点的竖向附加应力, 采用层状地基中应力基本解式 (19) 计算。

将上述正面附加推力、掘进机外表面与土体之间的摩擦力作用下扰动地层中任一点 (x, y, z) 产生的附加应力叠加, 便得到该点总的附加应力:

$$\sigma_z = \sigma_z^1 + \sigma_z^2 \quad (22)$$

考虑到式 (20)~(22) 较难直接积分计算, 可采用 5 节点 Gauss-Legendre 求积公式求解, 即要满足:

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 f(x) dx &\approx 0.236\ 93 f(-0.906\ 18) + 0.478\ 63 f \cdot \\ &(-0.538\ 47) + 0.568\ 89 f(0) + 0.478\ 63 f \cdot \\ &(0.538\ 47) + 0.236\ 93 f(0.906\ 18) \end{aligned} \quad (23)$$

作积分变换, 令

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{D}{4} \xi + \frac{D}{4} \\ \theta &= \pi \eta + \pi \\ l &= \frac{L}{2} \zeta + \frac{L}{2} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

则式 (20)、(21) 可以转换为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z^1 &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 F_1 \rho'(\xi, \eta) \xi d\xi d\eta = \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^5 \lambda_i \lambda_j F_1 \rho'(\gamma_i, \gamma_j) \gamma_i \\ \sigma_z^2 &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{F_2 D}{2} \rho'(\zeta, \eta) d\zeta d\eta = \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^5 \frac{F_2 D}{2} \lambda_i \lambda_j \rho'(\gamma_i, \gamma_j) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中: 5 节点 Gauss-Legendre 公式系数 $\lambda_i = \lambda_j = (0.236\ 93, 0.478\ 63, 0.568\ 89, 0.478\ 63, 0.236\ 93)$, 公式节点 $\gamma_i = \gamma_j = (-0.906\ 18, -0.538\ 47, 0, 0.538\ 47, 0.906\ 18)$ 。

根据式 (25) 便可以求得层状地基中顶管正面附加推力、机壳与土体之间摩擦力引起周围地层任意一点处的附加应力。

3 算例分析

本文算例中, 根据图 1 所建立的坐标系, 选取顶管掘进机轴线以上某点为附加荷载计算点 (x, y, z) , 即取 $z = H - 0.5D - S$, 其中 H 为掘进机轴线埋深; S 为掘进机外沿与计算点间距。计算扰动土体竖向应力 σ_z 沿轴向 x 纵向分布的面荷载, 同时也将等效均质地基中的计算结果进行了对比研究。此外, 为了考虑附加荷载的影响因素及其影响程度, 在计算某一因素的影响时, 其他因素固定不变。本文中受力分析以压为正, 拉为负。

某地铁工程场地顶管掘进机外径 $D = 6.4\text{ m}$, 机长 $L = 6\text{ m}$, 其轴线埋深 $H = 29\text{ m}$, 顶管平行 x 轴向施工, 计算点与顶管掘进机外沿间距 $S = 7.4\text{ m}$, 正面附加推力 $F_1 = 40\text{ kPa}$, 盾壳与土体间的掘进摩擦力 $F_2 = 100\text{ kPa}$ 。层状地基参数见表 1。

表 1 地层物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of soils

层号	层厚 / m	重度 / (kN/m ³)	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / kPa	弹性模量 / MPa	泊松比
①	2.8	17.2	21	0.0	2.67	0.33
②	7.1	19.6	9.7	31.9	8.35	0.32
③	11.7	18.2	16.4	12.3	15.6	0.31
④	12.5	17.4	14.6	17.6	25.3	0.28
⑤	13.1	14.2	15.1	14.3	22.6	0.31
⑥	22.3	22.1	24	10.2	45.7	0.24

3.1 共同作用下引起附加荷载分析

图 2 为正面附加推力 F_1 、机壳与土体间的掘进摩擦力 F_2 以及共同作用力 $(F_1 + F_2)$ 引起的沿轴向 x 纵向分布的附加面荷载。由图中可以发现, 正面附加推力引起的附加面荷载沿顶管推进方向近似呈现反对称分布, 在开挖面前上方土体受到挤压, 表现为压应力, 开挖面后方则表现为拉应力; 相对于正面附加推力影响效应, 掘进摩擦力引起的附加面荷载在掘进面前方迅速达到压应力峰值, 其影响范围要大于正面附加推力, 也可以看出摩擦力引起的附加荷载较大, 是顶管施工引起临近地层附加荷载的主要因素。两者的共同作用如同在临近地层作用一扭矩, 随着顶管不断推进, 这个扭矩也不断地前进, 如遇到地下构筑物结构材料薄弱环节, 就极易产生危害。

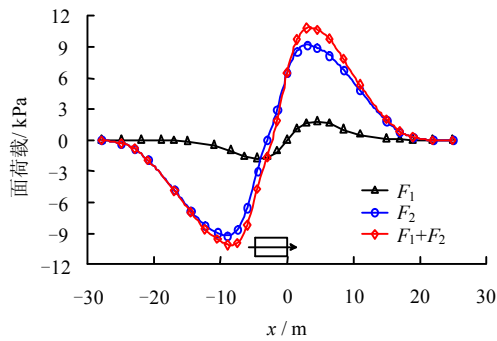


图2 共同作用下附加荷载曲线

Fig.2 Curves for additional load under interaction effects

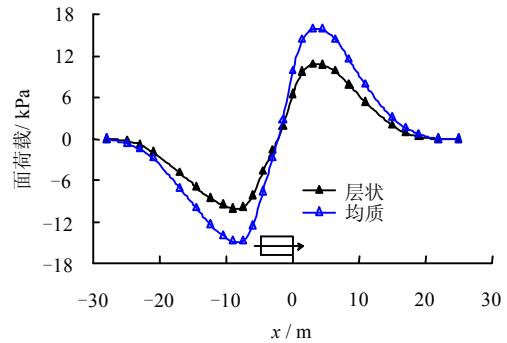


图5 不同地基条件下共同作用引起附加荷载分布规律

Fig.5 Distribution rule for additional load induced by interaction forces under different foundation conditions

3.2 等效均质性对附加荷载影响分析

图 3~5 为层状地基与等效均质地基中附加推力、掘进摩擦力以及共同作用力引起的沿轴向 x 纵向分布附加面荷载的对比结果, 其中等效均质地基的土体参数按照 Poulos 和 Davis^[21] 提出的取加权平均值方法计算。对比结果显示, 不管是正面附加推力、掘进摩擦力还是共同作用力引起的附加荷载, 采用本文方法按照实际分层情况计算的结果与按照等效均质地基情况计算的结果有较大的差距, 说明对于土体参数相差较大的层状地基, 如果采用以往

的将不同土体参数近似折算成平均值进而按照均质体系进行求解会带来比较大的误差, 在计算中应重视地基非均质性带来的影响。

3.3 土层参数对附加荷载影响分析

根据章节 3.1 分析结果, 掘进摩擦力是顶管施工引起临近地层附加荷载的主要因素, 本文将掘进摩擦力影响效应作为主要研究对象。以第③、④层土体为考察目标, 设置 3 种工况, 工况 1: $E_{31} = 7.8 \text{ MPa}$, $\mu_{31} = 0.33$, $E_{41} = 13 \text{ MPa}$, $\mu_{41} = 0.31$; 工况 2: $E_{32} = 15.6 \text{ MPa}$, $\mu_{32} = 0.31$, $E_{42} = 25.3 \text{ MPa}$, $\mu_{42} = 0.28$; 工况 3: $E_{33} = 31.2 \text{ MPa}$, $\mu_{33} = 0.27$, $E_{43} = 50 \text{ MPa}$, $\mu_{43} = 0.24$ 。图 6 为不同土层参数工况下 (其他因素假定不变) 摩擦力引起的沿轴向 x 纵向分布附加面荷载。

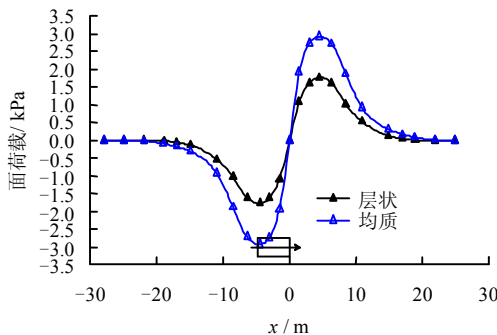


图3 不同地基条件下附加推力引起附加荷载分布规律

Fig.3 Distribution rule for additional load induced by bulkhead additional pressure under different foundation conditions

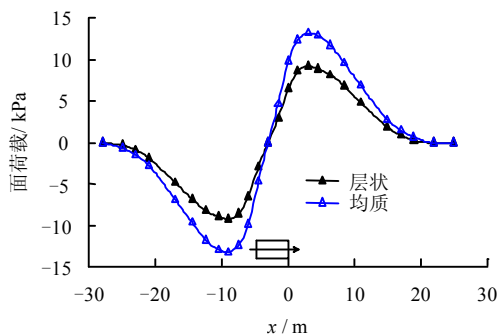


图4 不同地基条件下摩擦力引起附加荷载分布规律

Fig.4 Distribution rule for additional load induced by friction force under different foundation conditions

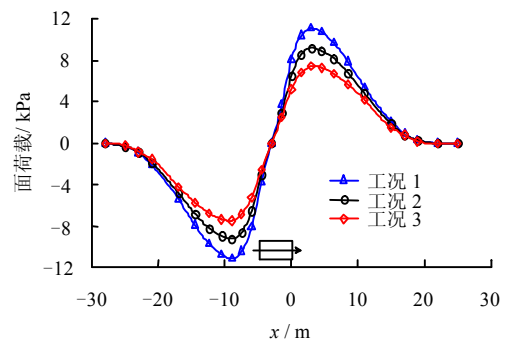


图6 不同土层参数下摩擦力引起附加荷载分布规律

Fig.6 Distribution rule for additional load induced by friction force under different soil parameter conditions

从图 6 中可以看出, 针对工况 1, 即第③、④层土体弹性模量较小时, 摩擦力引起土层附加荷载量值较大; 针对工况 3, 即当第③、④层土体弹性模量较大时, 摩擦力引起土层附加荷载量值普遍偏小。此外, 从图中也可以看出, 层状地基土层参数的改变会对顶管施工扰动地层的附加荷载产生一定程度影响。

3.4 计算点间距 S 对附加荷载影响分析

图 7 为不同计算点间距 S 工况下 (其他因素假定不变) 摩擦力引起临近地层沿轴向 x 纵向分布的附加面荷载, 选取了 $S_1 = 4.4$ m, $S_2 = 7.4$ m 以及 $S_3 = 10.4$ m 三种工况。由图中可以看出, 随着计算点间距 S 的减小, 摩擦力引起的纵向附加荷载峰值明显变大, 且峰值位置逐渐向开挖面靠近, 其影响范围变小, 衰减速度变快。掘进摩擦力使扰动地层产生明显的土拱效应, 在顶管掘进机前方产生喇叭状区域, 而该区域内的土体将受到较大挤压作用。

3.5 顶管埋深 H 对附加荷载影响分析

实际工程中, 随着顶管埋深的增大, 掘进摩擦力也会随之增大。为研究顶管埋深 H 对掘进摩擦力 F_2 引起附加荷载的影响效应, 选取 3 种工况, 即 $H_1 = 23$ m, $F_{21} = 86$ kPa; $H_2 = 29$ m, $F_{22} = 100$ kPa; $H_3 = 35$ m, $F_{23} = 127$ kPa。图 8 为不同顶管埋深工况下 (计算点间距等因素假定不变) 摩擦力引起的沿轴向 x 纵向分布附加面荷载。由图中可以看出, 随着顶管埋深的增大, 摩擦力引起的附加荷载峰值明显变大, 开挖面前上方土体受到挤压效应明显, 同时开挖面后方土体受拉效应显著, 但影响范围基本不变。

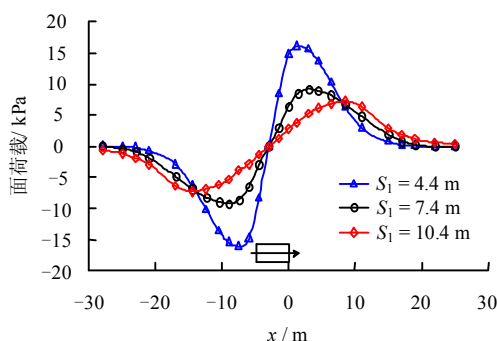


图 7 不同间距 S 条件下摩擦力引起附加荷载分布规律
Fig.7 Distribution rule for additional load induced by friction force under different distance S conditions

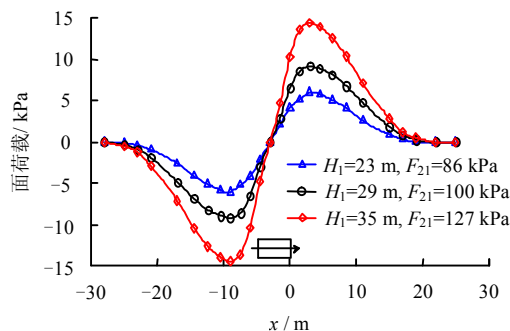


图 8 不同埋深 H 条件下摩擦力引起附加荷载分布规律
Fig.8 Distribution rule for additional load induced by friction force under different buried depth H conditions

4 结 论

(1) 本文提出的层状体系解析刚度矩阵理论解, 由于总体刚度矩阵的对称性及其元素仅存在负指数这一优点, 不仅避免了因正指数存在导致的计算溢出问题, 提高了计算精度, 也在很大程度上简化了整个计算过程。

(2) 正面附加推力引起的附加面荷载沿顶管推进方向近似呈现反对称分布, 在顶管开挖面前上方土体受到挤压, 表现为压应力, 开挖面后方则表现为拉应力; 掘进摩擦力引起的附加荷载在掘进面前方迅速达到压应力峰值, 其量值大小和影响范围均要大于正面附加推力, 是顶管施工引起地层附加荷载的主要影响因素。

(3) 采用本文方法按照实际分层情况计算的附加荷载结果与按照等效均质地基情况计算的结果有较大差距, 说明对于土体参数相差较大的层状地基, 如果采用以往的将不同土体参数近似折算成平均值进而按照均质体系进行求解会带来比较大的误差。

(4) 层状地基土层参数的改变会对顶管施工扰动地层的附加荷载产生一定程度影响。此外, 地基等效均质性、计算点间距以及顶管埋深等因素对附加荷载大小及分布均存在显著影响。

(5) 本文假定顶管沿直线推进, 不考虑顶管纠偏影响, 可能与实际情况有所偏差, 可作进一步研究。

参 考 文 献

- [1] ADDENBROOKE T I, POTTS D M. Twin tunnel interaction: Surface and subsurface effects[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2001, 1(2): 249—271.
- [2] HEFNY A M, CHUA H C, ZHAO J. Parametric studies on the interaction between existing and new bored tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(4-5): 471.
- [3] NG C W W, LEE K M, TANG D K W. Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunneling method (NATM) twin tunnel interactions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(3): 523—539.
- [4] CHEHADE F H, SHAHROUR I. Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: influence of the relative position and construction procedure[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(2): 210—214.
- [5] ROWE R K, LO K Y, KACK G J. A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft

- ground[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1983, 20(8): 11—22.
- [6] 楼晓明, 郑俊杰, 章荣军. 隧道施工引起的地表变形数值模拟[J]. 铁道工程学报, 2007, 108(9): 62—66.
LOU Xiao-ming, ZHENG Jun-jie, ZHANG Rong-jun. Simulation of numerical values of surface deformation caused by tunnel construction[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2007, 108(9): 62—66.
- [7] 林志, 朱合华, 夏才初. 双线盾构隧道施工过程相互影响的数值研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 85—89.
LIN Zhi, ZHU He-hua, XIA Cai-chu. Numerical modeling study on interaction between twin shields tunneling[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2009, 5(1): 85—89.
- [8] 陶连金, 孙斌, 李晓霖. 超近距离双孔并行盾构施工的相互影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1856—1862.
TAO Lian-jin, SUN Bin, LI Xiao-lin. Interaction analysis of double holes extremely close approaching parallel shield tunnels construction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(9): 1856—1862.
- [9] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 遮拦叠交效应下地铁盾构掘进引起地层沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1750—1761.
ZHANG Zhi-guo, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong. Analysis of ground settlements induced by subway shield excavation considering sheltering overlapped effects[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(9): 1750—1761.
- [10] CHAPMAN D N, AHN S K, HUNT D V L, et al. The use of model tests to investigate the ground displacements associated with multiple tunnel construction[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2006, 21(3-4): 413—419.
- [11] LEE C J, WU B R, CHEN H T, et al. Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2006, 21(2): 119—132.
- [12] 凌昊, 仇文革, 孙兵, 等. 双孔盾构隧道近接施工离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2849—2853.
LING Hao, QIU Wen-ge, SUN Bing, et al. Study of adjacent construction of two tube shield tunnels by centrifugal model test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2849—2853.
- [13] 陈越峰, 张庆贺, 张颖, 等. 近距离三线并行盾构隧道施工实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 335—340.
CHEN Yue-feng, ZHANG Qing-he, ZHANG Ying, et al. In-situ monitoring and analyzing on construction of three closely spaced parallel pipe shield tunnels[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2008, 4(2): 335—340.
- [14] 白云, 戴志仁, 徐飞, 等. 后掘盾构越先掘盾构对地层变形的影响研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 128—135.
BAI Yun, DAI Zhi-ren, XU Fei, et al. Study of the influence of one shield passing another on ground deformation for construction of parallel tunnels[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2011, 44(2): 128—135.
- [15] 胡昕, 黄宏伟. 相邻平行顶管推进引起附加荷载的力学分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 75—77.
HU Xin, HUANG Hong-wei. Mechanical analysis of superimposed load induced by propulsion of adjacent parallel pipe[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(1): 75—77.
- [16] 黄宏伟, 胡昕. 顶管施工力学效应的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 400—406.
HUANG Hong-wei, HU Xin. 3D numerical analysis of construction mechanics effect of pipe-jacking[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(3): 400—406.
- [17] 齐静静, 徐日庆, 魏纲. 双线平行盾构法隧道施工附加荷载的计算分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 133—138.
QI Jing-jing, XU Ri-qing, WEI Gang. Analysis and calculation of superimposed load induced by double parallel shield tunnelling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 133—138.
- [18] 赵玉勃, 张忠苗. 盾构法隧道推进引起周围土体的附加应力分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1386—1391.
ZHAO Yu-bo, ZHANG Zhong-miao. Additional stress of surrounding soil caused by propelling of shield tunneling[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(9): 1386—1391.
- [19] 张明聚, 赵明, 王鹏程, 等. 小净距平行盾构隧道施工先行隧道管片附加应力监测研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2121—2126.
ZHANG Ming-ju, ZHAO Ming, WANG Peng-cheng, et al. Field tests and researches on secondary stresses of advanced tunnel segments during parallel shield tunnels driving in close proximity[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(11): 2121—2126.
- [20] 王燮山. 奇异函数及其在力学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 100—165.
- [21] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. New York: Wiley, 1980: 93—100.