

DOI: 10.11779/CJGE201609008

# 既有桩基对盾构施工参数的影响研究

张海彦<sup>1, 2</sup>, 何平<sup>\*1</sup>, 闫国新<sup>3</sup>, 王剑晨<sup>4</sup>, 刘喆<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国土木工程集团有限公司, 北京 100038; 3. 中国新兴保信建设总公司, 北京 100037;  
4. 北京城建设计发展集团有限公司, 北京 100034)

**摘要:** 盾构隧道施工邻近桥梁桩基已成为目前研究的热点问题。针对盾构施工参数取值在工程中的应用价值, 利用三维弹塑性有限元分析了桩基引起地层的竖向附加应力, 反推出了 Geedes 式中的桩端阻力、桩侧阻力分担桩顶荷载的比例系数与桩长的数学表达式, 并将 Geedes 竖向附加应力影响范围与 Randolph 提出的影响半径对比分析后, 给出了桩基影响区域和非影响区域的界定半径; 基于支护压力、注浆压力的理论取值范围及单位长度上土体损失量等于沉降槽面积的条件, 利用三维弹塑性有限元进行计算分析, 给出了支护压力、注浆压力在桩基非影响区域内的建议取值和土体损失的计算表达式; 基于桩基非影响区域内盾构施工参数的建议取值及桩基对地层产生的附加应力, 给出了桩基影响区域内盾构施工参数建议取值的数学表达式。研究表明: 工作面的土压力阻力选取工作面静止土压力合力, 注浆压力选取 1.1 倍的隧道埋深处水土压力时, 对地层的扰动较小。

**关键词:** 支护压力; 注浆压力; 土体损失; 附加应力

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)09-1615-10

作者简介: 张海彦(1982-), 男, 陕西榆林人, 博士。E-mail: haixinghero@163.com。

## Effects of existing pile foundation on parameters of shield tunneling

ZHANG Hai-yan<sup>1, 2</sup>, HE Ping<sup>1</sup>, YAN Guo-xin<sup>3</sup>, WANG Jian-cheng<sup>4</sup>, LIU Zhe<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China Civil Engineering Construction Corporation, Beijing 100038, China; 3. China Xinxing Baoxin Construction General Corporation, Beijing 100037, China; 4. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Limited, Beijing 100034, China)

**Abstract:** The shield tunneling adjacent to bridge pile foundation has become a hot issue at present. In view of the application value of parameters of shield tunneling in projects, the vertical additional stress of the pile foundation is analyzed by using a three-dimensional elastic-plastic finite element method. The mathematical expressions for pile length and proportional coefficient are derived. The radii of impact area and non-impact area of piles are defined by comparing the influence area of additional stress generated by piles with the influence radius put forward by Randolph. The optimal values of tunnel face pressure and grouting pressure in the non-impact area of piles are obtained through three-dimensional elastic-plastic finite element analysis based on the theoretical values of tunnel face pressure and grouting pressure. The expression for calculating the ground loss is introduced under the condition that the soil loss per unit length equals the area of settlement trough. By combining the optimal values of the parameters of shield tunneling in the non-impact area and the additional stress generated by piles, the mathematical expressions for the parameters of shield tunneling in the impact area are achieved. The results show that when the soil pressure resistance of tunnel face equals the static soil pressure of tunnel face and the grouting pressure equals 1.1 times the soil and water pressure on the top surface of tunnel, the disturbance of the soil strata is relatively slight.

**Key words:** tunnel face pressure; grouting pressure; ground loss; additional stress

## 0 引言

隧道临近或下穿既有桥梁结构作为现今城市地铁施工的重要情况之一, 如何保证既有桥梁结构的安全和正常使用以及盾构隧道的顺利掘进是施工的前提, 也是施工技术的难点。

在目前的国内外研究文献<sup>[1-2]</sup>中, 关于地铁隧道开

挖对既有桥梁结构影响的研究方法, 更易于被接受和应用的是两阶段法、整体法及室内试验法等。其中, 在分析盾构隧道施工对桩基附加内力和变形的影响时, 两阶段法、整体法及室内试验法均很少涉及既有

收稿日期: 2015-05-19

\*通讯作者 (E-mail: phe@bjtu.edu.cn)

桩基的存在对盾构施工参数的影响。此外，在以往的研究<sup>[3-4]</sup>中，盾构施工参数的取值主要取决于地层的初始应力。

然而，由于桩基的存在，使得地层会产生附加应力，因此，盾构施工参数的选取应取决于地层初始应力和桩基引起地层的附加应力。

鉴于此，本文将应用理论分析和数值模拟对桩基影响区域和非影响区域内的盾构施工参数进行研究，为类似工程提供一定的借鉴和参考。

## 1 桩基影响区域和非影响区域的界定

### 1.1 理论分析

Geedes<sup>[5]</sup>将垂直于边界的 Mindlin 半无限弹性体中任一点的应力解析解进行积分，导出了在单桩荷载作用下土体中所产生的应力公式。其假定条件为：将桩顶竖向荷载  $P$  分解为以集中力形式表示的桩端阻力荷载  $\alpha P$ 、沿桩身深度均匀分布形式表示的桩侧阻力  $\beta P$  荷载及沿桩身深度线性增长分布形式表示的桩侧阻力  $(1-\alpha-\beta)P$  荷载（如图1）。

在以上3种荷载作用下，土中任一点的竖向应力为<sup>[5]</sup>

$$\sigma_z = I_d(\alpha P/L^2) + I_{c1}(\beta P/L^2) + I_{c2}[(1-\alpha-\beta)P/L^2] \quad (1)$$
 式中  $P$  为桩顶竖向荷载； $\alpha$ 、 $\beta$  为桩端阻力和桩侧阻力分担桩顶荷载的比例系数； $I_d$  为桩端阻力任一点的竖向应力系数； $I_{c1}$  为桩侧均布阻力任一点的竖向应力系数； $I_{c2}$  为桩侧线性分布阻力任一点的竖向应力系数。

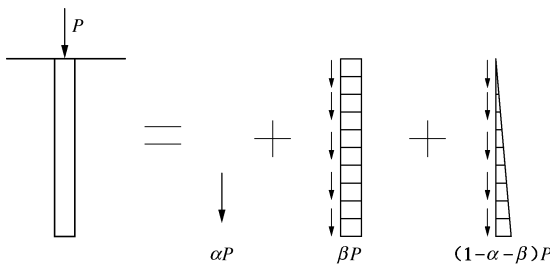


图1 单桩荷载分解示意图

Fig. 1 Load decomposition of a single pile

对于桩端阻力和桩侧阻力分担桩顶荷载的比例系数  $\alpha$ 、 $\beta$ ，Geedes 没有给出其具体值，但从桩基受力分析可知，比例系数的大小与桩的承载类型、桩长、桩径等有关。故可利用桩基、地层的三维弹塑性有限元计算结果及上式可反算出比例系数  $\alpha$ 、 $\beta$ 。

#### (1) 地层及桩基参数的选取

以北京地铁10号线的复合地层为研究对象，其物理力学参数见表1。表中： $\mu$  为泊松比； $k_0$  为静止侧

压力系数； $E_s$  为压缩模量； $\gamma$  为土体重度； $c$  为黏聚力； $\varphi$  为土体内摩擦角。

表1 复合地层物理力学参数

土层	$\mu$	$k_0$	$E_s/\text{MPa}$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^\circ)$	地层厚度/m
人工填土	0.38	0.76	6.50	19.00	10.00	8.00	3.00
粉土	0.32	0.45	22.00	20.00	15.00	25.00	7.00
卵石	0.35	0.25	78.00	21.50	0.00	45.00	4.00
砾岩	0.38	0.20	160.00	23.00	0.00	50.0	29.60

在北京地铁10号线所穿桥梁中，桥梁的下部结构多采用摩擦型桩<sup>[6]</sup>，故本节以摩擦型桩作为研究对象，桩基采用C20混凝土制成，其物理力学参数见表2。

表2 桩基的物理力学参数

桩基材料	重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比	弹性模量/MPa
C20	25.0	0.2	25.5

在有限元数值模拟中， $x$ 方向取66.6 m， $y$ 方向取46.3 m， $z$ 方向取54 m（如图2）。土体本构采用D-P准则，模拟单元采用SOLID45。桩基选用多线性等向强化MISO本构模型，模拟单元采用SOLID65。桩土间的相互作用采用库仑摩擦模型的接触单元，当等效摩擦力  $\tau_{eq}$  小于临界摩擦应力  $\tau_{cq}$  时，桩土无相对位移产生，当等效摩擦力  $\tau_{eq}$  等于临界摩擦应力  $\tau_{cq}$  时，桩土发生滑移，其计算式为

$$\tau_{eq} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} \quad (2)$$

$$\tau_{cq} = \xi p' \quad (3)$$

式中， $\xi$  为摩擦系数， $p'$  为接触压力值。

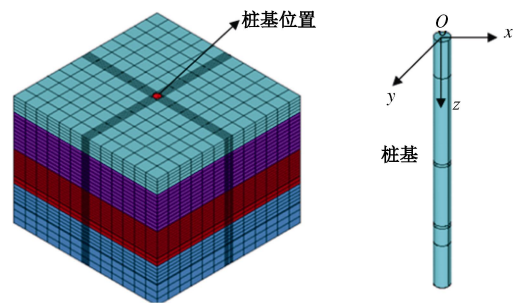


图2 单桩有限元计算模型

Fig. 2 FEM model for a single pile

#### (2) 计算工况的选取

以不同桩长，不同桩径进行工况组合，见表3。

#### (3) 比例系数的确定

选取土层中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  四点作为研究对象，其坐标为： $A(0, 1, 0.6L)$ ， $B(0, 1, 0.8L)$ ， $C(0.8, 1, 0.6L)$ ， $D(0.8, 1, 0.8L)$ 。

表3 摩擦型桩工况组合

Table 3 Case combinations of friction piles

竖向荷载/MPa	桩径/m	桩长/m		
		工况 1	工况 2	工况 3
1	1.2	10	15	20
1	1.5	10	15	20
1	1.8	10	15	20

竖向应力系数  $I_d$ ,  $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$  的计算值见表4。

表4 竖向应力系数值

Table 4 Values of vertical stress coefficient

桩径/m	桩长/m	研究点	竖向应力系数		
			$I_d$	$I_{c1}$	$I_{c2}$
1.2	10	A	57	111	264
		B	3203	24	79
		C	47	61	147
		D	1757	15	45
1.5	15	A	68	272	645
		B	5765	56	185
		C	62	158	377
		D	4230	33	111
1.8	20	A	71	499	1180
		B	7208	101	329
		C	68	296	703
		D	5994	60	200

桩基对土层产生的附加应力  $\sigma_z$  由有限元计算可得, 见表5。

表5 附加应力值

Table 5 Values of additional stress

桩径/m	桩长/m	附加应力/kPa			
		A	B	C	D
1.2	10	81	132	45	73
	15	95	145	56	79
	20	106	153	63	83
1.5	10	126	209	70	117
	15	149	225	87	125
	20	165	240	98	129
1.8	10	181	305	101	170
	15	215	322	125	181
	20	238	336	142	191

由表(4)、(5)及式(1)计算可得比例系数  $\alpha$ ,  $\beta$  值, 见表6。

由表6分析可知: 随着桩径的增加, 比例系数  $\alpha$ ,  $\beta$  变化很小, 可略去不计; 随着桩长的增加, 桩端阻力比例系数  $\alpha$  减小, 桩侧阻力比例系数  $\beta$  增大。提取其增加幅度, 以10 m桩长为基点, 则比例系数  $\alpha$ ,  $\beta$  随桩长的比例关系为

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 5.03\% - \frac{L-10}{5} \times 0.38\% \\ \beta &= 90.51\% + \frac{L-10}{5} \times 1.0\% \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### 1.2 影响区域和非影响区域的界定

Randolph等<sup>[7]</sup>提出桩的影响半径为

$$r_m = 2.5L\rho(1-\mu) \quad (5)$$

式中  $\rho$  为不均匀系数, 表示桩入土深度1/2处和桩端土的剪切模量之比,  $\rho = G(0.5L)/G(L)$ ;  $\mu$  为土体泊松比;  $L$  为桩长。

表6 比例系数值

Table 6 Values of proportion coefficient

桩径/m	桩长/m	比例系数	比例系数值/%		均值/%
1.2	10	$\alpha$	5.04	5.02	5.03
		$\beta$	90.57	90.45	90.51
	15	$\alpha$	4.61	4.55	4.58
		$\beta$	91.66	91.48	91.57
	20	$\alpha$	4.25	4.21	4.23
		$\beta$	92.74	92.61	92.68
1.5	10	$\alpha$	5.14	5.13	5.14
		$\beta$	90.53	90.41	90.47
	15	$\alpha$	4.68	4.62	4.65
		$\beta$	91.62	91.43	91.53
	20	$\alpha$	4.49	4.41	4.45
		$\beta$	92.71	92.58	92.65
1.8	10	$\alpha$	5.22	5.19	5.21
		$\beta$	90.50	90.39	90.45
	15	$\alpha$	4.72	4.69	4.71
		$\beta$	91.60	91.41	91.51
	20	$\alpha$	4.51	4.46	4.49
		$\beta$	92.68	92.53	92.61

由上式分析可知, 桩基的最大影响半径与桩长、土层性质有关。将复合土层中桩径1.2 m、不同桩长的有限元计算结果与Randolph等提出的最大影响半径 ( $\rho = 0.5$ ) 进行对比, 发现二者的计算结果较为接近 (见图3及表7)。基于此结论, 本文在计算桩基最大影响半径时, 按下式进行计算

$$r_m = 1.25L(1-\mu) \quad (6)$$

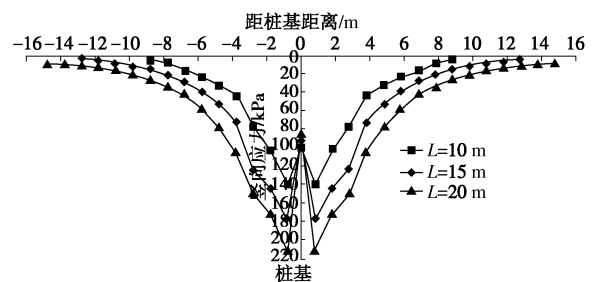


图3 桩底处地层竖向附加应力分布图

Fig. 3 Distribution of vertical additional stress of soil in pile tip

表7 桩基影响半径

Table 7 Influence radii of piles

桩径/m	桩长/m	理论计算值/m	解析计算值/m
1.2	10	8.1	8.8
1.2	15	12.2	12.8
1.2	20	15.5	14.8

在确定了桩基竖向附加应力的影响半径后, 按下式界定桩基的影响区和非影响区:

$$\left. \begin{array}{l} r \leq r_m \quad \text{影响区} \\ r > r_m \quad \text{非影响区} \end{array} \right\} \quad (7)$$

## 2 非影响区域内盾构施工参数的建议取值

在正常施工条件下，求解盾构施工引起的地层应力及位移时，需要确定的主要施工参数有：支护压力、注浆压力、盾壳与土体间摩擦力以及土体损失。

### 2.1 非影响区域内盾构施工参数的取值范围

在上述4个施工参数中，盾壳与土体间摩擦力与支护压力的选取有关，土体损失与支护压力及注浆压力的选取有关，故本节只确定支护压力及注浆压力的取值范围。

#### (1) 支护压力的取值范围

为简化计算，当忽略了牵引后方的拖车阻力及管片与盾尾间的摩擦力时，盾构机掘进推力  $F$  与盾壳与土体间的摩擦阻力  $F_m$ ，工作面的土压力阻力  $F_t$ ，刀盘切刀的贯入阻力  $F_d$  相平衡，有

$$F = F_t + F_m + F_d \quad (8)$$

工作面土压力的阻力  $F_t$  最小值取决于主动土压力，工作面土压力的阻力  $F_t$  最大值取决于被动土压力，可表示为

$$\left. \begin{array}{l} F_{t\min} = 2 \int_0^R \int_0^\pi \sigma_a r d\theta dr \\ F_{t\max} = 2 \int_0^R \int_0^\pi \sigma_p r d\theta dr \end{array} \right\} \quad (9)$$

式中， $\sigma_a$  为主动土压力； $\sigma_p$  为被动土压力<sup>[8]</sup>。

作用在盾壳外壳上的法向应力  $\sigma_N$  为

$$\sigma_N = \sigma_y \sin \theta + \sigma_z \cos \theta \quad (10)$$

$$\sigma_z = \sum \gamma_i z_i \quad (11)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = k_0 \sum \gamma_i z_i \quad (12)$$

式中  $\gamma_i$  为第  $i$  层土的重度； $z_i$  第  $i$  层土的厚度； $k_0$  为土的静止侧压力系数，按照半经验计算公式取值  $k_0 = 1 - \sin \varphi$ 。

将式(10)乘以摩擦系数后进行积分，可得盾壳与土体间的摩擦力为

$$F_m = 2 \int_0^{L'} \int_0^\pi (\sigma_y \sin \theta + \sigma_z \cos \theta) f R d\theta dl \quad (13)$$

式中， $f = 0.5 \tan \varphi$  为摩擦系数<sup>[9]</sup>， $L'$  为盾壳长度。

刀盘切刀的贯入阻力为

$$F_d = D \pi l (\tan \varphi \sum \gamma_i z_i + c) \quad (14)$$

式中， $l$  为切口环部长度，由盾构掘进速度与刀盘转速的比值得出。

假设盾构机掘进推力  $F$  均匀的作用在掌子面上，则由式(8)可得支护压力的计算公式为

$$p_t = (F_t + F_m + F_d) / (\pi R^2) \quad (15)$$

由上述理论的分析可知：在施工环境确定的条件下，工作面的土压力阻力在一定范围内是可调整的，盾壳与土体间的摩擦阻力、刀盘切刀的贯入阻力的大小是不可调整的。因此，为保证支护压力引起的地表变形最小，需要对工作面的土压力阻力进行试算，以便达到支护压力的最优选择。

#### (2) 注浆压力的取值范围

基于土层劈裂及隧道埋深处的水土压力，注浆压力的取值范围应符合：

$$p_e \leq p_z \leq p_f \quad (16)$$

式中， $p_f$  为劈裂压力， $p_e$  为隧道埋深处的水土压力， $p_z$  为注浆压力。

在确定劈裂压力时，劈裂的判别依据为<sup>[10]</sup>：注浆压力大于孔壁的总轴向应力及无侧限抗拉强度之和时，岩体发生劈裂。一般情况下，地层应力处于压应力状态，隧道开挖后，在土层中形成孔洞，为简化计算，近似采用双向受力无限大平板中孔洞应力计算公式进行计算(如图4)，则地层应力下圆孔周向应力分布为

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} \left( 1 + \frac{R_0^2}{R^2} \right) - \frac{\sigma_y - \sigma_z}{2} \left( 1 + \frac{3R_0^4}{R^4} \right) \cos 2\theta \quad (17)$$

式中， $R_0$  为隧道半径， $\sigma_z$  为竖向应力， $\sigma_y$  为水平应力。

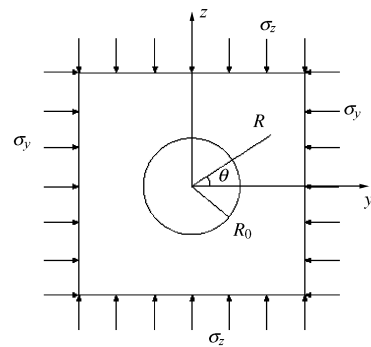


图4 应力分布图

Fig. 4 Distribution of stress

由孔洞应力理论及图4分析可知，在  $R_0 = R$ ， $\theta = 0^\circ$  或  $\theta = 180^\circ$  时， $\sigma_\theta$  最小，则有

$$\sigma_{\theta\min} = 3\sigma_z - \sigma_y \quad (18)$$

考虑初始地应力时，则总周向应力为

$$\sigma_{\theta\min} = 3\sigma_z - \sigma_y - p \quad (19)$$

基于劈裂的判别依据，有

$$p_f = 3\sigma_z - \sigma_y - p + p_u \quad (20)$$

将式(20)代入式(16)，可得注浆压力的取值范围为

$$\sigma_z \leq p_z \leq \frac{3}{2}\sigma_z + \frac{1}{2}(p_u - \sigma_y) \quad (21)$$

式中  $p_u$  为土体无侧限抗拉强度值;  $\sigma_z$  为隧道拱顶处的水土压力;  $\sigma_y$  为隧道轴线处的静止侧向土压力。

当注浆压力大于支护压力值时, 浆液会压入到掌子面前方的地层中, 故注浆压力还应满足:

$$\sigma_z \leq p_z \leq p_t \quad (22)$$

根据以上两点, 注浆压力的最终确定范围为

$$\sigma_z \leq p_z \leq \min(p_t, p_t) \quad (23)$$

### 2.2 非影响区域内盾构施工参数的建议取值

基于支护压力及注浆压力的理论取值范围, 将盾构施工参数引起的地层变形值进行对比分析, 给出支护压力、注浆压力建议取值。基于 Mindlin<sup>[11]</sup>解将支护压力在开挖面引起的三维土体位移转换为径向位移后, 给出土体损失的数学表达式, 并通过地层变形值对其进行修正。

#### (1) 地层及盾构计算参数取值

以地铁 10 号线粉土及卵石地层作为研究对象, 其物理力学参数见表 1。

隧道衬砌结构的混凝土等级为 C30, 其刚度用修正惯用法理论进行折减, 取刚度折减系数 0.8。盾壳长度  $L' = 8.78 \text{ m}$ , 衬砌宽度为 1.2 m。基本物理力学参数选取见表 8。

表 8 衬砌及注浆层的基本物理力学参数

Table 8 Physical and mechanic parameters of lining and grouting layer

名称	重度 ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	弹性模量 ( $\text{MPa}$ )	内半径/m	外半径/m
衬砌	24.0	0.2	$2.76 \times 10^4$	2.7	3.0
注浆层	20.0	0.2	1.20	3.0	3.1

在盾构隧道施工过程中, 衬砌脱离盾尾后, 隧道开挖壁和衬砌外半径面形成环形间隙, 土体向这一间隙产生移动, 浆液向土体渗入, 这一交互过程会形成土、水泥浆及水泥浆与土体的混合物, 其组成比例与土性, 浆液材料、注浆压力及注浆量有关, 故在理论分析中, 很难将其量化。作者考虑到衬砌脱离盾尾后形成的环形间隙并非等厚的, 并经 Peck 公式和有限元计算对比分析后<sup>[9]</sup>, 发现概化为一均质、不等厚度更为合适 (见图 5), 其计算公式为

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= \frac{2}{3} \alpha (2\Delta + \delta) \\ g_2 &= \frac{1}{3} \alpha (2\Delta + \delta) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中  $\Delta$  为盾尾厚度;  $\delta$  为拼装衬砌空间;  $\alpha$  为考虑注浆填充的折减系数。

为消除边界效应的影响, 计算模型  $x$  方向取 66.6 m,  $y$  方向取 46.3 m,  $z$  方向取 54 m。土体和等代层本构采用 D-P 准则, 模拟单元采用 SOLID45。隧道衬砌

材料选用多线性等向强化 MISO 本构模型, 模拟单元采用 SOLID65 (见图 6, 7)。掌子面施加顶进压力模拟开挖面土体的移动, 洞壁施加注浆压力模拟盾尾注浆过程, 隧道衬砌、注浆层及核心土采用生/死单元法模拟隧道掘进过程。开挖长度为 1 环衬砌宽度 (1.2 m)。

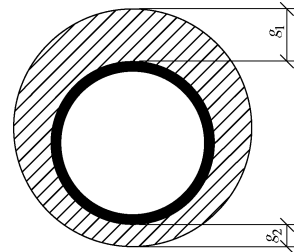


图 5 等代层示意图

Fig. 5 Grouting layer

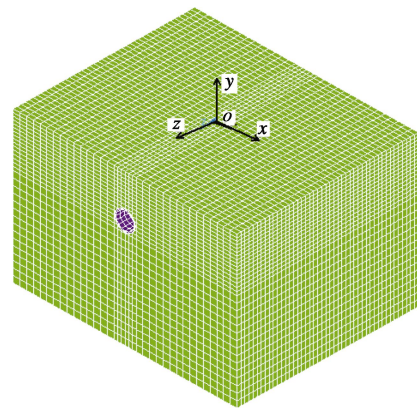


图 6 有限元整体计算模型

Fig. 6 FEM model

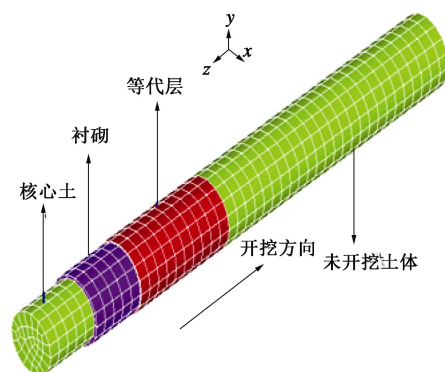


图 7 盾构隧道有限元计算模型

Fig. 7 FEM model for shield tunnel

#### (2) 支护压力的建议取值

由于浅埋隧道对地表变形的敏感性大, 故本节选取隧道埋深为 10 m。注浆压力选取其范围内的最小值, 工作面的土压力阻力  $F_t$  分别取主动土压力合力、静止侧向土压力合力及 1.1 倍的静止侧向土压力合力。则由式 (15) 计算的支护压力见表 9 所示。

表9 计算工况

Table 9 Computational cases

地层	隧道埋深/m	最小注浆压力/kPa	基于主动土压力计算的支护压力/kPa	基于静止侧向土压力计算的支护压力/kPa	基于1.1倍静止侧向土压力计算的支护压力/kPa
粉土	10	200	272.4	303.1	333.4
卵石	10	215	359.3	381.3	419.4

以掌子面前方的地表处土体作为研究对象，应用三维非线性有限元进行计算，粉土地层变形规律如图8所示，卵石地层变形规律如图9所示。

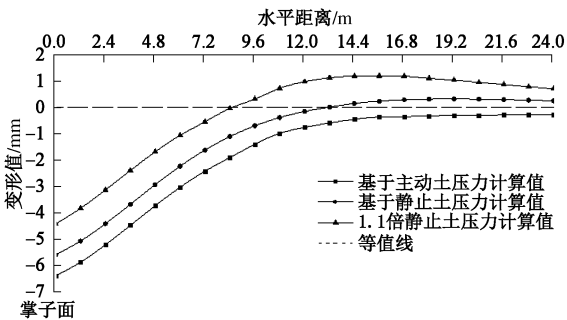


图8 粉土地层地表纵向变形值

Fig. 8 Values of longitudinal displacement of silt soil surface

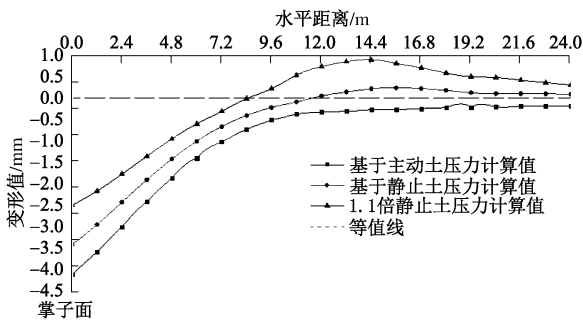


图9 卵石地层地表纵向变形值

Fig. 9 Values of longitudinal displacement of pebble soil surface

由图8及图9分析可知：

当支护压力基于主动土压力计算时，地表纵向变形整体表现为沉降；当支护压力基于静止侧向土压力计算时，地表纵向变形在掌子面前方12m左右表现为沉降和隆起；当支护压力基于1.1倍的静止侧向土压力计算时，地表纵向变形在掌子面前方8.4m左右表现为沉降和隆起。由此可以得出，随着支护压力的增大，地表变形的隆起点逐渐向掌子面靠近，隆起位移值逐渐增大，且掌子上方的地层竖向沉降值随着支护压力的增大而减小。

基于以上规律，将纵向变形曲线隆起点距掌子面较远且隆起值较小的基于静止侧向土压力计算后的支护压力作为建议取值。

(3) 注浆压力的建议取值

在隧道埋深为10m和粉土及卵石地层中，由式(23)可得注浆压力的选取范围为：

$$\text{粉土 } 200 \text{ kPa} \leq p \leq 303.1 \text{ kPa},$$

$$\text{卵石 } 215 \text{ kPa} \leq p \leq 381.3 \text{ kPa}.$$

以注浆压力取值范围的最小值为基点，支护压力选取建议值，计算工况的选取见表10。

表10 计算工况

Table 10 Computational cases

地层	隧道埋深/m	支护压力值/kPa	工况1	工况2	工况3	工况4
			$\gamma z$ /kPa	$1.1\gamma z$ /kPa	$1.2\gamma z$ /kPa	$1.3\gamma z$ /kPa
粉土	10	303.1	200.0	220.0	240.0	260.0
卵石	10	381.3	215.0	236.5	258.0	279.5

以地表处土体作为研究对象，应用三维非线性有限元进行计算，粉土地层变形规律如图10所示，卵石地层变形规律如图11所示。

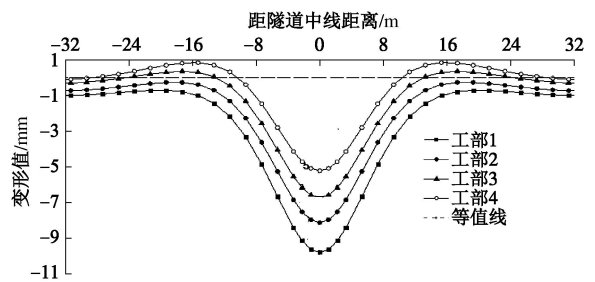


图10 粉土地表横向变形值

Fig. 10 Values of lateral displacement of silt soil surface

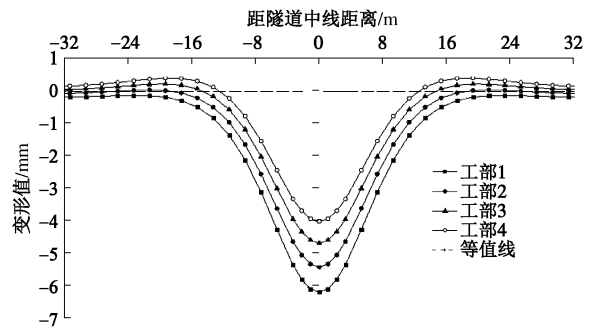


图11 卵石地表横向变形值

Fig. 11 Values of lateral displacement of pebble soil surface

由图10及图11分析可知：

当注浆压力小于 $1.1\gamma z$ 时，地表整体表现为沉降，隧道正上方的地表沉降达到最大值；当注浆压力大于 $1.1\gamma z$ 时，在隧道两侧14m左右的地表处出现隆起位移，并且随着注浆压力的增大，隆起位移值增大，隆起点向隧道正上方的地表处靠近。且地表处的位移值随着注浆压力的增大而减小。

基于以上规律，考虑到地表同时存在隆起和沉降

位移时, 会对既有结构基础造成差异沉降较大, 从而威胁到既有结构的安全。故此, 将  $1.1\gamma z$  作为注浆压力的建议取值。

(4) 土体损失的计算及修正

对于土体损失的计算, 本文采用Lee等<sup>[12]</sup>提出的两圆相切的土体移动模型 (见图12), 该模型较符合盾构隧道施工的实际情况, 并达到了广泛应用<sup>[13-14]</sup>。

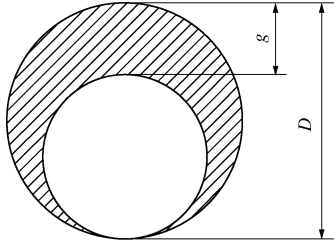


图12 盾构隧道两圆相切土体移动模型

Fig. 12 Soil movement model for shield tunnel under tangent two circles

由图12可知, 单位长度上的土体的损失量为

$$V_{\text{loss}} = \pi \left( \frac{2ag}{2} - \frac{g^2}{4} \right) \quad (25)$$

Lee等为反映隧道施工引起的地层损失, 引入总间隙参数, 其定义为

$$g = G'_p + U_{3D}^* + \omega \quad (26)$$

式中  $G'_p$  为物理间隙;  $U_{3D}^*$  为开挖面推进引起的等效三维径向位移;  $\omega$  与施工质量有关的参数。

对于物理间隙  $G'_p$ , 按下式确定:

$$G'_p = \alpha G_p = \alpha(2\Delta + \delta) \quad (27)$$

式中,  $\Delta$ ,  $\delta$ ,  $\alpha$  物理意义同上。

粉砂土层, 文献[13]  $\alpha$  取值为[0.1, 0.3], 文献[14]  $\alpha$  取值为[0.15, 0.3]。黏土地层中, 文献[13]  $\alpha$  取值为[0.2, 0.4], 文献[14]取值为  $\alpha = 0.116(H/D) - 0.042$ 。卵石地层中, 文献[13]  $\alpha$  取值为[0.3, 0.5]。

对于施工质量有关的参数  $\omega$ , 按文献[13]所给的方法确定, 即

$$\omega = \min(0.6G'_p, U_i/3) \quad (28)$$

$$\frac{U_i}{a} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{2(1+\mu)C_u}{E_u} \left[ \exp\left(\frac{\gamma H - P_i}{2C_u} - 0.5\right) \right]^2} \quad (29)$$

式中  $\mu$  为土体泊松比;  $C_u$  为土体不排水抗剪强度;  $E_u$  为土体不排水弹性模量;  $\gamma$  为土体重度;  $H$  为隧道中心至地表距离;  $P_i$  为隧道支撑力。

对于  $U_{3D}^*$ , 本文将支护压力在开挖面引起的三维土体位移经下式变换后等效为径向位移, 为

$$U_{3D}^* = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \quad (30)$$

式中, 对于支护压力引起的三维土体位移  $u_x, u_y, u_z$ , 本文将支护压力等效为集中力, 应用Mindlin解进行计算。

在平行于边界任一集中力作用下的半无限弹性体中 (见图13), Mindlin 基于 Galerkin 位移矢量和应力矢量本构给出了任一点的应力和位移解析解。

$$u_x = \frac{F}{16\pi G(1-\mu)} \left[ \frac{3-4\mu}{M} + \frac{1}{N} + \frac{x^2}{M^3} + \frac{(3-4\mu)x^2}{N^3} + \frac{2bz}{N^3} \left( 1 - \frac{3x^2}{N^2} \right) + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N+z+b} \left( 1 - \frac{x^2}{N(N+z+b)} \right) \right] \quad (31)$$

$$u_y = \frac{Fxy}{16\pi G(1-\mu)} \left[ \frac{1}{M^3} + \frac{3-4\mu}{N^3} - \frac{6bz}{N^5} - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N(N+z+b)^2} \right] \quad (32)$$

$$u_z = \frac{Fx}{16\pi G(1-\mu)} \left[ \frac{z-b}{M^3} + \frac{3-4\mu(z-b)}{N^3} - \frac{6az(z+b)}{N^5} - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N(N+z+b)} \right] \quad (33)$$

式中,  $M = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-b)^2}$ ,  $N = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+b)^2}$ ,  $b$  为力的作用点。

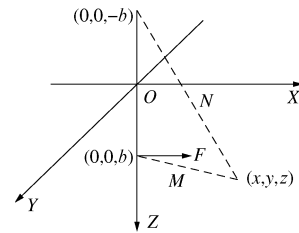


图13 弹性半空间体内水平集中力

Fig. 13 Horizontal concentrated force in elastic semi-infinite body

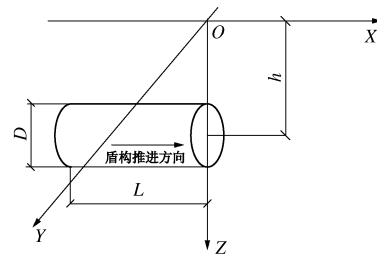


图14 盾构隧道位置示意图

Fig. 14 Diagram of shield tunnel position

将上述半无限弹性体的理论解应用到单线隧道中, 盾构隧道位置如图14所示。支护压力的作用点为  $b = h - r \sin \theta$ , 等效后的水平集中力为

$$F_i = \int_0^{2\pi} \int_0^a p_i r dr d\theta \quad (34)$$

式中,  $a$  为盾构隧道半径。

将式 (34) 代入到式 (31)、(32)、(33) 中, 则支护压力地层的变形计算公式为

$$u_x = \frac{P_t}{16\pi G(1-\mu)} \int_0^{2\pi} \int_0^a \left\{ \frac{3-4\mu}{M_1} + \frac{1}{N_1} + \frac{(3-4\mu)x^2}{N_1^3} + \frac{2z(h-r\sin\theta)}{N_1^3} \times \left( 1 - \frac{3x^2}{N_1^2} \right) + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N_1+z+h-r\sin\theta} \times \left[ 1 - \frac{x^2}{N_1(N_1+z+h-r\sin\theta)} \right] \right\} r dr d\theta \quad (35)$$

$$u_y = \frac{P_t x}{16\pi G(1-\mu)} \int_0^{2\pi} \int_0^a (y+r\cos\theta) \left[ \frac{1}{M_1^3} + \frac{3-4\mu}{N_1^3} - \frac{6z(h-r\sin\theta)}{N_1^5} - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N_1(N_1+z+h-r\sin\theta)^2} \right] r dr d\theta \quad (36)$$

$$u_z = \frac{P_t x}{16\pi G(1-\mu)} \int_0^{2\pi} \int_0^a \left[ \frac{z-h+r\sin\theta}{M_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z-h+r\sin\theta)}{N_1^3} - \frac{6z(h-r\sin\theta)(z+h-r\sin\theta)}{N_1^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N_1(N_1+z+h-r\sin\theta)} \right] r dr d\theta \quad (37)$$

$$M_1 = \sqrt{x^2 + (y+r\cos\theta)^2 + (z-h+r\sin\theta)^2} \quad (38)$$

$$N_1 = \sqrt{x^2 + (y+r\cos\theta)^2 + (z+h-r\sin\theta)^2} \quad (39)$$

式中  $x$  为推进方向离开挖面水平距离； $y$  为垂直于隧道轴线的水平距离； $z$  为离地面的竖向距离； $h$  为隧道轴线到地面的距离。

在假定土体不排水、体积不可压缩的条件下，Peck<sup>[15]</sup>认为沉降槽的体积等于土体损失的体积，也即单位长度上的土体损失量等于沉降槽面积。基于此，应用三维非线性有限元计算地表横向变形曲线，应用上述理论计算土体损失量。

在隧道埋深为 10 m，支护压力及注浆压力选取建议值时，工况组合见表 11。

表 11 计算工况

Table 11 Computational cases

围岩	隧道埋深/m	注浆压力/kPa	支护压力/kPa
粉土	10	220.0	303.1
卵石	10	236.5	381.3

由式 (26) 及式 (30) 可得总间隙参数  $g$  的计算公式为

$$g = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} + \alpha(2\Delta + \delta) + \min[0.6\alpha(2\Delta + \delta), U_i/3] \quad (40)$$

由有限元的计算结果可知，粉土及卵石地层的地表横向沉降曲线如图 15 所示。

沉降槽面积及单位长度上的土体损失量见表 12。

表 12 土体损失量及沉降槽面积值

Table 12 Values of ground loss and settlement trough area

地层	损失量/m <sup>2</sup>	面积/m <sup>2</sup>
粉土	0.098	0.120
卵石	0.067	0.081

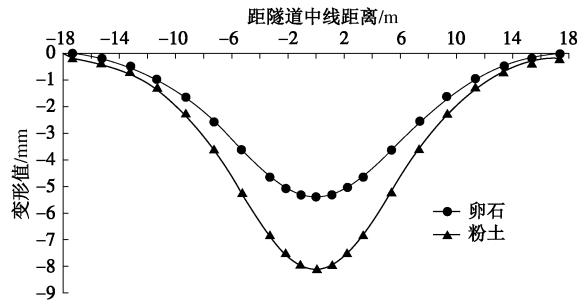


图 15 卵石及粉土地表横向变形值

Fig. 15 Values of lateral displacement of pebble and silt soil surface

将横向变形曲线的沉降槽面积与土体损失量进行对比分析后发现沉降槽面积大于土体损失量。其原因是：有限元法考虑了土层的非线性，而解析法只考虑了土层的线弹性。故用有限元的计算结果修正半弹性解析计算结果，则式 (40) 可变化为

$$g = 1.2 \times \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} + \alpha(2\Delta + \delta) + \min[0.6\alpha(2\Delta + \delta), U_i/3] \quad (41)$$

将式 (41) 代入到式 (25) 即可得到地层中的土体损失量。

### 3 影响区域内盾构施工参数的建议取值

在桩基的非影响区内，盾构施工参数的建议取值是基于地层初始应力进行分析的。但在桩基影响区内，桩基在其影响范围内有附加应力存在，故盾构施工参数的选取应基于地层初始应力及桩基附加应力的共同作用。桩基与盾构机位置关系见图 16。

#### 3.1 单桩影响区域内盾构施工参数的建议取值

结合地层的初始应力及桩基附加竖向应力的 Geeds 解，单桩附加应力影响半径范围内盾构施工参数的建议取值为

##### (1) 支护压力的建议取值

在忽略了牵引后方拖车阻力及管片与盾尾间的摩擦力时，盾构机掘进推力  $F$  与盾壳与土体间的摩擦阻力  $F'_m$ ，工作面的土压力阻力  $F_t$ ，刀盘切刀的贯入阻力  $F_d$  桩基引起的地层附加侧向应力相平衡。则支护压力建议取值的计算公式应为

$$p'_t = \frac{F_t + F'_m + F_d}{\pi R^2} + k_0 \frac{\sigma_{(h+R)} + \sigma_{(h-R)}}{2} \quad (42)$$

式中  $h$  为盾构机中心线至地表处距离； $\sigma_{(h-R)}$  为桩基引起的隧道拱顶处地层竖向附加应力； $\sigma_{(h+R)}$  为桩基引起的隧道拱底处地层竖向附加应力。 $\sigma_{(h-R)}$ ， $\sigma_{(h+R)}$  按式 (1) 进行计算。

工作面的土压力阻力  $F_t$  按静止侧向土压力的合理计算时，盾壳与土体间的摩擦阻力  $F'_m$  为



$$F_t = 2 \int_0^R \int_0^\pi r \sum \gamma_i z_i k_0 d\theta dr \quad (43)$$

$$F_m = 2 \int_0^L \int_0^\pi f [k_0 (\sigma_y + \sigma_{(h+R \cos \theta)}) \sin \theta + (\sigma_z + \sigma_{(h+R \cos \theta)}) \cos \theta] R d\theta dl \quad (44)$$

式中,  $\sigma_{(h+R \cos \theta)}$  为桩基引起的盾壳表面处地层竖向附加应力, 按公式 (1) 计算。

(2) 注浆压力的建议取值

基于桩基非影响区域内的注浆压力建议取值, 考虑桩基附加应力的影响, 则桩基影响区内的注浆压力建议取值为

$$p'_z = 1.1 \sum_{i=1}^n \gamma_i z_i + \sigma_{(h-R)} \quad (45)$$

式中,  $z_i$  为隧道上覆各土层的厚度。

(3) 土体损失的取值

基于桩基影响区内支护压力的建议取值, 将式 (42) 代入到式 (35) ~ (37) 中计算工作面处土体的三维土体位移, 将其代入到式 (41) 中, 可得土体间隙参数为

$$g' = 1.2 \times \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} + \alpha(2\Delta + \delta) + \min[0.6\alpha(2\Delta + \delta), U_i / 3] \quad (46)$$

将式 (46) 代入到式 (25) 中, 则土体损失量为

$$V'_{\text{loss}} = \pi \left( \frac{2ag'}{2} - \frac{g'^2}{4} \right) \quad (47)$$

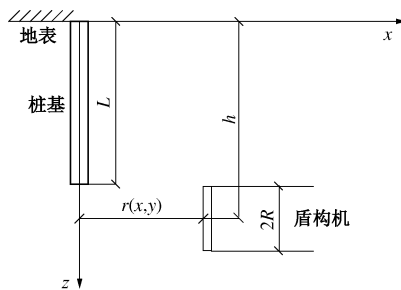


图 16 盾构机与桩基位置关系示意图

Fig. 16 Diagram of shield machine and pile position

3.2 群桩影响区域内盾构施工参数的建议取值

在群桩影响半径的相交区域内, 将桩基引起的地层附加应力进行叠加后, 代入到式 (42)、(45)、(47) 中, 可得出盾构施工参数的建议取值。

在群桩影响半径的非相交区域内, 盾构施工参数的建议性取值按单桩的建议取值选取。

4 结 论

本文通过理论分析及数值模拟, 研究了既有桩基对盾构施工参数的影响, 其结论为

(1) 用三维弹塑性有限元分析桩基引起地层的竖向附加应力, 反推出 Geedes 式中的桩端阻力、桩侧阻

力分担桩顶荷载的比例系数与桩长的数学表达式。并将 Geedes 竖向附加应力影响范围与 Randolph 提出的影响半径对比分析后, 给出桩基影响区域和非影响区域的界定半径。

(2) 在桩基非影响区域内, 基于主动土压力及被动土压力引起掌子面土体的滑移趋势, 给出支护压力的取值范围; 基于盾构机掘进推力与盾壳土体间的摩擦阻力、工作面的土压力阻力、刀盘切刀的贯入阻力之间的平衡关系, 给出支护压力的数学表达式; 基于三维弹塑性有限元的计算结果, 给出支护压力的建议取值。

(3) 在桩基非影响区域内, 基于土层劈裂、隧道埋深处的水土压力及支护压力, 给出注浆压力的选取范围; 基于三维弹塑性有限元的计算结果, 给出注浆压力的建议取值。

(4) 在桩基非影响区域内, 基于 Mindlin 解将支护压力在开挖面引起的三维土体位移转换为径向位移后, 给出土体损失的计算表达式。基于单位长度上土体损失量等于沉降槽面积的条件, 用三维弹塑性有限元计算结果对土体损失的计算表达式进行了修正。

(5) 在桩基影响区域内, 基于桩基非影响区域内盾构施工参数的建议取值, 结合桩基引起的附加地层应力, 给出盾构施工参数建议取值的数学表达式。

参考文献:

[1] 周正宇. 地铁施工邻近既有桥梁影响分析及主动防护技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. (ZHOU Zheng-yu. Research on effect and the active protection of neighboring exiting bridge with subway construction[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))

[2] LOGANATHAN N, POULOS H G. Centrifuge model testing of tunneling-induced ground and pile deformation[J]. Géotechnique, 2002, 50(3): 283 - 294.

[3] LEE Y J, BASSETT R H. Influences for 2D pile soil-tunneling interaction based on model test and numerical analysis[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2007, 22: 325 - 342.

[4] LEUNG C F, LIM J K, SHEN R F, et al. Behavior of pile groups subject to excavation induced soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2003, 129(1): 58 - 65.

[5] GEDDES J D. Stress in foundations soils due to vertical subsurface load[J]. Géotechnique, 1966, 16: 231 - 255.

[6] 何平, 苏斌, 苏艺. 地铁穿越桥梁结构影响与关键控制技术[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2014. (HE Ping, SU Bin, SU Yi. The effects on bridge structure and key

- control technology of subway crossing[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2014. (in Chinese)
- [7] RANDALPH M F, WORTH C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineering, 1978, **104**(GT12): 1465 - 1488.
- [8] MARCUS M, TRIUT P E. Soil mechanics technology[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1978.
- [9] 魏新江, 魏纲, 丁智. 城市隧道工程施工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011. (WEI Xin-jiang, WEI Gang, DING Zhi. City tunneling engineering construction technique[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011. (in Chinese))
- [10] 袁大军, 伊凡, 王华伟, 等. 超大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(10): 2074 - 2079. (YUAN Da-jun, YI Fan, WANG Hua-wei, et al. Study of soil disturbance caused by super-large diameter slurry shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(10): 2074 - 2079. (in Chinese))
- [11] MINDLIN R D. Force on a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics, 1936, **7**(5): 195 - 201.
- [12] LEE K M, ROWE R K, LO K Y. Subsidence owing to tunneling i: estimating the gap parameter[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**(6): 929 - 940.
- [13] 杨冠天, 项彦勇. 基于间隙参数模型的盾构隧道周围土体位移分析[J]. 岩土力学, 2005, **26**(10): 1602 - 1606. (YANG Guan-tian, XIANG Yan-yong. Analysis of ground movements due to shield tunneling by using a gap-parameter model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(10): 1602 - 1606. (in Chinese))
- [14] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高. 地铁隧道盾构法施工过程中地层变位的三维有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(5): 755 - 760. (ZHANG Hai-bo, YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao. 3D finite element simulation on deformation of soil mass during shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(5): 755 - 760. (in Chinese))
- [15] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceeding of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, 1969: 255 - 290.

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)