

# 盾构法施工隧道地层变形时空统一预测方法研究

施成华, 彭立敏, 雷明锋

(中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075)

**摘要:** 从经典的 Mindlin 弹性理论公式出发, 基于盾构施工工作面推力为圆形均布荷载、盾构外壁与土层的摩擦力均匀分布等假定的基础上, 考虑盾构施工推进过程中盾构机位置不断变化的实际情况, 建立了盾构施工推进过程的力学计算模型, 由此推导了盾构推进工作面附加压力以及盾构机外壁与土层摩擦力作用下隧道周边任意位置地层变形的计算公式。基于随机介质理论, 充分考虑隧道开挖施工引起的地层变形的时间和空间发展过程, 推导了盾构推进地层损失引起的地层变形计算公式。通过工程实例计算, 对盾构隧道施工地层变形的时空变化过程进行了研究, 计算结果同实测结果具有良好的一致性。

**关键词:** 盾构隧道; 地层变形; 随机介质; 时空统一预测方法

**中图分类号:** U 451

**文献标识码:** A

## Study of time-space united calculating method of stratum deformation caused by shield tunnel excavation

SHI Cheng-hua, PENG Li-min, LEI Ming-feng

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** Based on the two hypotheses: (1) the force on shield working force is round and well-distribution; (2) the frictional force between the out surface of shield and surrounding soil is also well-distribution; the mechanical calculation model of shield is established by using the classical elastic theory of Mindlin. In this model, the changeable location of shield is considered when shield is working. Then the stratum deformation calculating formulas around tunnel caused by the additional force on the shield working force and the frictional force between the out surface of shield and surrounding soil are deduced. According to the stochastic medium theory, the stratum deformation caused by the loss of stratum which resulted from shield tunnel construction is deduced, in which the time-space effect of stratum deformation caused by tunnel construction is considered. A case of history is calculated and the time-space change rules of stratum deformation are studied finally.

**Key words:** shield tunnel; stratum deformation; stochastic medium; time-space united calculating method

## 1 引言

近年来, 随着我国城市建设的发展, 为了改善交通状况, 许多大城市开始修建地铁。城市地铁由于埋深浅, 其开挖必然会对地层产生或多或少的影 响, 使隧道上部地层产生沉降、水平位移等, 从而造成对地面既有建筑物以及地下管线等设施的破坏。对于处于软土地区的地铁隧道, 为减小隧道开挖对地层的扰动, 通常采用盾构法进行施工, 但隧道施工对地表及地下管道等设施产生的影响仍是不可避免的。

对于盾构隧道施工引起的地表移动问题, 各国学者在现场实测和模型试验的基础上, 提出了许多

地表沉降的估算公式<sup>[1-5]</sup>, 但这些研究大多仅限于平面问题, 没有考虑变形的空间分布, 也没有考虑变形随时间的变化过程。本文从经典的 Mindlin 弹性理论公式出发, 考虑盾构施工推进过程中盾构机位置不断变化的实际情况, 建立了盾构施工推进过程的力学计算模型, 由此推导了盾构推进工作面附加压力以及盾构机外壁与土层摩擦力作用下隧道周边地层变形的计算公式, 解决了盾构法施工隧道工作面附近地层变形在时间和空间上的准确计算问题。

## 2 盾构施工地层变形的影响因素

盾构推进施工过程中必然对周围土体产生扰动, 表现为地层沉降和侧向变形。根据分析, 盾构

推进施工所引起的地层移动和变形的影响因素可主要归结为以下几个方面:

(1) 盾构机工作面的附加推力。在盾构施工过程中,开挖面的支护力不可能完全等于原岩应力。当盾构开挖面的支护力大于原始土压力时,正面土体受到挤压向前向上移动,从而使地表有微小的隆起;反之,当盾构开挖面的支护力小于原始土压力时,开挖面土体向盾构内移动,从而使地表表现为沉降。

(2) 盾构机壳壁与土层之间的摩擦力。在盾构施工推进过程中,盾壳和土层之间会产生摩擦力,在这种摩擦力的作用下,盾构工作面附近的土体同样会产生向上和向前的移动,扩展到地表,则同样表现为地表的隆起或沉降。

(3) 盾构施工引起的地层损失。盾构施工过程中有多种原因可以导致地层损失,包括盾构纠偏、抬头推进、叩头推进、曲线推进、盾尾压浆不及时引起的土体挤入盾尾空隙、隧道衬砌因土压力作用而产生的变形等等,这些原因引起的变形均可表现为隧道洞内的收敛变形,可以统一进行计算。

### 3 推力及壳壁摩擦力引起的地层变形

#### 3.1 盾构推进的力学模型及假定

盾构向前推进时会在前方土体中产生附加应力,使得盾构前方土体处于主动或被动受压状态。盾构推进的力学简化模型如图1所示。假设盾构正面推力为 $P$ ,盾壳与土体的摩擦力为 $P'$ ,隧道(盾构中心距地表深度)为 $H$ ,盾构半径为 $R$ ,盾构机长度为 $L$ 。计算中的基本假定为:①土体为均质、线弹性体;②盾构机的工作面为荷载作用面,并将正面推力近似为圆形均布荷载;③盾构机与土层之间的摩擦力均匀分布;④仅考虑盾构机正常推进情况;⑤盾构施工过程中为匀速推进。

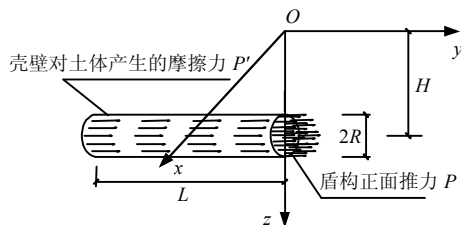


图1 盾构推进力学模型简图

Fig.1 Mechanical model diagram of shield when working

#### 3.2 盾构正面附加推力与壳壁摩擦力的取值

(1) 盾构正面推力

设土体静止土压力为 $P_0$ ,则盾构机正面附加推

力 $\Delta P = P - P_0$ ,静止土压力 $P_0$ 一般按下式取值<sup>[5]</sup>:

$$P_0 = k_0 \gamma H \quad (1)$$

式中: $k_0$ 为静止土压力系数, $k_0 = 1 - \sin \varphi$ , $\varphi$ 为土体的内摩擦角; $\gamma$ 为土体重度; $H$ 为盾构埋深。

(2) 盾壳侧面摩擦力

盾构侧壁与土层的摩擦力 $P'$ 按盾构上方的正压力乘以壳壁与土层的摩擦系数进行计算,盾构机受到的上方土体正压力顶部最小,底部最大,计算时可近似取隧道埋深处的正压力进行计算,即

$$P' = k \gamma H \quad (2)$$

式中: $k$ 为盾构壳壁和土层的摩擦系数,可参考文献[6]进行取值。

#### 3.3 盾构工作面附加推力引起的地层变形

以盾构开挖的起始时刻作为时间起点,此时 $\xi = 0$ ,并设盾构以速度 $v$ 向前推进,则经过时间 $t$ 后,盾构开挖工作面到达 $\xi = vt$ (见图2)。根据Mindlin弹性理论公式<sup>[7]</sup>,对盾构工作面作用的圆形范围内的附加推力进行积分,可得盾构对开挖工作面的附加推力引起的地层位移为:

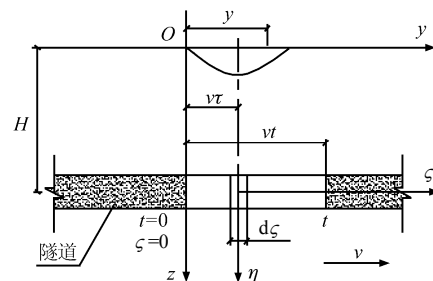


图2 盾构推进施工示意图

Fig.2 Diagram of shield excavation

$$U_{x1} = \int_{-R}^R \int_{H-\sqrt{R^2-\xi^2}}^{H+\sqrt{R^2-\xi^2}} \frac{\Delta P(x-\xi)(y-vt)}{16\pi G(1-\mu)} \left[ \frac{1}{R_1^3} + \frac{3-4\mu}{R_2^3} - \frac{6\eta z}{R_2^5} - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+\eta)^2} \right] d\eta d\xi \quad (3)$$

$$U_{y1} = \int_{-R}^R \int_{H-\sqrt{R^2-\xi^2}}^{H+\sqrt{R^2-\xi^2}} \frac{\Delta P}{16\pi G(1-\mu)} \left[ \frac{3-4\mu}{R_1^3} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{(y-vt)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(y-vt)^2}{R_2^3} + \frac{2\eta z}{R_2^3} \left( 1 - \frac{3(y-vt)^2}{R_2^2} \right) + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2+z+\eta} \left( 1 - \frac{(y-vt)^2}{R_2(R_2+z+\eta)} \right) \right] d\eta d\xi \quad (4)$$

$$W_1 = \int_{-R}^R \int_{H-\sqrt{R^2-\xi^2}}^{H+\sqrt{R^2-\xi^2}} \frac{\Delta P(y-vt)}{16\pi G(1-\mu)} \left[ \frac{z-\eta}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z-\eta)}{R_2^3} - \frac{6\eta z(z+\eta)}{R_2^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+\eta)} \right] d\eta d\xi \quad (5)$$

式中:  $R_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-vt)^2 + (z-\eta)^2}$ ;  $R_2 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-vt)^2 + (z+\eta)^2}$ ;  $G$  为土的剪切模量,  $G = E/2(1+\mu)$ ;  $\mu$  为土的泊松比;  $E$  为土体的弹性模量;  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为计算点的坐标。

盾构推进挤压工作面会使地层产生倾斜和弯曲等变形, 由盾构挤压工作面引起的沿  $x$  和  $y$  方向的地层倾斜  $T_{x1}$ 、 $T_{y1}$ , 地层水平变形  $E_{x1}$ 、 $E_{y1}$  和地层弯曲曲率  $K_{x1}$ 、 $K_{y1}$  可分别按下式进行计算:

$$T_{x1} = \partial W_1 / \partial x, \quad T_{y1} = \partial W_1 / \partial y \quad (6)$$

$$E_{x1} = \partial U_{x1} / \partial x, \quad E_{y1} = \partial U_{y1} / \partial y \quad (7)$$

$$K_{x1} = \partial^2 W_1 / \partial x^2, \quad K_{y1} = \partial^2 W_1 / \partial y^2 \quad (8)$$

### 3.4 盾构外壁摩擦力引起的地层变形

盾构外壁与土层之间的摩擦力引起的地层位移同样可由 Mindlin 公式计算得到, 只是作用力的大小和作用范围和正面推力引起的地层位移不同。取盾构机长度为  $L$ , 盾构以等速  $v$  向前推进, 盾构机外表面对其周边土体作用有荷载强度为  $P'$  的均布水平荷载, 对盾构机外表面作用范围内的摩擦力进行积分, 则盾构机外表面摩擦力作用引起的地层位移为

$$U'_{x1} = \int_{vt-L}^{vt} \int_{H-R}^{H+R} \frac{P' \left\{ x - \left[ R^2 - (\eta-H)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} (y-\varsigma)}{16\pi G(1-\mu)} \left[ \frac{1}{R_3^3} + \frac{3-4\mu}{R_4^3} - \frac{6\eta z}{R_4^5} - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_4(R_4+z+\eta)^2} \right] d\eta d\varsigma + \int_{vt-L}^{vt} \int_{H-R}^{H+R} \frac{P' \left\{ x + \left[ R^2 - (\eta-H)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} (y-\varsigma)}{16\pi G(1-\mu)} \left[ \frac{1}{R_5^3} + \frac{3-4\mu}{R_6^3} - \frac{6\eta z}{R_6^5} - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_4(R_6+z+\eta)^2} \right] d\eta d\varsigma \quad (9)$$

$$U'_{y1} = \int_{vt-L}^{vt} \int_{H-R}^{H+R} \frac{P'}{16\pi G(1-\mu)} \left[ \frac{3-4\mu}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{(y-\varsigma)^2}{R_3^3} + \frac{(3-4\mu)(y-\varsigma)^2}{R_4^3} + \frac{2\eta z}{R_4^3} \left( 1 - \frac{3(y-\varsigma)^2}{R_4^2} \right) + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_4+z+\eta} \left( 1 - \frac{(y-\varsigma)^2}{R_4(R_4+z+\eta)} \right) \right] d\eta d\varsigma + \int_{vt-L}^{vt} \int_{H-R}^{H+R} \frac{P'}{16\pi G(1-\mu)} \left[ \frac{3-4\mu}{R_5} + \frac{1}{R_6} + \frac{(y-\varsigma)^2}{R_5^3} + \frac{(3-4\mu)(y-\varsigma)^2}{R_6^3} + \frac{2\eta z}{R_6^3} \left( 1 - \frac{3(y-\varsigma)^2}{R_6^2} \right) + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_6+z+\eta} \left( 1 - \frac{(y-\varsigma)^2}{R_6(R_6+z+\eta)} \right) \right] d\eta d\varsigma \quad (10)$$

$$W'_1 = \int_{vt-L}^{vt} \int_{H-R}^{H+R} \frac{P'(y-\varsigma)}{16\pi G(1-\mu)} \left[ \frac{z-\eta}{R_3^3} + \frac{(3-4\mu)(z-\eta)}{R_4^3} - \frac{6\eta z(z+\eta)}{R_4^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_4(R_4+z+\eta)} \right] d\eta d\varsigma + \int_{vt-L}^{vt} \int_{H-R}^{H+R} \frac{P'(y-\varsigma)}{16\pi G(1-\mu)} \left[ \frac{z-\eta}{R_5^3} + \frac{(3-4\mu)(z-\eta)}{R_6^3} - \frac{6\eta z(z+\eta)}{R_6^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_6(R_6+z+\eta)} \right] d\eta d\varsigma \quad (11)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} R_3 &= \sqrt{\left\{ x - \left[ R^2 - (\eta-H)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2 + (y-\varsigma)^2 + (z-\eta)^2} \\ R_4 &= \sqrt{\left\{ x - \left[ R^2 - (\eta-H)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2 + (y-\varsigma)^2 + (z+\eta)^2} \\ R_5 &= \sqrt{\left\{ x + \left[ R^2 - (\eta-H)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2 + (y-\varsigma)^2 + (z-\eta)^2} \\ R_6 &= \sqrt{\left\{ x + \left[ R^2 - (\eta-H)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2 + (y-\varsigma)^2 + (z+\eta)^2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由盾构外表面摩擦力引起的沿  $x$  和  $y$  方向的地层倾斜  $T'_{x1}$ 、 $T'_{y1}$ , 地层弯曲曲率  $K'_{x1}$ 、 $K'_{y1}$  和地层水平变形  $E'_{x1}$ 、 $E'_{y1}$  可按式 (6) ~ (8) 相同的方法计算得到。

## 4 盾构法施工引起的地层变形

### 4.1 盾构隧道开挖引起的地层变形

盾构法隧道开挖施工必然产生地层损失。取如图 3 所示坐标系,在距离地表深度为  $H$  处开挖隧道,设隧道以等速度  $v$  掘进开挖。通常盾构法施工隧道多为圆形断面,设开挖初始半径为  $R$ ,盾构施工过程中会产生地层损失,设在横断面上隧道拱顶产生空隙  $g$ ,则隧道开挖变形后的半径为  $R-g/2$ ,由开挖引起的地层各点的下沉  $W_2$ 、沿  $x$  和  $y$  方向的水平位移  $U_{x2}$  和  $U_{y2}$  可按式计算<sup>[8]</sup>,令

$$F(x, y, z, t) = \frac{v \tan^2 \beta}{(z - \eta)^2} \{1 - \exp[-C(t - \tau)]\} \cdot \exp\left\{-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(z - \eta)^2} [(x - \xi)^2 + (y - v\tau)^2]\right\} \quad (13)$$

$$F'(x, y, z, t) = \frac{v \tan^2 \beta}{\left(z + \frac{g}{2} - \eta\right)^2} \{1 - \exp[-C(t - \tau)]\} \cdot \exp\left\{-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\left(z + \frac{g}{2} - \eta\right)^2} [(x - \xi)^2 + (y - v\tau)^2]\right\} \quad (14)$$

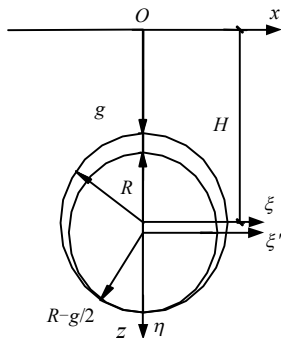


图 3 盾构开挖横断面变形示意图

Fig.3 Deformation diagram on cross-section after shield excavation

即有:

$$W_2 = \int_a^b \int_c^d \int_0^t F(x, y, z, t) d\tau d\xi d\eta - \int_{a'}^{b'} \int_{c'}^{d'} \int_0^t F'(x, y, z, t) d\tau d\xi d\eta \quad (15)$$

$$U_{x2} = \int_a^b \int_c^d \int_0^t \frac{(x - \xi)}{(z - \eta)} F(x, y, z, t) d\tau d\xi d\eta - \int_{a'}^{b'} \int_{c'}^{d'} \int_0^t \frac{(x - \xi)}{(z + g/2 - \eta)} F'(x, y, z, t) d\tau d\xi d\eta \quad (16)$$

$$U_{y2} = \int_a^b \int_c^d \int_0^t \frac{(y - v\tau)}{(z - \eta)} F(x, y, z, t) d\tau d\xi d\eta - \int_{a'}^{b'} \int_{c'}^{d'} \int_0^t \frac{(y - v\tau)}{(z + g/2 - \eta)} F'(x, y, z, t) d\tau d\xi d\eta \quad (17)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} a &= H - R, b = H + R, \\ c &= -\sqrt{R^2 - (H - \eta)^2}, d = \sqrt{R^2 - (H - \eta)^2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} a' &= H - (R - g), b' = H + R \\ c' &= -\sqrt{(R - g/2)^2 - (H + g/2 - \eta)^2} \\ d' &= \sqrt{(R - g/2)^2 - (H + g/2 - \eta)^2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中:  $\beta$  为地层主要影响角;  $C$  为地层下沉时间系数,其值取决于开挖所处的地层条件,可根据地质勘测资料选取,也可根据量测资料通过反分析方法计算得到。

由隧道施工引起的沿  $x$  和  $y$  方向的倾斜  $T_{x2}$ 、 $T_{y2}$ , 水平变形  $E_{x2}$ 、 $E_{y2}$  以及弯曲曲率分布  $K_{x2}$ 、 $K_{y2}$  可按式 (6) ~ (8) 相同的方法计算得到。

### 4.2 盾构法施工引起的总地层变形

将盾构施工开挖、工作面挤压以及壳壁摩擦力三者引起的地层移动和变形进行叠加,即可得到施工至  $t$  时刻地层某点  $(x, y, z)$  的下沉  $W$ 、沿  $x$  和  $y$  方向的水平位移  $U_x$  和  $U_y$ 、倾斜  $T_x$  和  $T_y$ 、水平变形  $E_x$  和  $E_y$  以及弯曲曲率分布  $K_x$  和  $K_y$  分别为

$$W = W_1 + W'_1 + W_2 \quad (20)$$

$$U_x = U_{x1} + U'_{x1} + U_{x2}, U_y = U_{y1} + U'_{y1} + U_{y2} \quad (21)$$

$$T_x = T_{x1} + T'_{x1} + T_{x2}, T_y = T_{y1} + T'_{y1} + T_{y2} \quad (22)$$

$$E_x = E_{x1} + E'_{x1} + E_{x2}, E_y = E_{y1} + E'_{y1} + E_{y2} \quad (23)$$

$$K_x = K_{x1} + K'_{x1} + K_{x2}, K_y = K_{y1} + K'_{y1} + K_{y2} \quad (24)$$

## 5 计算实例与分析

### 5.1 南京地铁许府巷—南京站区间隧道

南京地铁南北线 1 期工程<sup>[9]</sup>许府巷—南京站区间隧道埋深在 8.0~14.8 m 之间,隧道主要通过淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉砂夹细砂、粉细砂、粉土等地层,围岩级别为 VI 级。隧道断面为圆形,采用盾构法施工,盾壳外径为 6.34 m,管片厚度为 0.35 m,盾壳长度为 7.74 m。根据许府巷—南京区间隧道的地质勘测资料及相关监测资料,确定相

关计算参数为: 地层泊松比  $\mu$  为 0.31, 剪切模量  $G$  为 4.586 MPa, 主要影响角的正切  $\tan\beta=0.532$ , 隧道施工速度  $v=3.0$  m/d, 地层下沉时间系数  $C=0.36$  d<sup>-1</sup>. 施工中工作面土压为 0.25 MPa. 根据出渣量和注浆量进行换算, 得到隧道施工完成后顶部收敛值  $g$  为 28.0 mm.

为验证本文方法预测地层变形的正确性, 对许府巷—南京站区间隧道出口端纵横断面的地表下沉值进行了计算, 并与现场实测结果进行了比较 (见图 4、5), 该段区间隧道埋深仅为 8.5 m 左右. 从图示结果可看出, 计算值与实测值吻合较好, 计算结果是较为可靠的.

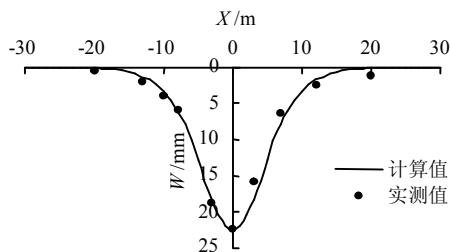


图 4 横断面地表下沉计算值与实测值比较

Fig.4 Ground surface subsidence on cross-section by calculation and measurement

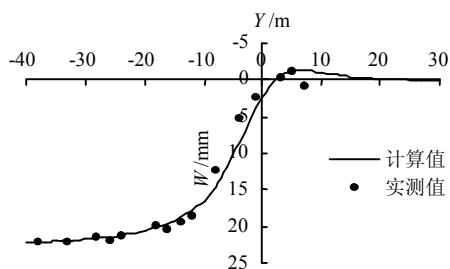


图 5 纵断面地表下沉计算值与实测值比较

Fig.5 Ground surface subsidence on vertical section by calculation and measurement

## 5.2 上海地铁区间隧道

上海某盾构施工隧道<sup>[10]</sup>, 隧道盾构外径  $R=6.26$  m, 盾壳长度  $L=7.8$  m, 地层泊松比  $\mu=0.35$ , 剪切模量  $G=5.6$  MPa, 主要影响角的正切  $\tan\beta=0.52$ , 隧道施工完成后顶部收敛值  $g=53.6$  mm, 隧道施工速度  $v=3.0$  m/d, 地层下沉时间系数  $C=0.46$  d<sup>-1</sup>, 工作面附加压力为 30 kPa.

图 6~9 列出了隧道施工过程中正上方纵向地表移动和变形计算结果. 从图中结果可看出:

(1) 盾构施工过程中, 刀盘前方一定区域的土体出现隆起, 而后沿隧道轴线向开挖工作面方向逐渐出现沉降, 最后地表沉降逐步发展增大并趋于稳

定, 计算结果同实测结果具有良好的一致性.

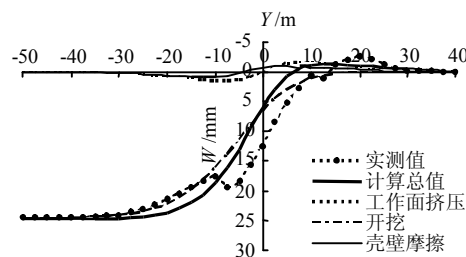


图 6 盾构隧道施工纵向地表下沉分布

Fig.6 Subsidence distribution on ground surface on vertical section

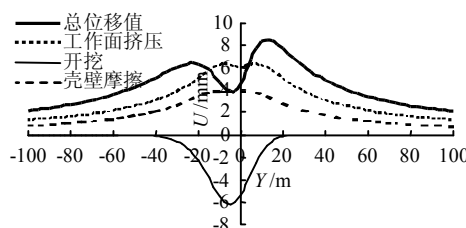


图 7 盾构隧道施工纵向地表水平位移分布

Fig.7 Horizontal displacement distribution on ground surface on vertical section

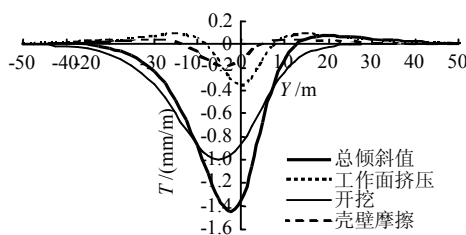


图 8 盾构隧道施工纵向地表倾斜分布

Fig.8 Inclination distribution on ground surface on vertical section

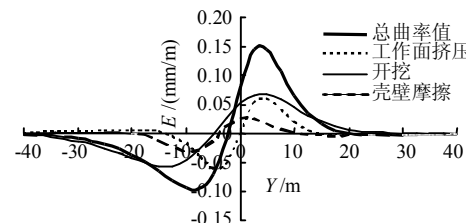


图 9 盾构隧道施工纵向地表弯曲曲率分布

Fig.9 Curvature distribution on ground surface on vertical section

(2) 盾构工作面挤压推力的作用使得工作面前方地表出现隆起, 工作面后方地表出现下沉; 盾构壳壁与土层之间摩擦力的作用也产生基本相同的效果, 但二者下沉和隆起出现的位置有一定的偏差, 摩擦力的作用使得盾构工作面后方约 4 m 左右 (盾

壳长度的一半)的位置开始出现隆起,由工作面挤压推力和壳壁摩擦力引起的地表下沉和隆起值均较小。

(3) 隧道开挖在地表会产生指向工作面后方的水平位移,其影响范围约为工作面前方 20 m 到工作面后方 40 m,而盾构工作面推力和壳壁摩擦力则会导致指向工作面前方的水平位移,其影响范围在工作面前后均超过 100 m。在盾构隧道工作面附近,总体上会产生指向工作面前方的水平位移。

(4) 在隧道施工工作面附近,隧道开挖、盾构工作面推力以及壳壁摩擦力所引起的地表倾斜相互叠加,从而在隧道开挖工作面前方地表产生正曲率,在工作面后方产生负曲率,它们相互叠加,会对隧道上方及地表建筑设施产生不利的影响。

(5) 受隧道施工时空效应的影响,沿隧道纵向的地层变形并不以隧道施工工作面为中心呈对称分布,地层倾斜最大值出现在隧道工作面后方约 5 m 左右,而水平位移最大值则出现在工作面前方约 15 m 左右。

## 6 结 论

(1) 基于经典的 Mindlin 弹性理论公式,考虑盾构施工推进过程中盾构机位置不断变化的实际情况,建立了盾构施工推进过程的力学计算模型,推导了盾构推进工作面附加压力以及盾构机外壁与土层摩擦力作用下隧道周边地层变形的计算公式。

(2) 基于随机介质理论,充分考虑隧道施工地层变形的时空效应,推导了盾构推进地层损失引起的地层变形计算公式。

(3) 基于典型工程的计算分析,对盾构隧道施工地层变形的时空变化过程进行了研究,在盾构隧道工作面附近,总体上会产生指向工作面前方的水平位移;隧道开挖、盾构工作面推力以及壳壁摩擦力所引起的地表倾斜和弯曲会相互叠加,从而对隧道上方及地表建筑设施产生不利的影响;受隧道施工时空效应的影响,沿隧道纵向的地层变形并不以隧道施工工作面为中心呈对称分布。

## 参 考 文 献

- [1] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [2] 刘洪洲, 孙钧. 土压平衡盾构与地层沉降的根源及其影响因素分析[J]. 岩土工程师, 2002, 14(2): 5—9.  
LIU Hong-zhou, SUN Jun. Analysis of reasons and influenced factors of stratum subsidence caused by earth pressure balance shield[J]. *Geotechnical Engineer*, 2002, 14(2): 5—9.
- [3] 张志勇. 盾构施工对周围环境影响研究综述[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(2): 7—11.  
ZHANG Zhi-yong. Environment impact of shield tunneling[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2002, 39(2): 7—11.
- [4] 施成华, 彭立敏. 随机介质理论在盾构法隧道纵向地表沉降预测中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 320—323.  
SHI Cheng-hua, PENG Li-min. Application of stochastic medium theory to predicting settlement in longitudinal surface due to tunnel construction by shield [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(2): 320—323.
- [5] 张书丰, 孙树林, 姜志强. 盾构施工纵向地表沉降分析及基于延迟差分方程的动态预报[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 182—186.  
ZHANG Shu-feng, SUN Shu-lin, JIANG Zhi-qiang. Analysis and dynamic prediction of longitudinal ground settlements due to shield tunneling based on delayed difference equation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 182—186.
- [6] 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.
- [7] RAYMOND D. Mindlin. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. *Physics*, 1936, 7(5): 195—202.
- [8] 施成华. 城市隧道施工地层变形时空统一预测理论及应用研究[博士学位论文D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [9] 中铁隧道工程局. 南京地铁许南区间地表及洞内量测资料及地质资料[R]. 洛阳: 中铁隧道工程局, 2003.
- [10] 朱忠隆, 张庆贺, 易宏伟. 软土隧道纵向地表沉降的随机预测方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 56—59.  
ZHU Zhong-long, ZHANG Qing-he, YI Hong-wei. Stochastic theory for predicting longitudinal settlement in soft-soil tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(3): 56—59.