

DOI: 10.11779/CJGE2019S1043

# 软土地层大直径泥水盾构掘进引起的地面变形分析

吴昌胜<sup>1,2</sup>, 朱志铎<sup>2</sup>, 宋世攻<sup>3</sup>, 张军<sup>3</sup>, 彭宇<sup>4</sup>

(1. 常州工学院土木建筑工程学院, 江苏 常州 213032; 2. 东南大学江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096;

3. 中铁十九局集团轨道交通工程有限公司 北京 101300; 4. 无锡地铁集团有限公司建设分公司, 江苏 无锡 214000)

**摘要:** 为了研究大直径泥水平衡盾构施工引起的地层变形, 基于 Mindlin 解, 推导了在泥浆重度影响下开挖面不均匀附加压力、不均匀分布下盾壳摩擦力、环向消散下盾尾注浆压力引起的地层变形, 叠加地层损失引起的地层变形, 获得了大直径泥水平衡盾构施工引起地层变形的计算公式, 典型工程实例结果表明: ①不考虑泥浆重度、不均匀分布和环向消散等因素会高估地面纵向位移的隆起值而低估沉降值, 本文计算方法所得地面纵向位移与实测值吻合较好; ②本文方法计算所得的大直径泥水平衡盾构施工引起的地面横向位移与实测变形基本吻合, 且符合高斯曲线正态分布。研究成果可为控制和预测大直径盾构隧道施工引起的地层位移提供理论指导。

**关键词:** 大直径泥水盾构; 理论计算; Mindlin 解; 地层变形; 不均匀分布

中图分类号: TU433; U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0169-04

**作者简介:** 吴昌胜(1985—), 男, 讲师, 主要从事隧道与地下工程等方面的研究。E-mail: shengchangwu@126.com。

## Ground settlement caused by large-diameter slurry shield during tunnel construction in soft soils

WU Chang-sheng<sup>1,2</sup>, ZHU Zhi-duo<sup>2</sup>, SONG Shi-gong<sup>3</sup>, ZHANG Jun<sup>3</sup>, PENG Yu-yi<sup>4</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of

Urban Underground Engineering & Environmental Safety (Southeast University), Nanjing 210096, China; 3. Rail Transportation

Engineering Co., Ltd. of China Railway 19th Bureau Group Co., Ltd., Beijing 101300, China; 4. Wuxi Metro Group Co., Ltd., Wuxi

214000, China)

**Abstract:** To study the ground settlement caused by large-diameter slurry shield during tunnel construction in soft soils, the formulas are proposed on the basis of the Mindlin solutions. The effects of unit weight of slurry on the additional pressure around cutting head, the effects of shield gravity on the non-uniform distribution of softening skin frictions along the shield, the dissipation of grouting pressure along the lining rings and the ground deformation caused by volume loss ratio are considered in the proposed solutions. The calculated and field results are compared through a typical engineering case. The results show that: (1) Without considering the unit weight of slurry, non-uniform distribution and circumferential dissipation, the heave of ground longitudinal displacement is overestimated, and the settlement value is underestimated. The calculated results of longitudinal deformation by the proposed method are in good agreement with the measured results. (2) The calculated results of transverse deformation by the proposed method are in good agreement with the measured results. The transverse deformation of ground surface induced by large-diameter slurry shield is close to normal distribution. The results can provide scientific reference for the prediction and control of ground deformation induced by large-diameter slurry shield.

**Key words:** large-diameter slurry shield; theoretical calculation; Mindlin solution; ground settlement; non-uniform distribution

## 0 引言

如何准确预测和控制盾构隧道施工引起的地层位移一直是研究的重点与难点。现有研究成果<sup>[1-3]</sup>主要是基于中小直径泥水平衡盾构的基础上, 对于大直径泥水平衡盾构, 由于开挖断面增大, 继续沿用传统的针对中小直径盾构的方法来分析大直径盾构的地层变形就存在着非常大的不确定性<sup>[4]</sup>。本文在已有研究的基

础上, 以不均匀分布为基础, 进一步考虑开挖面泥浆重度、盾壳与周围土体残余摩擦力、盾尾注浆压力的环向消散, 结合地层损失引起的地层变形, 推导大直径泥水平衡盾构掘进阶段施工参数引起的地层变形计

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB057803)

收稿日期: 2019-04-30

算公式, 工程案例验证了本文计算方法的合理性。研究成果可为大直径泥水平衡盾构隧道施工提供指导, 具有一定的学术价值和工程应用意义。

## 1 大直径泥水盾构施工阶段受力模型

大直径泥水平衡盾构掘进施工阶段的力学模型如图1所示, 基本假定为: ①忽略盾构所占土体空间, 认为土体为半无限线弹性各向同性体; ②盾构水平掘进, 不考虑盾构姿态的改变; ③忽略盾构周围扰动土体及注浆结石体的固结沉降; ④盾尾注浆长度为一环管片宽度, 注浆压力在纵向上均匀分布; ⑤忽略各力之间的相互影响, 不考虑盾构推进过程中前一阶段产生的地层变形对后一阶段的影响。

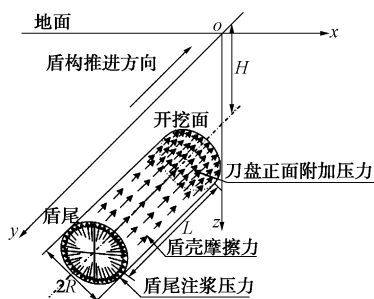


图1 大直径泥水平衡盾构掘进施工阶段力学模型

Fig. 1 Mechanical model for large-diameter shield tunnel

## 2 大直径泥水盾构施工阶段位移分析

### 2.1 Mindlin 基本解

Mindlin<sup>[5]</sup>推导出半无限弹性体内一点(0,0,c)作用有竖向集中荷载  $P_v$  和水平集中荷载  $P_h$  时空间任意一点  $(x', y', z')$  的竖向位移。

其中:  $P_v$  引起的竖向位移  $w_v$  为

$$w_v = \frac{P_v}{16\pi G(1-\nu)} \left[ \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{(z'-c)^2}{R_1^3} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{R_2} + \frac{(3-4\nu)(z'+c)^2 - 2cz'}{R_2^3} + \frac{6cz'(z'+c)^2}{R_2^5} \right]; \quad (1)$$

$P_h$  引起的竖向位移  $w_h$  为

$$w_h = \frac{P_h y'}{16\pi G(1-\nu)} \left[ \frac{z'-c}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z'-c)}{R_2^3} - \frac{6cz'(z'+c)}{R_2^5} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z'+H-r\sin\theta)} \right]. \quad (2)$$

式中  $\nu$  为土体泊松比;  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  为土体剪切刚度;  $E$  为土体弹性模量;  $R_1 = \sqrt{x'^2 + y'^2 + (z'-c)^2}$ ;

$R_2 = \sqrt{x'^2 + y'^2 + (z'+c)^2}$ ;  $\alpha = \sin^{-1} \frac{y'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}}$ ;  $c$  为

竖向集中荷载作用点的深度;  $x', y', z'$  分别为所求点的横坐标、纵坐标和竖坐标。

实际工程中无法确保每个荷载作用点都在  $z$  轴上, 应用 Mindlin 解时需要进行一定的坐标变换。设局部坐标系  $x', y'$  距全局坐标系原点的距离分别为  $m, n$ , 则坐标变换公式为

$$\begin{cases} x' = x - m \\ y' = y - n \\ z' = z \end{cases}. \quad (3)$$

相应的  $R_1, R_2, \alpha$  变为  $R_1 = \sqrt{(x-m)^2 + (y-n)^2 + (z-c)^2}$ ,

$$R_2 = \sqrt{(x-m)^2 + (y-n)^2 + (z+c)^2}, \quad \alpha = \sin^{-1} \frac{y-n}{\sqrt{(x-m)^2 + (y-n)^2}},$$

其他符号意义同上。

### 2.2 大直径泥水盾构正面附加压力引起的地层变形

现有研究结果<sup>[4,6]</sup>显示当开挖直径较小时, 可以忽略泥浆重度, 随着直径的增大, 开挖面顶端和底端侧向压力的压差将不容忽视。因此, 本节给出考虑泥浆重度影响的大直径泥水平衡盾构正面附加压力引起的地层变形计算公式。

开挖面上不均匀支护压力  $q$  与开挖面中心处支护压力  $q_0$ 、泥浆重度  $\gamma_{sl}$  的关系式为

$$q = q_0 - k_{sl} \gamma_{sl} r \sin \theta, \quad (4)$$

式中  $k_{sl}$  为泥浆侧压力系数;  $r$  为开挖面上点的竖向坐标,  $r \in [-R, R]$ ;  $\theta$  为该点与  $x$  轴正向的夹角, 以逆时针为正。

将  $m = r \sin \theta, n = 0$  代入式(3)中, 所得结果再代入式(2), 结合  $c = H - r \sin \theta$ , 积分可得

$$w_{1q} = \int_0^R \int_0^{2\pi} q r dr d\theta \frac{y}{16\pi G(1-\nu)} \left[ \frac{z - (H - r \sin \theta)}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z-H+r\sin\theta)}{R_2^3} - \frac{6(H-r\sin\theta)z(z+H-r\sin\theta)}{R_2^5} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z+H-r\sin\theta)} \right], \quad (5)$$

式中,  $R$  为盾构外径。  $R_1, R_2$  分别为:

$$R_1 = \sqrt{(x - r \cos \theta)^2 + y^2 + (z - H + r \sin \theta)^2};$$

$$R_2 = \sqrt{(x - r \cos \theta)^2 + y^2 + (z + H - r \sin \theta)^2}.$$

### 2.3 考虑不均匀分布的盾壳摩擦力引起的地层变形

随着开挖直径的增大, 盾壳与周围土体摩擦力不均匀分布的影响不可忽略<sup>[3]</sup>。参考文献[3]中的计算方法可得大直径泥水盾构盾壳与周围土体不均匀摩擦力  $f$  的计算公式:

$$f = \tau = \beta_s \sigma'_\theta \tan \delta', \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_\theta &= \sigma'_v \sin^2 \theta + \sigma'_h \cos^2 \theta \\ \sigma'_v &= \gamma H - \gamma R \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中  $\tau$  为盾壳与周围地层的剪应力;  $\beta_s$  为残余摩阻力与极限摩阻力的比值, 取值介于 0.83~0.97;  $\sigma'_\theta$  为盾壳上任一点受到的地层径向正应力;  $\delta'$  为盾壳与周围地层的界面摩擦角, 对黏土,  $\delta'$  取值介于  $6.5^\circ \sim 9.0^\circ$ ;  $\sigma'_v$ ,  $\sigma'_h$  ( $\sigma'_h = K_0 \sigma'_v$ ) 分别为计算点的竖向和水平向土压力;  $K_0$  为侧向静止土压力系数;  $\gamma$  为土体重度;  $H$  为隧道轴线埋深;  $R$  为隧道半径;  $\theta$  为计算点与  $x$  轴正向的夹角, 以逆时针旋转为正。

将  $m = R \cos \theta$ ,  $n = -l$ ,  $c = H - R \sin \theta$ , 及式 (6) 所得  $f$  代入式 (2), 积分可得任意一点的竖向位移  $w_{2f}$ :

$$w_{2f} = \int_0^L \int_0^{2\pi} \frac{f R d\theta d(y+l)}{16\pi G(1-\nu)} \left[ \frac{z - (H - R \sin \theta)}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z - H + R \sin \theta)}{R_2^3} - \frac{6(H - R \sin \theta)z(z + H - R \sin \theta)}{R_2^5} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2 + z + H - R \sin \theta)} \right] \quad (8)$$

式中  $L$  为盾壳长度;  $R_1$ ,  $R_2$  分别为

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \sqrt{(x - R \cos \theta)^2 + (y + l)^2 + (z - H + R \sin \theta)^2} \\ R_2 &= \sqrt{(x - R \cos \theta)^2 + (y + l)^2 + (z + H - R \sin \theta)^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

## 2.4 考虑环向消散的盾尾注浆压力引起的地层变形

大直径泥水盾构隧道注浆孔之间的距离较大<sup>[7]</sup>, 浆液在盾尾间隙内的环向流动距离增大。因此, 考虑盾尾注浆压力在纵断面内的消散, 参考文献[8]可得

$$p = p_k + \rho g R (\cos \alpha_k - \cos \alpha) \pm B(\alpha_k - \alpha) \quad (10)$$

式中  $p$ ,  $p_k$  分别为计算点、注浆孔  $k$  的注浆压力;  $\rho$  为盾尾注浆浆液的密度;  $g$  为重力加速度;  $\alpha$ ,  $\alpha_k$  分别为计算点、注浆孔  $k$  与竖直方向之间的夹角; “ $\pm$ ” 表示浆液向下扩散时取“+”, 浆液向上扩散时取“-”;  $\mu$  为浆液的塑性黏度系数;  $q$  为单个注浆孔的注浆量;  $b$  为盾尾间隙的大小即环饼宽度;  $\delta$  为环饼厚度; 浆液为牛顿流体时取  $B = \frac{12R\mu q}{b\delta^3}$ , 浆液为宾汉姆流体时  $B$  可由下式求得:

$$B^3 - \left( \frac{3R\tau_0}{\delta} + \frac{12R\mu q}{b\delta^3} \right) B^2 - \frac{4R^3\tau_0^3}{\delta^3} = 0 \quad (11)$$

其中,  $\tau_0$  为盾尾注浆浆液的静切力。

将  $m = R \cos \theta$ ,  $n = L + s$ ,  $c = H - R \sin \theta$ , 及式 (10) 所得注浆压力代入式 (1), 积分可得竖向位移  $w_{3p_v}$ :

$$w_{3p_v} = \int_0^S \int_0^{2\pi} \frac{P \sin \theta R d\theta d\theta}{16\pi G(1-\nu)} \left[ \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{(z - H + R \sin \theta)^2}{R_1^3} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{R_2} + \frac{(3-4\nu)(z + H - R \sin \theta)^2 - 2(H - R \sin \theta)z}{R_2^3} + \frac{6(H - R \sin \theta)z(z + H - R \sin \theta)}{R_2^5} \right] \quad (12)$$

式中  $S$  为注浆长度, 根据假定, 其值等于一环管片的宽度;  $R_1$ ,  $R_2$  分别为

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \sqrt{(x - R \cos \theta)^2 + (y + L + s)^2 + (z - H + R \sin \theta)^2} \\ R_2 &= \sqrt{(x - R \cos \theta)^2 + (y + L + s)^2 + (z + H - R \sin \theta)^2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

## 2.5 地层损失引起的地层变形

魏纲等<sup>[1]</sup>在 Segasta 模型的基础上给出了地层损失引起地面位移的修正公式:

$$w_{4v} = 2(1-\nu) \frac{V_s}{\pi} \frac{H}{x^2 + H^2} \left[ 1 - \frac{y+L}{\sqrt{(y+L)^2 + x^2 + H^2}} \right] \exp \left[ -\frac{1.38x^2}{(H+R)^2} \right] \quad (14)$$

式中,  $V_s$  为单位长度地层损失, 其他符号意义同上。

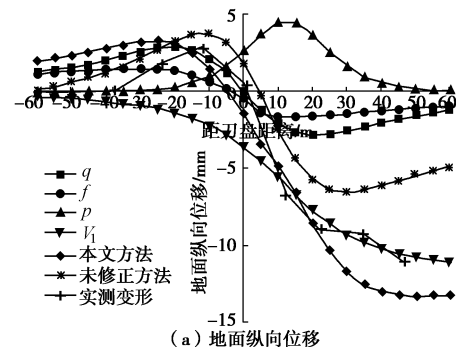
## 2.6 大直径盾构掘进施工阶段引起的总地层变形

将前文所述正面附加压力、盾壳摩擦力、盾尾注浆压力以及地层损失引起的地层变形叠加, 即可得到大直径盾构掘进施工阶段总的地层变形:

$$w = w_{1q} + w_{2f} + w_{3p_v} + w_{4v} \quad (15)$$

## 3 算例验证

某大直径泥水盾构刀盘外径为 11.65 m, 管片外径为 11.3 m, 内径为 10.3 m, 管片宽度为 2 m。本文选取 EN2 断面进行验证, 参考文献[2], 轴线埋深为 26.72 m, 加权平均重度为 19.49 kN/m<sup>3</sup>, 静止侧压力系数为 0.219, 内摩擦角为 33.3°, 土体泊松比为 0.28, 剪切模量为 10 MPa, 正面附加压力为 40 kPa, 泥浆重度为 14 kN/m<sup>3</sup>。竖向土压力用公式 (7) 计算, 不均匀摩擦力用公式 (6) 计算。  $\beta_s$  取为 0.83,  $\delta'$  取为  $6.5^\circ$ 。注浆浆液的水灰比为 1.875, 视为牛顿流体<sup>[9]</sup>, 塑性黏度系数为 0.28 Pa·s, 截面流量为  $3.16 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}$ , 盾尾间隙为 0.175 m, 掘进速度为  $0.433 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ , 根据文献[8]的结果, 浆液充填盾尾间隙到达环向最远处的时间暂取 60 s, 浆液流动环饼厚度即盾构推进的距离为 0.01299 m, 则参数  $B=1950.37$ , 浆液密度取 1.6 g/cm<sup>3</sup>, 注浆压力取为 300 kPa, 地层损失率取 0.35%。关于此断面的详细地层情况、施工参数和地面沉降监测信息可参考文献[2]。该断面的计算值和实测值对比结果如图 2 所示。



(a) 地面纵向位移

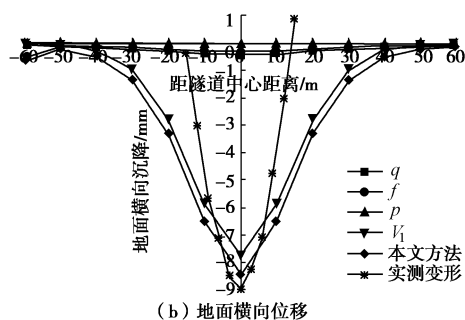


图 2 杭州庆春路隧道地面位移

Fig. 2 Deformations of ground surface caused by construction of Qingchun road tunnel

(1) 从图 2(a) 可得本文考虑泥浆重度、不均匀分布和环向消散作用所得的计算结果与实测变形吻合较好, 尤其是在开挖面前方 (15 m) 大约 1.5 倍盾构长度与开挖面后方 (20 m) 大约 2 倍盾构长度之间能够较准确的预测地层的隆起和沉降。不考虑以上三种因素, 会高估地层的隆起值而低估地层的沉降值 (未修正方法)。表明本文方法能较好地反映黏土地层大直径泥水盾构施工引起的地面纵向变形规律。

(2) 从图 2(b) 可得本文方法所得结果与实测变形基本吻合, 再次验证了本文方法的合理性。大直径泥水盾构正面附加压力、盾壳摩擦力、注浆压力、地层损失引起的地面横向沉降以及总变形均关于  $z$  轴对称。

## 4 结 论

随着盾构开挖直径的增大, 采用传统 Mindlin 解所得的计算结果会高估地层的隆起值而低估地层的沉降值。考虑不均匀分布、泥浆重度、环向消散等因素的影响, 结合地层损失引起的地面沉降, 推导所得的大直径泥水盾构施工引起地层位移的计算公式是合理的, 能够较好地反映地层位移的发展规律, 研究成果可为控制和预测大直径盾构隧道施工引起的地层位移提供理论指导。

### 参考文献:

- [1] 魏 纲, 张世民, 齐静静, 等. 盾构隧道施工引起的地面变形计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 1): 3318 - 3323. (WEI Gang, ZHANG Shi-ming, QI Jing-jing, et al. Study on calculation method of ground deformation induced by shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S1): 3318 - 3323. (in Chinese))
- [2] LIN C G, ZHANG Z M, WU S M, et al. Key techniques and important issues for slurry shield under-passing embankments: a case study of Hangzhou qiantang river tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, **38**(9): 306 - 325.
- [3] 梁荣柱, 夏唐代, 林存刚, 等. 盾构推进引起地表变形及深层土体水平位移分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(3): 583 - 593. (LIANG Rong-zhu, XIA Tang-dai, LIN Cun-gang, et al. Analysis of ground surface displacement and horizontal movement of deep soils induced by shield advancing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(3): 583 - 593. (in Chinese))
- [4] 徐 明, 邹文浩, 刘 瑶. 超大直径泥水盾构在砂土中的开挖面稳定性分析[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(3): 174 - 181. (XU Ming, ZOU Wen-hao, LIU Yao. Face stability of large slurry shield-driven tunnel in sands[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(3): 174 - 181. (in Chinese))
- [5] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Journal of Applied Physics, 1936, **7**(5): 195 - 202.
- [6] LI Y, EMERIAULT F, KASTNER R, et al. Stability analysis of large slurry shield-driven tunnel in soft clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, **24**(4): 472 - 481.
- [7] ZHOU S, LI X, JI C, et al. Back-fill grout experimental test for discharged soils reuse of the large diameter size slurry shield tunnel[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, **21**(3): 1 - 9.
- [8] 苟长飞, 叶 飞, 张金龙, 等. 盾构隧道同步注浆充填压力环向分布模型[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(3): 590 - 598. (GOU Chang-fei, YE Fei, ZHANG Jin-long, et al. Ring distribution model of filling pressure for shield tunnels under synchronous grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(3): 590 - 598. (in Chinese))
- [9] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(15): 2709 - 2714. (RUAN Wen-jun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(15): 2709 - 2714. (in Chinese))

(责编: 明经平)