

文章编号: 1000-7598-(2006) 11-1992-05

相邻水平平行顶管推进引起的附加荷载分析

魏 纲, 魏新江

(浙江大学 城市学院 土木工程系, 杭州 3100150)

摘 要: 利用弹性力学的 Mindlin 解, 推导得到顶管正面附加推力、掘进机和后续管道与土体之间的摩擦力在相邻水平平行管道上引起的附加荷载计算公式。探讨了管道净间距、直径、埋深以及土体泊松比对附加荷载分布的影响。分析结果表明, 采取注浆措施时后续管道摩擦力在相邻管道上产生较小的压力, 其峰值出现在开挖面后方。在正常施工时, 正面附加推力引起的附加荷载非常小, 使相邻管道开挖面前方产生压力、后方产生拉力, 以开挖面呈反对称分布。掘进机摩擦力引起的附加荷载分布规律与正面附加推力相似, 但零点位于掘进机中间部位相对应处, 其引起的附加荷载较大, 在三者共同作用中占主要地位, 应予以重视。

关 键 词: 平行顶管; 正面附加推力; 摩擦力; Mindlin 解; 附加荷载

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

Analysis of superimposed load induced by propulsion of adjacent level parallel pipe-jacking

WEI Gang, WEI Xin-jiang

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University College City, Hangzhou 310015, China)

Abstract: The computing formulas of superimposed load on adjacent level parallel pipe induced both by bulkhead additive thrust, force of friction between shield and soil, and force of friction between follow-up pipes and soil are derived from the Mindlin solution in elastic mechanics. The influences of pipe net spacing distance, pipe diameter, buried depth and soil's Poisson ratio on the distribution of superimposed load are discussed. The analytical results show that the pressure on adjacent level parallel pipe induced by force of friction between follow-up pipes and soil is small during injecting slurry; and the peak value appears at the back of excavation face. When construction is in normal, superimposed load induced by bulkhead additive thrust is very small. For adjacent level parallel pipes, pressure is produced in front of excavation face while pull force at the back. They distributed antisymmetrically with the axes of excavation face. Superimposed load induced by force of friction between shield and soil and is much larger than that of bulkhead additive thrust with its "zero point" at the middle of shield. The force of friction between shield and soil plays a leading role, thus, it should be considered highly during construction.

Key words: parallel pipe jacking; bulkhead additive thrust; force of friction; Mindlin solution; superimposed load

1 引 言

随着城市经济的发展, 地铁、越江隧道和合流污水管道等各种市政工程也应运而生, 盾构和顶管是其中最常见的两种隧道施工方式。由于城市地下空间的限制及各已建管线的存在, 近距离平行双线管道的施工已成为不可回避的课题。后施工顶管在施工过程中会在已建相邻管道上引起附加荷载, 产生危害。文献[1, 2]利用弹性力学的 Mindlin 解求得正面附加推力引起的土体附加应力计算公式及分布

规律。文献[3]分析了顶管正面附加推力在相邻水平平行管道上引起的附加荷载分布规律。但目前还没有考虑掘进机和后续管道与土体之间的摩擦力在相邻水平平行管道上引起的附加荷载, 因此, 有必要作进一步的研究。

本文利用弹性力学 Mindlin 解, 推导了正面附加推力、掘进机和后续管道与土体之间的摩擦力引起的土体附加应力计算公式, 分析了正面附加推力和摩擦力在相邻水平平行管道上引起的附加荷载分布规律。

收稿日期: 2004-01-24

修改稿收到日期: 2004-07-04

作者简介: 魏纲, 男, 1977 年生, 工学博士, 主要从事软土地基处理与顶管、盾构施工对周边环境影响的研究工作。E-mail: weig@zucc.edu.cn

2 力学分析模型及假定

水平平行顶管的相互作用是一个十分复杂的动态三维过程。后施工顶管会使周围土体产生附加应力, 从而在相邻管道上产生附加荷载。顶管施工引起土体附加应力的因素主要有:

(1) 正面附加推力 顶管施工过程中为了使开挖面土体稳定, 开挖面通常保证有足够的支护力, 产生正面附加推力 P , 即掘进机正面推力与静止土压力之差。在正常施工中, P 一般控制在 ± 20 kPa 之间^[4,5]。但在一些特殊情况下, 例如: 当推进前方存在不明障碍物、机头穿越不同土层交界面以及长时间停止顶进后又顶进时, 都可能产生较大的 P 。

(2) 摩擦力 顶进过程中掘进机和后续管道与周围土体之间会产生摩擦力, 当掘进机向前顶进时, 摩擦力会带动土体移动。文献[6]给出了 2 个浅埋顶管工程实例, 掘进机摩擦力分别为 14.2 kPa 和 20 kPa。文献[7]研究表明, 盾构侧面摩擦力对土层位移场的影响要比盾构正面压力大得多, 是影响周围土层的主要因素, 因此, 必须考虑掘进机与土体之间的摩擦力。后续管道在采取注浆减摩措施后产生的摩擦力较小。

(3) 土体损失 顶管施工过程中一方面由于土体开挖卸载; 另一方面, 掘进机尾部通过后由于掘进机外径较后续管道外径大 2~4 cm, 从而产生环形空隙。尽管采取注浆填充措施, 但仍不可避免地会产生土体损失, 进而引起地面沉降。但土体损失引起的土体附加应力较难计算。

从作用时间上看, 正面附加推力、掘进机和后续管道与土体之间的摩擦力首先产生作用, 随着掘进机的通过, 土体损失的作用才开始发挥出来。因此, 研究正面附加推力、掘进机和后续管道摩擦力在相邻管道上引起的附加荷载分布规律是非常有意义的, 研究时必须考虑这两个因素的共同作用。

顶管是在正常固结软土(包括黏土、粉土和淤泥等)中沿直线顶进, 不考虑掘进机偏斜和注浆压力。分析中假定: (1) 1 条管道已存在, 第 2 条管道水平平行于该管道顶进施工; (2) 不计已建管道本身刚度对荷载传递的影响; (3) 土体为均质线弹性半无限体; (4) 后施工顶管的推进面为荷载作用面, 将正面附加推力近似为圆形均布荷载^[3]; (5) 掘进机和后续管道与周围土体之间的摩擦力均匀分布;

(6) 掘进机的推进仅为空间位置上的变化, 不考虑时间效应。

图 1(a)为力学计算模型, 图中 D 为掘进机外直

径(m); D_1 为管道外直径(m); h 为后施工顶管轴线埋深(m); L 为掘进机长度(不包括刀盘长度, m); L_1 为后续管道总长度(m)。图 1(b)为双线平行顶管的相对位置示意图, S 为双线平行管道净间距(m)。

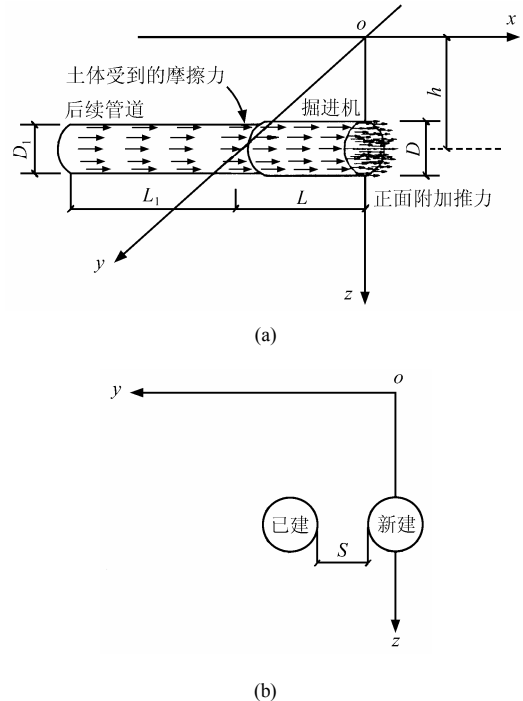


图 1 计算模型简图

Fig.1 Sketch of calculation model

3 附加应力计算

1936 年 Mindlin 给出了半无限弹性体内某深度处一水平集中力引起的土体附加应力计算公式^[8], 可以利用该解来推导正面附加推力和摩擦力引起的周围土体附加应力 σ_x , σ_y , σ_z 。对于水平平行顶管, σ_y 对相邻管道变形产生主要影响^[3,9], σ_x , σ_z 引起的附加荷载较小。因此, 本文仅讨论应力分量 σ_y 在相邻管道上引起的附加荷载分布。文中受力以压为正, 拉为负。

3.1 正面附加推力引起的附加应力

计算所取坐标系如图 1 所示, 在图中荷载作用圆截面内取微分面积 $rdrd\theta$, 利用 Mindlin 弹性解^[8], 通过直接积分得到圆形均布荷载作用下土体中任一点 (x, y, z) 的附加应力 σ_{y1} 为^[3]

$$\sigma_{y1} = \int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} \frac{Px}{8\pi(1-\mu)} \left\{ \frac{-1+2\mu}{M_1^3} - \frac{(1-2\mu)(3-4\mu)}{N_1^3} + \frac{3(y+r\cos\theta)^2}{M_1^5} + \frac{3(3-4\mu)(y+r\cos\theta)^2}{N_1^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N_1(N_1+z+h-r\sin\theta)^2} \right\} r dr d\theta$$

$$\left(1 - \frac{(y + r \cos \theta)^2 (3N_1 + z + h - r \sin \theta)}{N_1^2 (N_1 + z + h - r \sin \theta)}\right) - \frac{6(h - r \sin \theta)(h - r \sin \theta - (1 - 2\mu)(z + h - r \sin \theta))}{N_1^5} - \frac{30z(h - r \sin \theta)(y + r \cos \theta)^2}{N_1^7} \Bigg\} r dr d\theta \quad (1)$$

式中 $M_1 = \sqrt{x^2 + (y + r \cos \theta)^2 + (z - h + r \sin \theta)^2}$; μ 为土体泊松比; $N_1 = \sqrt{x^2 + (y + r \cos \theta)^2 + (z + h - r \sin \theta)^2}$ P 为掘进机正面附加推力(kPa)。

3.2 掘进机与土体之间的摩擦力引起的附加应力

计算所取坐标系见图 1。采用极坐标, 取掘进机壳体表面的微分面积 $R dr d\theta$, 利用 Mindlin 弹性解^[8], 通过直接积分得到掘进机与土体之间的摩擦力作用下土体中任一点 (x, y, z) 的附加应力 σ_{y2} 为

$$\sigma_{y2} = \frac{Rp}{8\pi(1-\mu)} \int_0^{2\pi} \int_0^L (x+r) \left\{ \frac{-1+2\mu}{M_2^3} - \frac{(1-2\mu)(3-4\mu)}{N_2^3} + \frac{3(y+R \cos \theta)^2}{M_2^5} + \frac{3(3-4\mu)(y+R \cos \theta)^2}{N_2^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N_2(N_2+z+h-R \sin \theta)^2} \right. \\ \left. \left(1 - \frac{(y+R \cos \theta)^2 (3N_2 + z + h - R \sin \theta)}{N_2^2 (N_2 + z + h - R \sin \theta)}\right) - \frac{6(h-R \sin \theta)(h-R \sin \theta - (1-2\mu)(z+h-R \sin \theta))}{N_2^5} - \frac{30z(h-R \sin \theta)(y+R \cos \theta)^2}{N_2^7} \right\} dr d\theta \quad (2)$$

式中 $M_2 = \sqrt{(x+r)^2 + (y+R \cos \theta)^2 + (z-h+R \sin \theta)^2}$; $N_2 = \sqrt{(x+r)^2 + (y+R \cos \theta)^2 + (z+h-R \sin \theta)^2}$; R 为掘进机半径(m); p 为掘进机与土体之间单位面积的摩擦力(kPa)。掘进机受到的法向压力成椭圆形, 顶部最小、底部最大^[5]。因此, 可近似取轴线处的垂直土压力作为平均压力, 则

$$p = \sigma_N f \quad (3)$$

式中 σ_N 为管道轴线处的法向压力(kPa), 等于土压力和地下水压力的合力, 土压力一般按郎肯主动土压力理论计算。对于不同的土质, σ_N 可以考虑水-土合算和水-土分算^[5]; f 为摩擦系数, 摩擦系数与土的特性密切相关, 其大小随着土强度的增大而增大^[10], 其取值可参考表 1 和文献[10]。

表 1 摩擦系数值^[11]

Table 1 Results of friction coefficient

土的种类	钢筋混凝土管			钢管		
	干燥	湿润	一般值	干燥	湿润	一般值
软土		0.20	0.20		0.20	0.20
黏土	0.40	0.20	0.30	0.40	0.20	0.30
砂黏土	0.45	0.25	0.35	0.38	0.32	0.34
粉土	0.45	0.30	0.38	0.45	0.30	0.37
砂土	0.47	0.35	0.40	0.48	0.32	0.39
砂砾土	0.50	0.40	0.45	0.50	0.50	0.50

3.3 后续管道与土体之间的摩擦力引起的附加应力

计算所取坐标系见图 1, 采用极坐标, 取管道表面的微分面积 $R_1 dr d\theta$, 利用 Mindlin 弹性解^[8], 通过直接积分得到后续管道与土体之间的摩擦力作用下土体中任一点 (x, y, z) 的附加应力 σ_{y3} 为

$$\sigma_{y3} = \frac{R_1 p_1}{8\pi(1-\mu)} \int_0^{2\pi} \int_L^{L+L_1} (x+r) \left\{ \frac{-1+2\mu}{M_3^3} - \frac{(1-2\mu)(3-4\mu)}{N_3^3} + \frac{3(y+R_1 \cos \theta)^2}{M_3^5} + \frac{3(3-4\mu)(y+R_1 \cos \theta)^2}{N_3^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N_3(N_3+z+h-R_1 \sin \theta)^2} \right. \\ \left. \left(1 - \frac{(y+R_1 \cos \theta)^2 (3N_3 + z + h - R_1 \sin \theta)}{N_3^2 (N_3 + z + h - R_1 \sin \theta)}\right) - \frac{6(h-R_1 \sin \theta)(h-R_1 \sin \theta - (1-2\mu)(z+h-R_1 \sin \theta))}{N_3^5} - \frac{30z(h-R_1 \sin \theta)(y+R_1 \cos \theta)^2}{N_3^7} \right\} dr d\theta \quad (4)$$

式中 $M_3 = \sqrt{(x+r)^2 + (y+R_1 \cos \theta)^2 + (z-h+R_1 \sin \theta)^2}$; $N_3 = \sqrt{(x+r)^2 + (y+R_1 \cos \theta)^2 + (z+h-R_1 \sin \theta)^2}$; R_1 为后续管道外半径(m); p_1 为后续管道与土体之间单位面积的摩擦力(kPa), 分为注浆与不注浆两种情况: 考虑注浆时, 根据施工经验和有关规范所给数据^[12], 混凝土管道在使用触变泥浆减阻措施顶进时的管壁侧面摩擦力为 3~5 kPa, 与埋深关系不大; 当不注浆时, p_1 的取值与 p 相似, f 取值可参考表 1 和文献[10]。

3.4 共同作用引起的附加应力计算

将正面附加推力、掘进机和后续管道与土体之间的摩擦力作用下土中任一点 (x, y, z) 产生的附加应力叠加, 得到总的附加应力为

$$\sigma_y = \sigma_{y1} + \sigma_{y2} + \sigma_{y3} \quad (5)$$

式 (1)、式 (2)、式 (4) 很难直接积分计算, 可令 $\theta = \pi + \pi t$, $t \in [-1, 1]$, 对式 (1)、式 (2)、式 (4) 进行积分变换, 然后采用定积分和 Gauss-

Legendre 数值积分^[13]相结合的方法进行求解。鉴于篇幅有限, 本文不具体展开。

4 附加荷载分布的影响因素分析

在分析中, 附加荷载承受点 (x, y, z) 为相邻管道内侧表面点, 取 $z = h \pm 0, 0.1D, 0.2D, 0.3D, 0.4D, 0.5D$, $y = S + D - \sqrt{D^2/4 - (z - h)^2}$, 分别计算附加应力 σ_y , 并求出沿轴向 x 分布的线荷载($z = h \pm 0, 0.1D, 0.2D, 0.3D, 0.4D, 0.5D$ 处各 σ_y 的和乘以 $D/11$), 即为附加线荷载 q_k (kN/m)。同时, 为便于分析附加荷载的影响因素及其影响程度, 本文在考虑某一因素的影响时, 均假定其他条件不变。考虑采用注浆减摩措施, 计算参数取值如下: $D = 2$ m, $S = 4$ m, $h = 10$ m, $L = 3.4$ m, $L_1 = 50$ m, $R_1 = 0.99$ m, $P = 20$ kPa, $\mu = 0.35$, $p = 30$ kPa, $p_1 = 4$ kPa。

4.1 共同作用引起的附加荷载分析

文献[2, 3]对正面附加推力的分布规律及影响因素进行了分析, 本文不再重复。如图 2 所示, 掘进机摩擦力引起的附加荷载分布规律与正面附加推力相似, 曲线呈反对称分布, 在相邻平行管道前方产生压力, 附加荷载迅速增加达到峰值, 随后逐渐下降; 在掘进机中间位置处附加荷载为 0, 在后方则产生拉力。由图 2 可见, 在正常施工时, 掘进机摩擦力在相邻管道上引起的附加荷载较大, 是影响附加荷载的主要因素, 这与文献[7]的结果相符。后续管道摩擦力在相邻管道上主要产生压力, 其峰值出现在开挖面后方。三者的共同作用如同在相邻管道上作用一个逆时针扭矩, 随着后施工顶管的前进, 这个扭矩也不断地前进, 相邻管道全线都会受到该扭矩作用, 如存在薄弱环节 (特别是接头处), 就有可能产生危害。

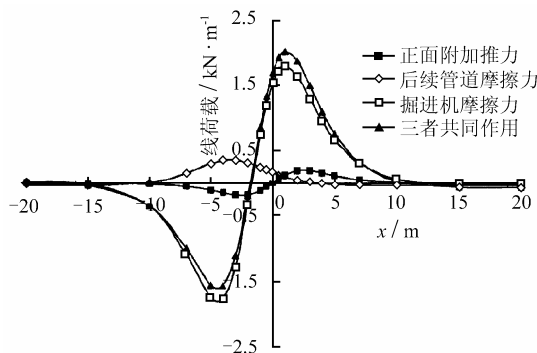


图 2 共同作用引起的附加荷载分布

Fig.2 Distributing of superimposed load under interaction

4.2 净距 S 变化时摩擦力引起的附加荷载分布

如图 3 所示, 随着 S 的减小, 总摩擦力引起的

附加荷载峰值明显变大, 且出现的位置向开挖面靠近, 其影响范围变小, 衰减速度则变快。在不同 S 下附加荷载在其峰值点连线两侧均衰减, 表明存在应力扩散现象。摩擦力使土体产生明显的拱效应, 在掘进机中间部位前方喇叭状区域内的土体会受到较大挤压。

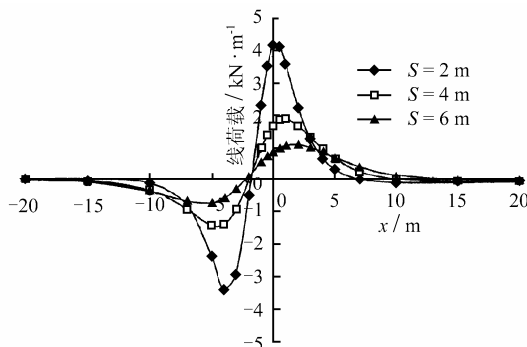


图 3 不同 S 时摩擦力引起的附加荷载分布

Fig.3 Distributing of superimposed load induced by friction with different S

4.3 管径 D 变化时摩擦力引起的附加荷载分布

城市双线平行顶管的管径大多在 1~3.5 m 左右, 管径变大, 掘进机的长度也要变大。分别取 $D = 1.2, 2, 3$ m, 相应的 $L = 2.6, 3.4, 4.0$ m。如图 4 所示, 随着管径增大, 总摩擦力引起的附加荷载峰值及影响范围都要明显地变大, 原因在于相邻受荷管道直径的相应增大, 但附加荷载的衰减速度随管径的变化较小。

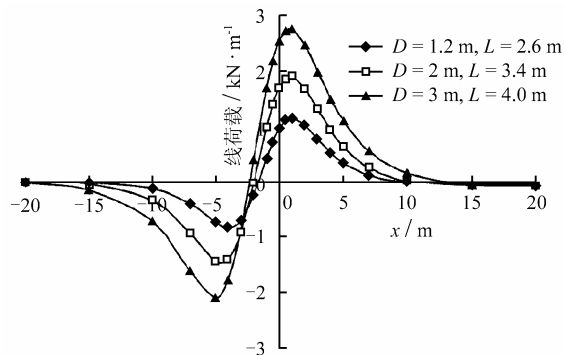


图 4 不同 D 时摩擦力引起的附加荷载分布

Fig.4 Distributing of superimposed load induced by friction with different D

4.4 埋深 h 变化时摩擦力引起的附加荷载分布

在实际工程中, 随着埋深的增大, 掘进机的摩擦力也会增大, 在均质土中摩擦力与埋深基本成正比。分别取 $h = 6, 10, 14$ m, 相应的 $p = 18, 30, 42$ kPa, p_1 值不变。如图 5 所示, 随着埋深的增大, 总摩擦力引起的附加荷载峰值明显变大, 且基本与

h 成正比, 但影响范围基本不变。另外, 附加荷载的衰减速度随埋深的变化也较小。

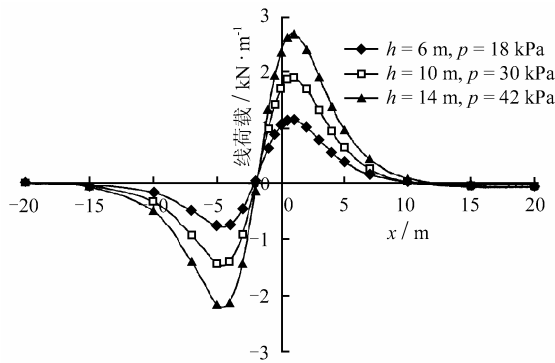


图 5 不同 h 时摩擦力引起的附加荷载分布
Fig.5 Distributing of superimposed load induced by friction with different h

4.5 泊松比 μ 变化时摩擦力引起的附加荷载分布

根据先前的均质土层假设, 影响附加荷载的土体参数主要是泊松比 μ , 在软土中其变化范围一般在 0.2~0.42 之间。假定 p 不变, 分别取 $\mu=0.25$, 0.35, 0.42。如图 6 所示, 随着 μ 的增大, 总摩擦力引起的附加荷载明显增大, 其影响范围也变大, 附加荷载的衰减速度则变化较小。在实际工程中, 随着土质变化, 掘进机摩擦力的取值也将产生变化, 土质越好(即 μ 越小), p 越大。因此, μ 的取值对附加荷载的影响较难判断, 必须根据实际情况通过计算来确定。

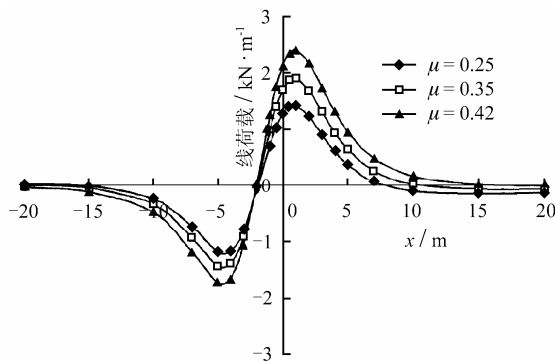


图 6 不同 μ 时摩擦力引起的附加荷载分布
Fig.6 Distributing of superimposed load induced by friction with different μ

5 结 语

利用 Mindlin 弹性解, 推导得到顶管正面附加推力、掘进机和后续管道与土体之间的摩擦力引起的土体附加应力计算公式。对于特定工程, 掘进机和后续管道与土体之间的摩擦力基本为定值, 相对比较稳定; 而正面附加推力则与开挖面支护压力相关, 是人为控制的, 易产生起伏。算例分析表明,

在正常施工时, 正面附加推力引起的附加荷载较小; 如采用注浆减摩措施, 后续管道摩擦力引起的附加荷载也较小; 掘进机摩擦力引起的附加荷载较大, 在三者的共同作用中起到主导地位, 应引起重视。

本文方法还可用于计算顶管施工对相邻不同位置处地下管线产生的附加荷载。文中假定土体为均质的线弹性半无限体, 不考虑纠偏和注浆, 可能与实际情况有所偏差, 可作进一步修正。

参 考 文 献

- [1] 张冬梅, 黄宏伟. 地铁盾构推进引起周围土体附加应力分析[J]. 地下空间, 1999, 19(5): 379—382.
ZHANG Dong-mei, HUANG Hong-wei. Analysis of additional stress of surrounding soil due to the driving of shield tunnel[J]. *Underground Space*, 1999, 19(5): 379—382.
- [2] 吴修锋. 顶管施工引起的地层移动与变形控制研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2004.
- [3] 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 introduced by propulsion of adjacent parallel pipe[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(1): 75—77.
- [4] 余彬泉, 陈传灿. 顶管施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998. 117—119.
- [5] 侯学渊, 钱达仁, 杨林德. 软土工程施工新技术[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1999. 189—196.
- [6] 方从启. 基于半解析元法研究顶管施工引起的地层运动[D]. 上海: 同济大学, 1998.
- [7] 廖少明, 余炎, 彭芳乐. 盾构近距离穿越相邻隧道施工的数值解析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 223—226.
LIAO Shao-ming, YU Yan, PENG Fang-le. Numerical analysis of shield tunneling construction through adjacent objects[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(Supp.2): 223—226.
- [8] Mindlin R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. *Physics*, 1936, 7(5): 195—201.
- [9] 余振翼, 魏纲. 顶管施工对相邻平行地下管线位移影响因素分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 441—445.
YU Zhen-yi, WEI Gang. Factors analysis of parallel underground pipelines displacements affected by pipe jacking[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(3): 441—445.
- [10] 许宏发, 王斌, 戴小平, 等. 桩土接触面力学参数取值研究[J]. 河海大学学报, 2001, 29(增刊): 54—56.
XU Hong-fa, WANG Bin, DAI Xiao-ping, et al. Determination of mechanical parameters on pile-soil interface[J]. *Journal of Hohai University*, 2001, 29(Supp.): 54—56.
- [11] 高乃熙, 张小珠. 顶管技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984. 62—70.
- [12] DBJ08-220-96. 上海市排水管道工程施工及验收规程[S].
- [13] 沈永欢, 梁在中, 许履珊, 等. 实用数学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2003.