

文章编号: 1000-7598-(2006) 增-0155-06

隧道盾构施工引起土体力学效应的计算分析

齐静静, 徐日庆, 郭 印, 王 涛

(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 随着市政建设的快速发展, 地铁盾构越来越多的穿越密集的建(筑)物和地下管线, 隧道施工对周围环境的影响已经引起人们足够的重视。视隧道开挖引起的土体移动为一随机过程, 应用随机介质理论, 根据土体损失的空间分布规律, 得到土体损失引起的位移计算公式; 在此基础上, 结合弹性理论基本方程推导了隧道开挖引起周围土体应力变化的计算公式。最后, 结合算例, 对盾构推进过程中引起的土体位移和附加应力分别进行计算, 旨在了解盾构施工引起的环境力学效应, 为采取措施减小这种影响提供依据。

关 键 词: 盾构; 土体损失; 附加应力; 土体位移

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Calculation and analysis of construction mechanics effect due to tunnel construction by shield

QI Jing-jing, XU Ri-qing, GUO Yin, WANG Tao

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: With the development of municipal engineering, shield tunneling has been used in various kinds of underground constructions and underlines more popularly in urban area. Much more attention should be paid to the effect of tunnel construction on close environment. According to the space regularities of distribution of ground loss and by stochastic medium theory, it is assumed that ground movement process is of the property of stochastic process, and the soil displacement due to ground loss can be calculated. Combining with the basic elastic equations, the stress changes due to tunnel excavation can be calculated. Finally, with the help of computer programs, the soil displacement and superimposed stress are analyzed, which can help researchers to understand the environment effect of construction. And at the same time, these results can make (be of great help) for in-situ engineers to make decisions on their own on these effects in advance.

Key words: shield; ground loss; superimposed stress; soil displacement

1 引 言

近年来, 随着我国城市建设的发展, 为改善交通状况, 许多大城市开始修建地铁。为减小地铁隧道开挖对周围土体的扰动, 通常采用盾构法进行施工, 但由于地质条件和施工工艺的限制, 很难避免推进过程对土体的扰动, 因此, 盾构推进对周围环境的影响日益得到重视。

针对盾构施工引起的地面沉降或隆起, 国内外已进行了大量的分析研究^[1-7]; 而对盾构施工引起周围土体附加应力的分析相对较少, 已有研究一般侧

重于正面推力和盾壳与周围土体之间的摩擦力影响下的附加应力进行分析, 文献[8]和[9]对正面推力引起的土体附加应力进行了计算和分析, 文献[10]采用 3D 数值分析方法对正面推力、土体损失、注浆以及这些因素共同作用影响下的环境效应进行了分析, 但在附加应力的分析中只考虑了正面推力带来的影响。文献[11]对正面推力和盾壳与周围土体之间的摩擦力引起的附加应力进行了分析。土体损失作为影响土体变形的主要因素, 对周围土体附加应力的分布有着重要的影响, 因此在附加应力的计算中不可忽视。

许多学者^[12、14]提出采用随机介质理论计算土体损失引起的土体变形,但由于计算参数的取值难于准确确定或只能借助于反分析法计算得到,使其应用受到限制。本文在前人工作的基础上提出了一种新的参数取值计算方法,根据土体损失的空间分布规律,采用数值积分方法,对隧道施工中由于土体损失引起的变形进行分析。并结合弹性理论基本方程推导了盾构推进过程中由于土体损失产生的附加应力计算公式,通过编制计算机程序,对算例中由于土体损失产生的变形和附加应力进行计算分析,得出了一些有意义的结论,以指导实际工程施工。

2 随机介质理论基础

随机介质理论首先是由波兰学者李特威尼申(J. Litwiniszyn)于上世纪50年代提出的,我国学者刘宝琛等进行了深入研究和发展^[12]。随机介质理论从概率统计理论出发,把整个开挖分解成无限多个微元开挖的总和。因此,隧道开挖对地表的影响也可以等效成构成这一开挖的许多无限小微元开挖的影响总和。如图1所示,考虑在距地表深度为 η 处开挖一单元体 $d\xi d\zeta d\eta$,引入主要影响半径 $r(z)$ 和主要影响角 β 的概念,在不排水固结条件的假定下,得到开挖段面以上任意一个水平面 z ($z \leq h$)上,单元体 $d\xi d\zeta d\eta$ 完全塌落引起土体中坐标点 (x, y, z) 处的下沉量 $U_{ez}(x, y, z)$ 为^[12]:

$$U_{ez}(x, y, z) = \frac{1}{r^2(z)} \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(z)}(x^2 + y^2)\right] d\xi d\zeta d\eta \quad (1)$$

单元开挖在引起地层下沉的同时,还会引起地层的水平位移 $U_{ex}(x, y, z)$ 和 $U_{ey}(x, y, z)$,假定岩土体不可压缩,根据边界条件,得^[12]:

$$U_{ex}(x, y, z) = \frac{x}{r^3(z) \tan \beta} \cdot \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(z)}(x^2 + y^2)\right] d\xi d\zeta d\eta \quad (2)$$

$$U_{ey}(x, y, z) = \frac{y}{r^3(z) \tan \beta} \cdot \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(z)}(x^2 + y^2)\right] d\xi d\zeta d\eta \quad (3)$$

式中 $r(z) = \frac{\eta - z}{\tan \beta}$

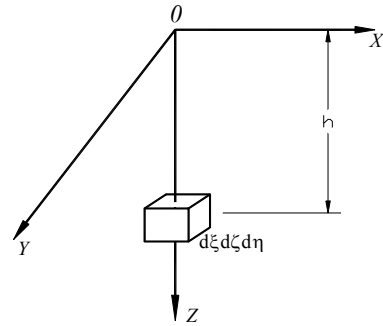


图1 单元开挖示意图

Fig.1 Sketch of elemental excavation

3 计算参数 $r(z)$ 和 $\tan \beta$ 的确定

从上述公式可以看出,随机介质理论中的土体变形基本参数为 β 和 $r(z)$ 。主要影响角正切 $\tan \beta$ 决定于隧道开挖所处的地层条件,是地层特征的综合反映。

目前确定参数 β 的取值方法主要是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;通过反分析法计算参数的取值需要建立在一定的实测资料基础上,从而使得随机介质理论方法在土体变形中的预测受到限制。本文在前人工作的基础上对参数 $\tan \beta$ 的取值进行了探讨。

$\tan \beta$ 是有关隧道施工开挖影响土体变形的主要参数。文献[15]通过沉降曲线方程对 y 求导,得到反弯点在沉降曲线上离开隧道中心线的水平距离 y_0 ,即沉降曲线的斜率最大之处:

$$y_0 = \pm \frac{h - z}{\sqrt{2\pi} \tan \beta} = i_z \quad (4)$$

所以: $\tan \beta_z = (h - z) / (\sqrt{2\pi} i_z)$ (5)

式中 i_z 为地表下各土层沉降槽宽度系数。

地表沉降槽宽度系数 i_0 ,可以表示为^[1]:

$$i_0 = R \left(\frac{h}{2R} \right)^n \quad (6)$$

式中 R 为隧道半径; h 为隧道中心至地表深度; $n=0.8 \sim 1.0$, 土越软, n 取值越大。

对于地表以下土层,随着土层深度的增大,该土层距隧道顶部的垂直距离减小,土层的沉降槽曲线宽度系数将会减小,文献[16]研究了沉降槽宽度系数 $i(z)$ 沿深度变化的规律,认为:

$$i(z) = i_0 (1 - z/h)^{-0.3} \quad (7)$$

所以,地表下任一深度处主要影响正切值 $\tan \beta_z$ 随深度的变化规律为:

$$\tan \beta_z = \frac{h-z}{\sqrt{2\pi i_z}} \quad (8)$$

$$= \frac{h-z}{\sqrt{2\pi R(h/2R)^n (1-z/h)^{0.3}}}$$

在计算地表沉降时, 假设地表主要影响半径 r 是单元开挖深度 η 和表征上覆岩层力学性质的主要影响正切 $\tan \beta$ 的函数, 即

$$r(z=0) = \frac{\eta}{\tan \beta_0} \quad (9)$$

土体内部的主要影响半径为:

$$r(z) = \frac{\eta - z}{\tan \beta_z} \quad (10)$$

4 隧道开挖引起的土体变形计算

盾构施工引起的土体位移主要包括盾构机前方土体的隆起和盾构推过后土体的沉降。本文主要讨论盾构机推过后由于土体损失引起的位移。土体损失即隧道施工中实际开挖的土体的体积与竣工体积之差, 土体损失的横断面可以通过等效土体损失参数 g 来表示^[6, 11](图 2):

$$g = 2R(1 - \sqrt{1 - \varepsilon_s}) \quad (11)$$

式中 ε_s 为土体损失百分率; R 为盾构机外径。

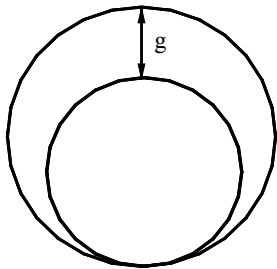


图 2 空隙厚度示意图

Fig.2 Sketch of the thickness of interspace

隧道推进产生的土体位移可以通过对单位土体产生的位移解答积分得到, 如图 3。设隧道开挖断面中心线深度为 h , 自 $(0, -l, h)$ 点沿 x 轴正方向掘进, 推进到 $(0, 0, h)$, 空隙厚度为 g 。土体损失为两个长度相同, 半径不同而且侧壁相连的圆柱体之间的空隙, 即 $V = V_1 - V_2$, 其中外圆柱体 V_1 轴线深度 h , 半径为盾构切口半径 R , 长度为 l ; 内圆柱体 V_2 , 轴线深度 $h + g/2$, 半径为 R ($r = R - g/2$)。则隧道掘进产生的土体位移可以通过以下积分求得:

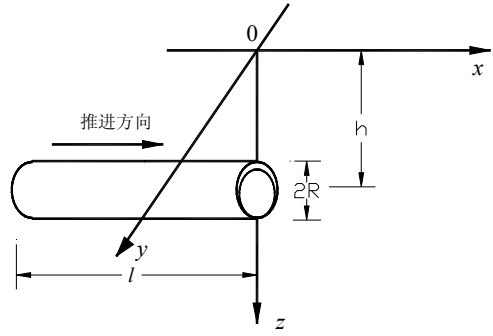


图 3 隧道掘进过程示意图

Fig.3 Sketch of tunnel pulsion

$$U_x(x, y, z) = \int_a^b \int_c^d \int_{-\infty}^0 \frac{(x-\xi) \tan^2 \beta_z}{(\eta-z)^3} \cdot \exp \left\{ -\frac{\pi \tan^2 \beta_z}{(\eta-z)^2} [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2] \right\} d\xi d\zeta d\eta \quad (12)$$

$$- \int_e^f \int_g^h \int_{-\infty}^0 \frac{(x-\xi) \tan^2 \beta_z}{(\eta-z)^3} \cdot \exp \left\{ -\frac{\pi \tan^2 \beta_z}{(\eta-z)^2} [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2] \right\} d\xi d\zeta d\eta$$

$$U_y(x, y, z) = \int_a^b \int_c^d \int_{-\infty}^0 \frac{(y-\zeta) \tan^2 \beta_z}{(\eta-z)^3} \cdot \exp \left\{ -\frac{\pi \tan^2 \beta_z}{(\eta-z)^2} [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2] \right\} d\xi d\zeta d\eta \quad (13)$$

$$- \int_e^f \int_g^h \int_{-\infty}^0 \frac{(y-\zeta) \tan^2 \beta_z}{(\eta-z)^3} \cdot \exp \left\{ -\frac{\pi \tan^2 \beta_z}{(\eta-z)^2} [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2] \right\} d\xi d\zeta d\eta$$

$$U_z(x, y, z) = \int_a^b \int_c^d \int_{-\infty}^0 \frac{\tan^2 \beta_z}{(\eta-z)^2} \cdot \exp \left\{ -\frac{\pi \tan^2 \beta_z}{(\eta-z)^2} [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2] \right\} d\xi d\zeta d\eta \quad (14)$$

$$- \int_e^f \int_g^h \int_{-\infty}^0 \frac{\tan^2 \beta_z}{(\eta-z)^2} \cdot \exp \left\{ -\frac{\pi \tan^2 \beta_z}{(\eta-z)^2} [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2] \right\} d\xi d\zeta d\eta$$

$$\text{式中 } a=h-R, \quad b=h+R, \quad c=-\sqrt{R^2-(\eta-h)^2},$$

$$d=\sqrt{R^2-(\eta-h)^2}, \quad e=h-R+g, \quad f=h+R,$$

$$g=-\sqrt{(R-g/2)^2-(\eta-h-g/2)^2}$$

$$h=\sqrt{(R-g/2)^2-(\eta-h-g/2)^2}$$

$$\tan \beta_z = \frac{h-z}{\sqrt{2\pi R(h/2R)^n(1-z/h)^{0.3}}}$$

以上公式利用 Fortune 编制成相应的计算机程序, 便可方便的计算出盾构施工产生的土体损失引起的周围土体变形。

5 隧道开挖引起的地层应力

由式(1)~(3)可知, 在单元开挖的影响下, 点 (x, y, z) 的应变值为:

$$\varepsilon_{ex} = \frac{\partial U_{ex}(x, y, z)}{\partial x} = \left(\frac{\tan^2 \beta}{z^3} - \frac{2\pi x^2 \tan^4 \beta}{z^5} \right). \quad (15)$$

$$\exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{z^2}(x^2 + y^2)\right] d\xi d\zeta d\eta$$

$$\varepsilon_{ey} = \frac{\partial U_{ey}(x, y, z)}{\partial y} = \left(\frac{\tan^2 \beta}{z^3} - \frac{2\pi y^2 \tan^4 \beta}{z^5} \right). \quad (16)$$

$$\exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{z^2}(x^2 + y^2)\right] d\xi d\zeta d\eta$$

$$\varepsilon_{ez} = \frac{\partial U_{ez}(x, y, z)}{\partial z} = \left[-\frac{2 \tan^2 \beta}{z^3} + \frac{2\pi \tan^4 \beta}{z^5} \right]. \quad (17)$$

$$(x^2 + y^2)] \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{z^2}(x^2 + y^2)\right] d\xi d\zeta d\eta$$

根据弹性理论基本方程得地层中各点的附加应力分量为:

$$\sigma_{ex} = \frac{E}{1-\gamma-\gamma^2} [(1-\gamma)\varepsilon_{ex} + \gamma(\varepsilon_{ey} + \varepsilon_{ez})] \cdot$$

$$d\xi d\zeta d\eta = \frac{E}{1+\gamma} \cdot \frac{\tan^2 \beta (z^2 - 2\pi x^2 \tan^2 \beta)}{z^5}. \quad (18)$$

$$\exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{z^2}(x^2 + y^2)\right] d\xi d\zeta d\eta$$

$$\sigma_{ey} = \frac{E}{1-\gamma-\gamma^2} [(1-\gamma)\varepsilon_{ey} + \gamma(\varepsilon_{ex} + \varepsilon_{ez})] \cdot$$

$$d\xi d\zeta d\eta = \frac{E}{1+\gamma} \cdot \frac{\tan^2 \beta (z^2 - 2\pi y^2 \tan^2 \beta)}{z^5}. \quad (19)$$

$$\exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{z^2}(x^2 + y^2)\right] d\xi d\zeta d\eta$$

$$\sigma_{ez} = \frac{E}{1-\gamma-\gamma^2} [(1-\gamma)\varepsilon_{ez} + \gamma(\varepsilon_{ex} + \varepsilon_{ey})] d\xi$$

$$d\zeta d\eta = \frac{2E}{1+\gamma} \cdot \frac{\tan^2 \beta [\pi \tan^2 \beta (x^2 + y^2) - z^2]}{z^5}. \quad (20)$$

$$\exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{z^2}(x^2 + y^2)\right] d\xi d\zeta d\eta$$

仿照地层位移的求解思路, 根据叠加原理, 可得到隧道开挖引起地层内点 (x, y, z) 处由土体损失产生的附加应力分量为:

$$\sigma_x(X, Y, Z) = \int_a^b \int_c^d \int_{-\infty}^0 \frac{E}{1+\gamma} \cdot \frac{\tan^2 \beta [(z-\eta)^2 - 2\pi(x-\xi)^2 \tan^2 \beta]}{(z-\eta)^5} \cdot$$

$$\exp\left\{-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(z-\eta)^2} [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2]\right\} d\xi d\zeta d\eta$$

$$- \int_e^f \int_g^h \int_{-\infty}^0 \frac{E}{1+\gamma} \cdot \frac{\tan^2 \beta [(z-\eta)^2 - 2\pi(x-\xi)^2 \tan^2 \beta]}{(z-\eta)^5} \cdot$$

$$\exp\left\{-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(z-\eta)^2} [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2]\right\} d\xi d\zeta d\eta$$

$$\sigma_y(X, Y, Z) = \int_a^b \int_c^d \int_{-\infty}^0 \frac{E}{1+\gamma} \cdot \frac{\tan^2 \beta [(z-\eta)^2 - 2\pi(y-\zeta)^2 \tan^2 \beta]}{(z-\eta)^5} \cdot$$

$$\exp\left\{-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(z-\eta)^2} [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2]\right\} d\xi d\zeta d\eta$$

$$- \int_e^f \int_g^h \int_{-\infty}^0 \frac{E}{1+\gamma} \cdot \frac{\tan^2 \beta [(z-\eta)^2 - 2\pi(y-\zeta)^2 \tan^2 \beta]}{(z-\eta)^5} \cdot$$

$$\exp\left\{-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(z-\eta)^2} [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2]\right\} d\xi d\zeta d\eta$$

$$\sigma_z(X, Y, Z) = \int_a^b \int_c^d \int_{-\infty}^0 \frac{2E}{1+\gamma} \cdot \frac{\tan^2 \beta}{(z-\eta)^5} \cdot$$

$$\cdot \{\pi \tan^2 \beta [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2] - (z-\eta)^2\} \cdot$$

$$\exp\left\{-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(z-\eta)^2} [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2]\right\} d\xi d\zeta d\eta$$

$$- \int_e^f \int_g^h \int_{-\infty}^0 \frac{2E}{1+\gamma} \cdot \{\pi \tan^2 \beta [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2] - (z-\eta)^2\} \cdot$$

$$\frac{\tan^2 \beta}{(z-\eta)^5} \cdot \exp\left\{-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(z-\eta)^2} [(x-\xi)^2 + (y-\zeta)^2]\right\} d\xi d\zeta d\eta$$

以上公式中各参数的取值同土体位移计算公式。同样, 利用 Fortune 编制成相应的计算机程序, 便可方便的计算出土体损失引起的土体附加应力。

5 算例分析

上海市地铁二号线浦东新区龙东路—中央公园站区间隧道由两条长 783 m 的圆形隧道, 即上下行线组成。采用法国 FCB 公司提供的外径 6.34 m、内径 5.5 m 的土压平衡盾构机, 由 6 块厚 35 cm、宽 1 m 的高精度钢筋混凝土管片拼装而成。隧道主要穿越上海地区海相沉积第②₂ 层灰色砂质粉土、第③层淤泥质粉质粘土和第④层灰色淤泥质粘土, 其它各层土分别为第①层杂填土、第⑤层灰色粘土。试验地段位于浦东新区花木园林区。隧道穿越的地面无重要建筑物, 地面覆土约为 7.0~9.0 m。

计算参数具体取值如下: $D=6.34$ m, $h=12.5$ m, $L=6.54$ m, $\mu=0.35$, $E_s=3.7$ MPa, $\varepsilon_s=0.7\%$ 。

(1) 土体损失引起的地面变形

根据随机介质理论计算得到, 土体损失引起的隧道轴线上方地表位移变化规律如图 4 所示。图 4 表明, 在推进面前方, 土体损失引起的地表沉降量逐渐减小, 在推进面后方地表沉降量沿 x 轴反向逐渐增大, 到 $x=2D$ 时基本稳定。

图 5 为地表及以下土层横断面沉降槽曲线, 随着深度的增加, 隧道轴线上方最大沉降量增大, 而

沉降槽宽度系数呈减小趋势。

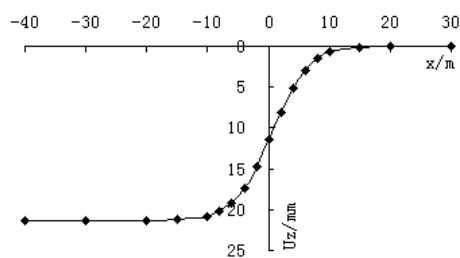


图4 纵向地表变形曲线

Fig.4 Curves of longitudinal surface deformation

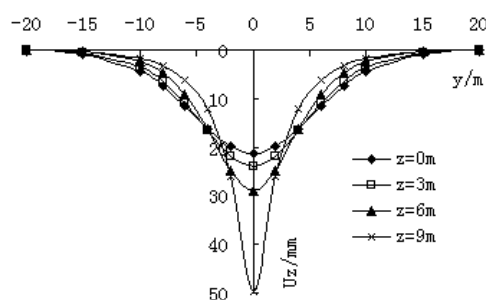


图5 横向沉降槽曲线

Fig.5 Settlement curves of cross section

(2) 土体损失引起的附加应力 σ_x 分布规律

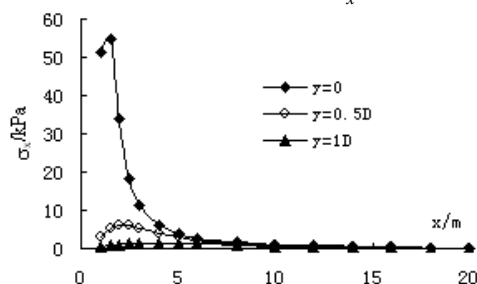


图5 土体损失引起的 σ_x 与 x 的变化关系

Fig.5 Curves of stress σ_x versus distance x

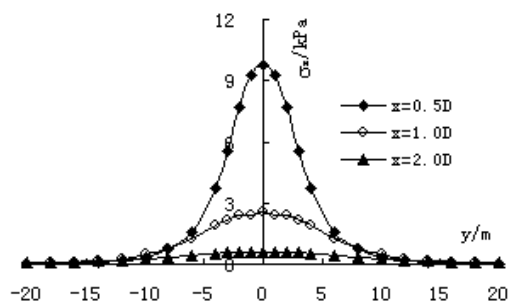


图6 土体损失引起的 σ_x 与 y 的变化关系

Fig.6 Curves of stress σ_x versus distance y

图5和图6分别为土体损失引起的附加应力 σ_x 沿隧道纵向和横向在不同位置处的分布规律。从图中可以看出在推进面前方不同位置, 附加应力的大小和扩散程度不同, 靠近推进面正前方中心处的应力值大, 衰减快, 在 $x=D/2$ 处已衰减约 80%; 随着

与推进面中心处距离的增大, 应力值较小, 衰减慢, 且影响范围较大。从图6可以看出, 靠近推进面应力值大, 衰减快, 而远离推进面处应力值小分布较为平缓, 应力向两边扩散。

(3) 侧向应力 σ_y 的分布规律

盾构推进过程除沿推进方向在土体中产生附加应力外, 在侧向也产生附加应力, 进而对盾构两侧的建(筑)物产生不良影响, 因此分析侧向附加应力的分布规律有实际意义。

图7和图8分别为土体损失引起的侧向附加应力 σ_y 的分布规律。与 σ_x 分布规律明显不同之处在于侧向应力 σ_y 在推进面前方一定范围内为负值, 且沿 y 轴的变化规律存在较大差异。在推进面前方 σ_y 沿 x 轴逐渐减小, 随着与盾构距离的增大, 衰减速率减小。在推进面正前方 σ_y 出现明显负值, 其绝对值随着与推进面距离的增大而减小, 之后 σ_y 沿 y 轴增加达到峰值后逐渐下降, 随着 x 的增大 σ_y 沿 y 轴的增加和衰减速率都有所下降。

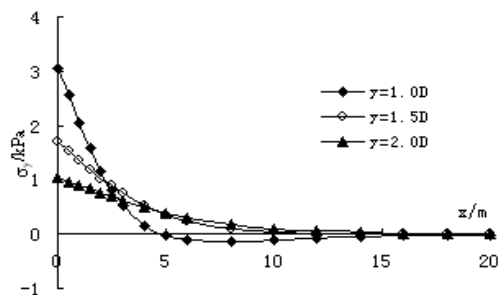


图7 土体损失引起的 σ_y 与 x 的变化关系

Fig.7 Curves of stress σ_y versus distance x

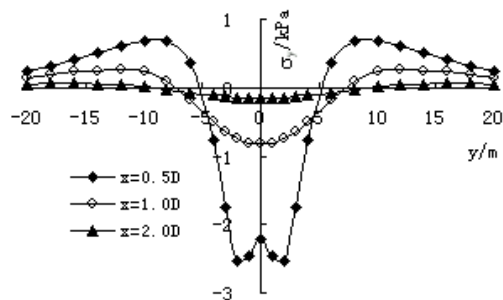


图8 土体损失引起的 σ_y 与 y 的变化关系

Fig.8 Curves of stress σ_y versus distance y

6 结 语

基于随机介质理论中参数取值难于准确确定的限制, 本文提出了一种参数取值的计算方法。并根据土体损失的空间分布规律, 应用随机介质理论, 提出了隧道盾构施工中由于土体损失引起的土体变形和附加应力的计算公式。并通过编制计算机程序, 对算例中由于土体损失产生的变形和附加应力进行

分析。分析表明:

(1) 在推进面的后方土体损失引起的地表沉降量逐渐增大, 2.0D 后基本稳定, 由其引起的地表及以下土层的横向沉降槽曲线近似为正态分布。随着深度的增加, 隧道轴线上方最大沉降量增大, 沉降槽宽度系数呈减小趋势。

(2) 土体损失引起的附加应力, 都具有扩散性, 在推进面或侧向一定范围内产生一定影响, 超过此范围后影响较小。且随着离推进面或侧向距离的增加, 应力的衰减或扩散速度下降, 曲线分布变缓, 影响范围增大。

(3) 侧向附加应力在推进面的正前方为明显负值, 其绝对值随着与推进面距离的增大而减小。

作为初步的研究, 本文主要是为盾构施工对周围邻近土层可能引起的环境效应提供一种计算方法, 根据计算结果对其分布规律进行探讨, 对于影响大小的精确计算尚需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[A]. **State of the Art Report. Proceeding of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**[C]. Mexico City:[s.n.], 1969, 225—290.
- [2] 马·谢尔勒. 顶管工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [3] Lee K M, Rowe R K. Analysis of the three dimensional ground movements, the Thunder Bay Tunnel[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1991, 28(1): 25—41.
- [4] Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. **Geotechnique**, 1987, 37(3): 301—320.
- [5] Loganathan N, Poulos H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movement in clays[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 124(9): 846—856.
- [6] 姜忻良, 赵志民. 镜像法在隧道施工土体位移计算中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 27(6): 801—803.
JIANG Xin-liang, ZHAO Zhi-min. Application of image method in calculating tunneling-induced soil displacement[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2005, 27(6): 801—803.
- [7] 杨冠天, 项彦勇, 张峰. 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): 1 602—1 606.
YANG Guan-tian, XIANG Yan-yong, ZHANG Feng. Analysis of ground movements due to shield tunneling by using a gap-parameter model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(10): 1 602—1 606.
- [8] 张冬梅, 黄宏伟. 地铁盾构推进引起周围土体附加应力的分析[J]. 地下空间, 1999, 19(5): 379—382.
- [9] 胡昕, 黄宏伟. 相邻平行顶管推进引起附加载荷的力学分析[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.
- [10] 黄宏伟, 胡昕. 顶管施工力学效应的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 400—406.
HUANG Hong-wei, HU Xin. 3D numerical analysis on construction mechanics effect of pipe-jacking[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**[J]. 2003, 22(3): 400—406.
- [11] 魏纲. 顶管工程中土与结构的性状及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2005.
- [12] 阳军生, 刘宝琛, 等. 城市地铁隧道施工引起的地表移动及变形[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002, 1.
- [13] 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(1): 56—59.
ZHU Zhong-long, ZHANG Qing-he, YI Hong-wei. Stochastic theory for predicting longitudinal settlement in soft-soil tunnel[J]. **Rocks and mechanics**, 2001, 22(1): 56—59.
- [14] 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]. **Rocks and mechanics**, 2004, 25(2): 320—323.
- [15] 姬永红. 隧道试引起横向地层沉降的随机预测[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(1): 16—18.
JI Yong-hong. Stochastic theory for predicting latitudinal stratum settlement due to the tunnel construction[J]. **Geotechnical Engineering technique**, 2004, 18(1): 16—18.
- [16] 姜忻良, 赵志民, 李园. 隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1 542—1 544.
JIANG Xin-liang, ZHAO Zhi-min, LI Yuan. Analysis and calculation of surface and subsurface settlement trough profiles due to tunneling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1 542—1 544