

# 基于随机介质理论的大直径盾构江底掘进土体沉陷分析<sup>\*</sup>

于艺林<sup>1</sup>, 傅鹤林<sup>2</sup>, 史越<sup>2</sup>, 陈俐光<sup>1</sup>, 张洪亮<sup>1</sup>

(1. 中建市政工程有限公司, 北京 100071; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 合江套湘江隧道是衡阳东二环路的关键控制工程, 工期紧、施工风险大、质量标准高。文中依托该工程, 基于随机介质理论, 建立了水下盾构隧道掘进施工引起土体沉陷的理论分析模型, 分别对单孔圆形隧道和双孔平行隧道开挖工况下的江底地层扰动情况进行计算分析, 得出了河床塌陷位移、水平位移、倾斜变形和横向变形预测结果, 为工程施工风险分析提供依据。

**关键词:** 隧道; 江底隧道; 大直径盾构; 随机介质理论; 沉陷分析

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)03-0174-06

随着近年来盾构技术的发展和成熟, 江底隧道施工技术无论从规模上还是速度上都达到了新的高度。大直径盾构隧道在江底掘进过程中土体受到剪切和挤压, 破坏了土体原始应力状态, 导致周围岩土体应力重分布, 加上施工中管片背后注浆、盾构机推进和盾尾间隙移动等都会影响土体稳定性, 造成河床塌陷等。随着计算技术的发展与进步, 以概率论为基础的随机介质理论得到广泛应用。该文以岩土体随机介质理论为基础, 对衡阳二环东路合江套湘江隧道盾构掘进施工引起的土体扰动效应进行预测和分析, 明确两次穿越江底过程中河床的变形形式和成因, 为工程建设提供理论参考。

## 1 土体沉陷随机介质理论模型

### 1.1 模型构建

如图 1 所示,  $X, \xi, \eta$  分别代表不同位置地层, 当在  $Z_1$  水平地层施工扰动时, 本层竖向位移曲线为  $W(Z_1, X)$ , 同时该地层扰动会导致上部地层随机性出现不同程度的竖向沉降, 分别为  $W(Z_2, \xi)$  和  $W(Z_3, \eta)$ 。Litwiniszyn 求得的随机介质最终沉降表达式为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W(Z, X)}{\partial Z} &= \alpha(Z, X)W(Z, X) + \\ &\beta(Z, X)\frac{\partial W(Z, X)}{\partial X} + \gamma(Z, X)\frac{\partial^2 W(Z, X)}{\partial X^2} \end{aligned} \quad (1)$$

采用随机介质理论进行地层扰动分析时, 某单

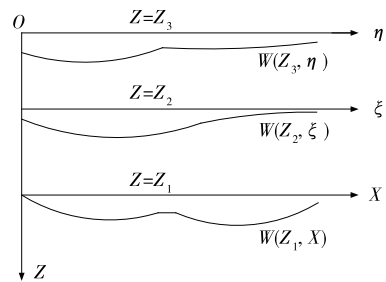


图 1 地层移动传递示意图

元被挖掉后会引引起地层变形出现沉降槽, 理论上两者体积相等。因此, 某单位单元  $d\xi d\eta d\zeta(x, y, z)$  开挖结束后, 若认为该开挖单元完全塌陷 (见图 2), 则最终引起的土体沉降为  $W_e(X, Y)$ , 按下式计算:

$$W_e(X, Y) = \frac{1}{r^2(Z)} \exp \left[ -\frac{\pi}{r^2(Z)} (X^2 + Y^2) \right] d\xi d\eta d\zeta \quad (2)$$

式中:  $r(Z)$  为  $d\xi d\eta d\zeta(x, y, z)$  单元开挖的主要影响范围。

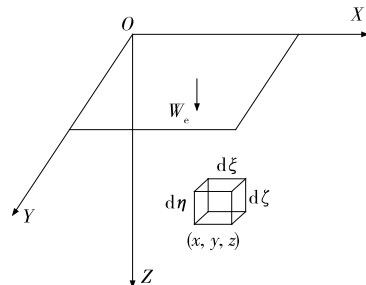


图 2 单元开挖示意图

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金项目(51538009; 51578550); 中建股份科技研发计划项目(CSCEC-2016-Z-24)

考虑平面应变问题,假设模型沿  $Y$  轴无限延伸,则对式(2)进行积分运算,可得:

$$W_e(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{r^2(Z)} \exp\left\{-\frac{\pi}{r^2(Z)}[X^2 + (Y-\zeta)^2]\right\} d\zeta d\eta = \frac{1}{r(Z)} \cdot \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(Z)}X^2\right] d\xi d\eta \quad (3)$$

鉴于  $r(Z)$  主要受制于地层条件参数及开挖单元埋深,针对地层条件引入地层影响角  $\beta$ ,认为  $r(Z)$  与单元埋深呈线性关系,则:

$$r(Z) = \frac{Z}{\tan\beta} \quad (4)$$

假定岩土体在开挖过程中是不可压缩的,即岩土体的体积变化趋于零,则可针对开挖过程中土体的水平位移进行预测。由于土体体积应变为零,对于三维开挖单元,有:

$$\epsilon_{eX} + \epsilon_{eY} + \epsilon_{eZ} = 0 \quad (5)$$

式中:  $\epsilon_{eX}$ 、 $\epsilon_{eY}$ 、 $\epsilon_{eZ}$  为开挖单元沿坐标轴方向的应变。

考虑平面应变问题,  $\epsilon_{eY}$  为零,又因为单元开挖引起的上部土层位移是连续的,有:

$$\begin{cases} \epsilon_{eX} = \frac{\partial U_e(X)}{\partial X} \\ \epsilon_{eZ} = \frac{\partial W_e(X)}{\partial Z} \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)、式(6)得:

$$\frac{\partial U_e(X)}{\partial X} + \frac{\partial W_e(X)}{\partial Z} = 0 \quad (7)$$

对式(7)进行积分运算,得单元开挖引起的土体水平位移为:

$$U_e(X) = - \int \frac{\partial W_e(X)}{\partial Z} dX + K(Z) \quad (8)$$

考虑边界条件,根据对称性,开挖单元中心线上不应有水平位移,距离开挖单元无穷远处水平位移也为零,即:

$$\begin{cases} X=0, U_e(X)=0 \\ X=\pm\infty, U_e(\pm\infty)=0 \end{cases} \quad (9)$$

由式(3)~(9)可得:

$$U_e(X) = \frac{X \tan\beta}{Z^2} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{Z^2}X^2\right] d\xi d\eta \quad (10)$$

距离地面一定深度的任意断面形状隧道的开挖属于典型的平面应变问题。如图 3 所示,以隧道中心线为  $Z$  轴、地表面为  $X$  轴,隧道中心与地表面的距离为  $H$ ,将隧道开挖断面分解为无数开挖单元,

取任意开挖单元  $d\xi d\eta$ ,其与地表面的距离为  $\eta$ ,横向与隧道中心线的距离为  $\xi$ ,假定开挖单元完全塌落,则与隧道中心线相距  $X$  的土体沉降为:

$$W_e(X) = \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2}(X-\xi)^2\right] d\xi d\eta \quad (11)$$

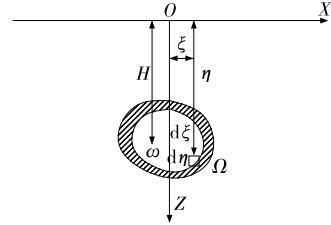


图 3 隧道及开挖单元示意图

若整个隧道开挖范围全部坍塌,上层土体最终沉降有最大值,应用积分原理,以隧道开挖断面为积分域进行积分,可得土体最大沉降量为:

$$W(X) = \iint_{\Omega} \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2}(X-\xi)^2\right] d\xi d\eta \quad (12)$$

在隧道实际施工过程中,常对地层进行加固处理,并及时施作支护措施,保证隧道安全施工,故隧道只有轻微变形,周边岩土体仅有少量径向位移。假定隧道开挖断面为  $\Omega$ ,隧道开挖完成及支护结束后产生径向收缩,减小  $\omega$ ,则隧道上方土体位移值仅由隧道开挖断面径向收缩引起,隧道开挖引起的最终沉降为:

$$W(X) = \iint_{\Omega-\omega} \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2}(X-\xi)^2\right] d\xi d\eta \quad (13)$$

任意断面隧道施工造成的土体水平位移也是由隧道开挖完成后径向收缩引起的,即隧道原始断面开挖造成的水平位移  $U_{\Omega}(X)$  与隧道径向收缩后的断面开挖造成的水平位移  $U_{\omega}(X)$  之差:

$$U(X) = \iint_{\Omega-\omega} \frac{(X-\xi) \tan\beta}{\eta^2} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2}(X-\xi)^2\right] d\xi d\eta \quad (14)$$

对式(13)、式(14)进行微分,可得地层的倾斜及横向变形:

$$T(X) = \frac{dW(X)}{dX} = \iint_{\Omega-\omega} \frac{-2\pi \tan^3\beta}{\eta^3} (X-\xi) \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2}(X-\xi)^2\right] d\xi d\eta \quad (15)$$

$$E(X) = \frac{dU(X)}{dX} = \int_{\Omega-\omega}^{\infty} \frac{\tan\beta}{\eta^2} \left[ 1 - \frac{2\pi\tan^2\beta}{\eta^2} (X-\xi)^2 \right] \cdot \exp \left[ -\frac{\pi\tan^2\beta}{\eta^2} (X-\xi)^2 \right] d\xi d\eta \quad (16)$$

根据土体下沉曲线,可得土体曲率变化为:

$$K(X) = \frac{1}{R(X)} = \frac{d^2 W(X)/dX^2}{\{1 + [dW(X)/dX]^2\}^{1.5}} \quad (17)$$

考虑到土体倾斜率变化极小,斜率的二次方可忽略不计,则土体曲率可表示为:

$$K(X) = \frac{d^2 W(X)}{dX^2} = \int_{\Omega-\omega}^{\infty} \frac{2\pi\tan^3\beta}{\eta^3} \left[ \frac{2\pi\tan^2\beta}{\eta^2} (X-\xi)^2 - 1 \right] \cdot \exp \left[ -\frac{\pi\tan^2\beta}{\eta^2} (X-\xi)^2 \right] d\xi d\eta \quad (18)$$

令

$$\left\{ \begin{aligned} w(X, \xi, \eta) &= \frac{\tan\beta}{\eta} \exp \left[ -\frac{\pi\tan^2\beta}{\eta^2} (X-\xi)^2 \right] \\ u(X, \xi, \eta) &= \frac{(X-\xi)\tan\beta}{\eta^2} \exp \left[ -\frac{\pi\tan^2\beta}{\eta^2} (X-\xi)^2 \right] \\ t(X, \xi, \eta) &= \frac{-2\pi\tan^3\beta}{\eta^3} (X-\xi) \exp \left[ -\frac{\pi\tan^2\beta}{\eta^2} (X-\xi)^2 \right] \\ e(X, \xi, \eta) &= \frac{\tan\beta}{\eta^2} \left[ 1 - \frac{2\pi\tan^2\beta}{\eta^2} (X-\xi)^2 \right] \exp \left[ -\frac{\pi\tan^2\beta}{\eta^2} (X-\xi)^2 \right] \\ k(X, \xi, \eta) &= \frac{2\pi\tan^3\beta}{\eta^3} \left[ \frac{2\pi\tan^2\beta}{\eta^2} (X-\xi)^2 - 1 \right] \exp \left[ -\frac{\pi\tan^2\beta}{\eta^2} (X-\xi)^2 \right] \end{aligned} \right. \quad (19)$$

则隧道开挖引起的土体沉降、水平位移、地层倾斜、横向变形和曲率计算公式可简记为式(20)。

## 1.2 单孔圆形隧道开挖地层位移

城市交通隧道多采用盾构施工,单孔圆形隧道开挖引起的地层位移预测越来越受到关注。运用随机介质理论能很好地对地层位移进行预测。如图4所示,圆形隧道中心与地面的距离为 $H$ ,隧道开挖初始半径为 $A$ ,假定断面均匀收缩 $\Delta A$ ,则地层下沉

$$\left\{ \begin{aligned} W(X) &= \int_{\Omega-\omega}^{\infty} w(X, \xi, \eta) d\xi d\eta \\ U(X) &= \int_{\Omega-\omega}^{\infty} u(X, \xi, \eta) d\xi d\eta \\ T(X) &= \int_{\Omega-\omega}^{\infty} t(X, \xi, \eta) d\xi d\eta \\ E(X) &= \int_{\Omega-\omega}^{\infty} e(X, \xi, \eta) d\xi d\eta \\ K(X) &= \int_{\Omega-\omega}^{\infty} k(X, \xi, \eta) d\xi d\eta \end{aligned} \right. \quad (20)$$

位移、水平位移、地层倾斜、横向变形及曲率分别为:

$$\left\{ \begin{aligned} W(X) &= \int_a^b \int_c^d w(X, \xi, \eta) d\xi d\eta - \int_e^f \int_g^h w(X, \xi, \eta) d\xi d\eta \\ U(X) &= \int_a^b \int_c^d u(X, \xi, \eta) d\xi d\eta - \int_e^f \int_g^h u(X, \xi, \eta) d\xi d\eta \\ T(X) &= \int_a^b \int_c^d t(X, \xi, \eta) d\xi d\eta - \int_e^f \int_g^h t(X, \xi, \eta) d\xi d\eta \\ E(X) &= \int_a^b \int_c^d e(X, \xi, \eta) d\xi d\eta - \int_e^f \int_g^h e(X, \xi, \eta) d\xi d\eta \\ K(X) &= \int_a^b \int_c^d k(X, \xi, \eta) d\xi d\eta - \int_e^f \int_g^h k(X, \xi, \eta) d\xi d\eta \end{aligned} \right. \quad (21)$$

式中: $a = H - A$ ;  $b = H + A$ ;  $c = -[A^2 - (H - \eta)^2]^{0.5}$ ;  $d = -c$ ;  $e = H - (A - \Delta A)$ ;  $f = H + (A - \Delta A)$ ;  $g = -[(A - \Delta A)^2 - (H - \eta)^2]^{0.5}$ ;  $h = -g$ 。

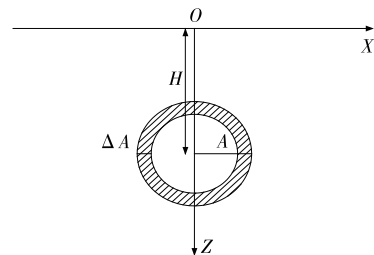


图4 单孔圆形隧道开挖示意图

由上述公式推导过程可知:对于已知工程,隧道埋深 $H$ 、开挖直径 $D$ 已确定,需根据地层条件确定地层主要影响角 $\beta$ ,根据施工经验或反分析法确定隧道断面收敛值 $\Delta A$ 。其中地层影响角取决于隧道

开挖所处地层状态,主要有两种确定方法,一是由式(22)确定;二是根据表格查询,由隧道围岩级别及相应规范确定地层内摩擦角  $\varphi$ ,然后由表 1 取得相应地层影响角。

$$\tan\beta = H/(2.5i) \quad (22)$$

式中: $H$  为隧道埋深; $i$  为地层沉降宽度系数。

表 1 不同地层状态下的地层影响角

地层条件	地层影响角 $\beta/(^\circ)$
硬裂隙岩土	$45 - \varphi/2$
一般性黏土	45
软黏土	35~45
砂土	15~30

注: $\varphi$  土体内摩擦角。

### 1.3 双孔平行隧道开挖地层位移

双孔平行隧道之间的相互影响更复杂,若隧道开挖造成的扰动区大于隧道之间的距离,将会导致较大的地层变形。如图 5 所示,两隧道平行开挖,与地表的距离为  $H$ ,隧道开挖半径均为  $A$ ,假定隧道发生均匀径向收缩,Ⅰ隧道径向收缩  $\Delta A$ ,Ⅱ隧道径向收缩  $\Delta B$ ,两隧道中心距离  $L > 2A$ 。

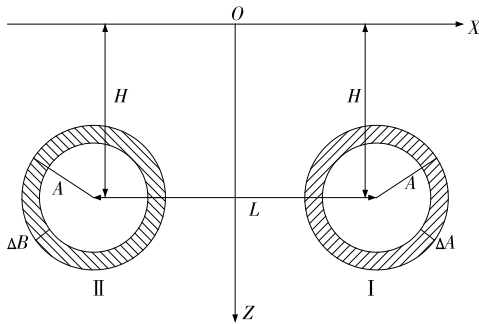


图 5 双孔平行隧道开挖示意图

运用叠加原理推导地层变形公式,可认为双孔隧道掘进引起的地层变形是两条单孔隧道施工影响的线性叠加。根据式(13)和式(20),开挖Ⅰ隧道引起的土体沉降为:

$$W_I(X) = \int_{a_1}^{b_1} \int_{c_1}^{d_1} \frac{\tan\beta_1}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta - \int_{e_1}^{f_1} \int_{g_1}^{h_1} \frac{\tan\beta_1}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta \quad (23)$$

根据式(14)和式(20),开挖Ⅰ隧道引起的土体水平位移为:

$$U_I(X) = \int_{a_1}^{b_1} \int_{c_1}^{d_1} \frac{(X + L/2 - \xi) \tan\beta_1}{\eta^2} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta - \int_{e_1}^{f_1} \int_{g_1}^{h_1} \frac{(X + L/2 - \xi) \tan\beta_1}{\eta^2} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta \quad (24)$$

式中: $a_1 = H - A$ ;  $b_1 = H + A$ ;  $c_1 = -[A^2 - (H - \eta)^2]^{0.5} - L/2$ ;  $d_1 = [A^2 - (H - \eta)^2]^{0.5} - L/2$ ;  $e_1 = H - (A - \Delta A)$ ;  $f_1 = H + (A - \Delta A)$ ;  $g_1 = -[(A - \Delta A)^2 - (H - \eta)^2]^{0.5} - L/2$ ;  $h_1 = [(A - \Delta A)^2 - (H - \eta)^2]^{0.5} - L/2$ 。

以此类推,可推导出隧道Ⅱ开挖引起的土体沉降和水平位移分别为:

$$W_{II}(X) = \int_{a_2}^{b_2} \int_{c_2}^{d_2} \frac{\tan\beta_2}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta - \int_{e_2}^{f_2} \int_{g_2}^{h_2} \frac{\tan\beta_2}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta \quad (25)$$

$$U_{II}(X) = \int_{a_2}^{b_2} \int_{c_2}^{d_2} \frac{(X - L/2 - \xi) \tan\beta_2}{\eta^2} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta - \int_{e_2}^{f_2} \int_{g_2}^{h_2} \frac{(X - L/2 - \xi) \tan\beta_2}{\eta^2} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta \quad (26)$$

式中: $a_2 = H - A$ ;  $b_2 = H + A$ ;  $c_2 = -[A^2 - (H - \eta)^2]^{0.5} + L/2$ ;  $d_2 = [A^2 - (H - \eta)^2]^{0.5} + L/2$ ;  $e_2 = H - (A - \Delta B)$ ;  $f_2 = H + (A - \Delta B)$ ;  $g_2 = -[(A - \Delta B)^2 - (H - \eta)^2]^{0.5} + L/2$ ;  $h_2 = [(A - \Delta B)^2 - (H - \eta)^2]^{0.5} + L/2$ 。

两条近邻隧道施工会相互影响土体变形,运用叠加法可得土体沉降与水平位移分别为:

$$W(X) = W_I(X) + W_{II}(X) \quad (27)$$

$$U(X) = U_I(X) + U_{II}(X)$$

双孔平行隧道施工引起的土体倾斜、横向变形、曲率也可运用叠加法得出〔见式(28)~(30)〕。

应用随机介质理论时需确定  $\tan\beta_1$ 、 $\tan\beta_2$ 、 $\Delta A$ 、

$$T(X) = \frac{dW_I(X)}{dX} + \frac{dW_{II}(X)}{dX} = \int_{a_1}^{b_1} \int_{c_1}^{d_1} \frac{-2\pi \tan^3 \beta_1}{\eta^3} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right) \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta -$$

$$\int_{e_1}^{f_1} \int_{g_1}^{h_1} \frac{-2\pi \tan^3 \beta_1}{\eta^3} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right) \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta +$$

$$\int_{a_2}^{b_2} \int_{c_2}^{d_2} \frac{-2\pi \tan^3 \beta_2}{\eta^3} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right) \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta -$$

$$\int_{e_2}^{f_2} \int_{g_2}^{h_2} \frac{-2\pi \tan^3 \beta_2}{\eta^3} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right) \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta \quad (28)$$

$$E(X) = \frac{dU_I(X)}{dX} + \frac{dU_{II}(X)}{dX} = \int_{a_1}^{b_1} \int_{c_1}^{d_1} \frac{\tan \beta_1}{\eta^2} \left[1 - \frac{2\pi \tan^2 \beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta -$$

$$\int_{e_1}^{f_1} \int_{g_1}^{h_1} \frac{\tan \beta_1}{\eta^2} \left[1 - \frac{2\pi \tan^2 \beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta +$$

$$\int_{a_2}^{b_2} \int_{c_2}^{d_2} \frac{\tan \beta_2}{\eta^2} \left[1 - \frac{2\pi \tan^2 \beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta -$$

$$\int_{e_2}^{f_2} \int_{g_2}^{h_2} \frac{\tan \beta_2}{\eta^2} \left[1 - \frac{2\pi \tan^2 \beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta \quad (29)$$

$$K(X) = \frac{d^2 W_I(X)}{dX^2} + \frac{d^2 W_{II}(X)}{dX^2} = \int_{a_1}^{b_1} \int_{c_1}^{d_1} \frac{2\pi \tan^3 \beta_1}{\eta^3} \left[\frac{2\pi \tan^2 \beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2 - 1\right] \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta -$$

$$\int_{e_1}^{f_1} \int_{g_1}^{h_1} \frac{2\pi \tan^3 \beta_1}{\eta^3} \left[\frac{2\pi \tan^2 \beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2 - 1\right] \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta_1}{\eta^2} \left(X + \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta +$$

$$\int_{a_2}^{b_2} \int_{c_2}^{d_2} \frac{2\pi \tan^3 \beta_2}{\eta^3} \left[\frac{2\pi \tan^2 \beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2 - 1\right] \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta -$$

$$\int_{e_2}^{f_2} \int_{g_2}^{h_2} \frac{2\pi \tan^3 \beta_2}{\eta^3} \left[\frac{2\pi \tan^2 \beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2 - 1\right] \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta_2}{\eta^2} \left(X - \frac{L}{2} - \xi\right)^2\right] d\xi d\eta \quad (30)$$

$\Delta B$  4 个基本物理参数。其中:  $\tan \beta_1$ 、 $\tan \beta_2$  为地层主要影响角的正切值, 针对某一特定隧道, 地层条件、埋深岩土体性质是确定的, 故影响角可综合反映隧道周围岩土体特征;  $\Delta A$ 、 $\Delta B$  是隧道工后断面收敛值, 与施工方法、施工条件、施工质量、支护措施实施的及时性有关, 是隧道施工过程中所采取措施的综合反映。

随机介质理论计算公式较复杂, 可采用高斯-勒让德法, 将积分转换成多项式积分, 再应用 MATLAB 语言编制计算程序进行计算。

## 2 土体扰动效应分析

应用随机介质理论进行土体沉降分析时, 不需了解上覆荷载及岩层分布情况, 只需根据实测资料和工程经验确定地层影响角及隧道设计参数便可计算地层沉降水平, 并对工程影响进行评价。根据合江套湘江隧道实际情况对土体扰动效应进行二维分析, 由于隧道断面位于强风化砂质泥岩区域, 取  $\tan \beta$  为 0.6, 隧道断面收敛半径根据施工经验取 15

mm, 两隧道中心线距离为 28 m, 隧道半径为 5.5 m, 隧道埋深根据地层条件采用 Покровский 提出的当层法理论进行计算 (见图 6)。

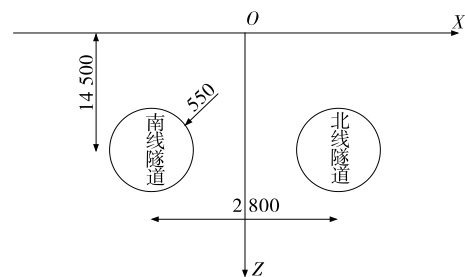


图 6 隧道计算断面示意图 (单位: mm)

根据式 (23)~(30) 对隧道掘进引起土体扰动的理论推导, 分析河床塌陷、水平位移、倾斜变形和横向变形情况, 计算过程根据实际施工情况分为仅南线隧道开挖和南北线隧道先后开挖两种工况, 结果见图 7~10。

由图 7~10 可知: 1) 两隧道中心线相距较远, 隧道施工后最大沉降量呈现双峰状态, 且峰值处于

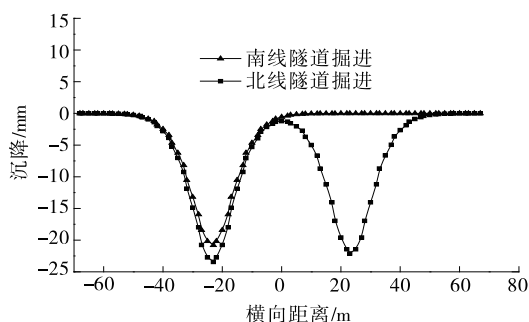


图7 河床塌陷位移曲线

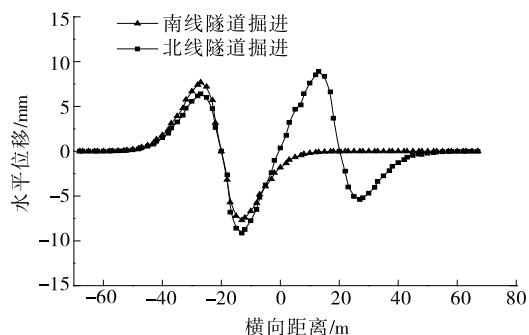


图8 河床水平位移曲线

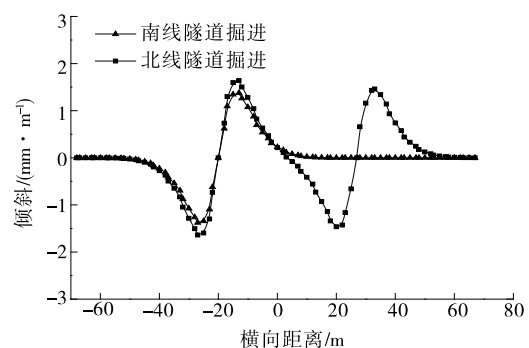


图9 河床倾斜变形曲线

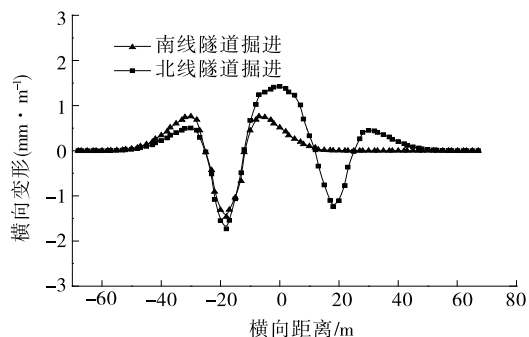


图10 河床横向变形曲线

两隧道中心线上方。由于南线隧道先行开挖,南线隧道上方塌陷位移较大且最终沉降大于北线隧道,工后沉降峰值分别为 $-23.44$ 和 $-22.12$  mm。2)河床最大斜率为 $1.64$  mm/m,北线隧道上方的河床

倾斜明显小于南侧隧道,主要是由于两隧道工后叠加效果增大了南线隧道引起的塌陷位移及倾斜水平。3)隧道开挖引起的水平位移远小于沉降值,南线隧道水平位移峰值为 $\pm 7.69$  mm,分别发生在 $-25$ 和 $-10$  m处;北线隧道水平位移出现4个峰值,从左至右分别为 $6.41$ 、 $-9.1$ 、 $8.90$ 和 $-5.39$  mm,且叠加效果导致南线隧道水平位移正值减小、负值增大。4)结合河床横向变形曲线,水平位移峰值将地表水平移动分为5个区域,河床土体受拉区、河床土体压缩区从左至右间隔排列,地表最大受拉变形为 $1.42$  mm/m,最大压缩变形为 $1.72$  mm/m,分别发生在 $0$ 和 $-18$  m处。

### 3 结论

该文在系统阐述水下隧道掘进土体扰动随机介质理论的基础上,分别推导了单孔、双孔圆形隧道开挖导致的土体沉降、水平位移、倾斜变形和横向变形的解析方程,构建了盾构江底掘进引起的土体沉降的随机介质理论模型。根据现场实际施工情况,选取典型计算断面,考虑仅开挖南侧隧道与南北两侧隧道先后开挖两种工况,采用文中模型计算了合江套湘江隧道开挖引起的河床沉降、水平位移、倾斜变形和横向变形等情况,结论如下:由于隧道中心线相距较远,河床沉降曲线呈现2个峰值,且滞后隧道开挖会增加优先隧道开挖引起的沉降值;工后水平位移远小于沉降值,且两隧道开挖的相互作用会促使两隧道中心线之间的水平位移增大;隧道开挖完成后河床出现4个水平位移峰值,将河床从左至右间隔为受拉区、压缩区等5个区域。

### 参考文献:

- [1] 颜荣贵.露天煤矿随机裂隙边坡稳定性研究的概率积分法[J].煤炭学报,1983(3).
- [2] 周希圣.盾构隧道施工多媒体监控与仿真系统[J].土木工程学报,2001,34(6).
- [3] 朱文彬.随机介质理论在深基坑稳定性分析中的应用[J].岩土力学,1998,19(2).
- [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).
- [5] 蔡海兵,彭立敏,郑腾龙.基于随机介质理论的隧道冻结期地表冻胀预测方法[J].中南大学学报:自然科学版,2014,45(12).