

盾构法施工隧道纵向地层移动与变形预计

Prediction of longitudinal movement and deformation of stratum in longitudinal section due to tunnel construction by shield

施成华, 彭立敏, 刘宝琛
(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 将盾构法施工隧道开挖引起的地表下沉以及盾构挤压引起的地表隆起均视为随机过程, 应用随机介质理论, 对隧道施工所引起的纵向地层移动与变形进行了分析, 推导了相应的计算公式。工程实例分析表明, 该方法效果良好。

关键词: 盾构隧道施工; 纵向地层移动与变形; 随机介质理论

中图分类号: U 451 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2003)05-0585-05

作者简介: 施成华(1973-), 男, 安徽黄山人, 讲师, 博士生, 从事隧道与地下工程方面的教学与科研工作。

SHI Cheng-hua, PENG Li-min, LIU Bao-chen

(Civil Engineering Department, Center South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The settlement or heave of ground surface due to tunnel excavation or push of shield is considered as a stochastic process and the stochastic medium theory is applied to predict and analyze the movement and deformation of stratum in longitudinal section due to tunnel construction, and the corresponding calculating formulas are derived. An example of case history shows that the prediction method developed in this paper can obtain good results.

Key words: tunnel construction by shield; stratum movement and deformation in longitudinal section; stochastic medium theory

0 引言*

近年来, 随着我国城市建设的发展, 为了改善交通, 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, 从而造成对地面已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是不可避免的。

对于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^[1,2]。本文将岩土体视为一种“随机介质”, 将盾构隧道开挖引起的地表下沉以及盾构挤压引起的前方未开挖土体的地表隆起均视为一随机过程, 应用随机介质理论, 对盾构施工隧道所引起的纵向地层移动与变形进行了分析, 得到了具体的地层移动与变形的计算公式。工程实例分析表明, 该方法具有较好的实用价值。

1 盾构施工推进时地表沉降的组成

盾构推进过程中对周围土体产生扰动, 表现为地表沉降和侧向变形。盾构推进过程中产生的地面变形主要由以下3部分组成^[2]。

(1) 盾构到达前的地面变形 δ_1

盾构施工推进对开挖面前方土体产生扰动, 当盾构前方土体受到挤压时有向前向上的移动(称之为负地层损失), 从而使地表有微量的隆起; 而当开挖面土体因支护力不足而向盾构内移动时, 则盾构前方土体发生向下向后的移动, 从而使地表表现为沉降。

(2) 盾构到达和通过时的地面变形 δ_2

隧道盾构开挖施工过程中有建筑空隙, 这一方面是由于管片拼装后与盾构外壳之间形成空隙引起的, 另一方面盾构施工中偏移隧道轴线也会产生空隙。如果土体不产生压缩和松弛, 建筑空隙的体积即等于地面沉降槽的体积, 适时注浆能有效地减小建筑空隙, 从而有效减小地面变形 δ_2 。注浆的填充率等于注浆体积与建筑空隙体积之比。

(3) 地表后期固结变形 δ_3

后期固结变形是由于盾构推进对周围土体扰动以及地层疏水固结引起的, 前面两种变形可以通过选择施工机械和施工参数加以控制, 但无论什么样的机械和参数, 盾构推进总会在一定程度上扰动土体, 因此后期固结变形 δ_3 会或多或少地存在, 是无法消除的。地面后期固结变形多数只占地面总变形量的较小部分(约为5%~30%)。

2 单元开挖引起的地层移动与变形

隧道施工是在复杂的岩土体中进行的,当岩土体因开挖而发生大量运动时,单个的岩块或者土体颗粒的运动十分复杂,然而大量的实测结果表明,岩土体总的运动趋势有着明显的规律性。由于岩土体移动的这种特性,很难将其视为简单的弹性体或弹塑性体而用经典力学的方法来分析各个岩土块体的运动状态。在这种情况下,应用概率统计的方法可以获得较好的效果。考虑到岩土体的运动为大量已知及未知因素所控制,根据随机介质理论,将岩土体视为随机介质,这样由于隧道开挖所引起的岩土体的运动便可用随机方法加以研究。

从统计观点,可以将整个隧道开挖分解为无限多个无限小的开挖。整个开挖对地层的影响,就应等于构成这一开挖的许多无限小开挖对上部地层影响的总和。如图 1 所示,把长度、宽度和厚度均为无限小的单元开挖定义为单元开挖 $d\xi d\zeta d\eta$,由单元开挖引起的地层下沉可用 $W_e(X, Y, Z)$ 表示。

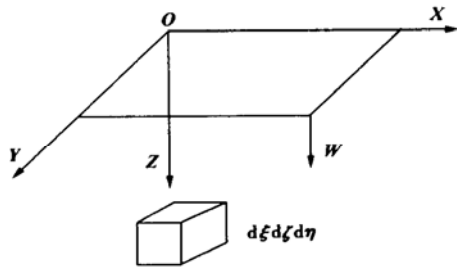


图 1 单元开挖示意图

Fig. 1 Schematic diagram of elemental excavation

根据假定,在不排水固结条件下,最终的沉降盆地的体积应等于地层损失的体积,故当开挖单元完全塌落时等于单元体积 $d\xi d\zeta d\eta$ 。以开挖单元中心为坐标原点,由此得到开挖单元完全塌落引起的上部地层坐标点 (X, Y, Z) 的下沉为^[3]

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

式中 $r(Z)$ 为单元开挖在 Z 水平上的主要影响半径, $r(Z) = Z/\tan \beta$, β 为隧道上部围岩的主要影响角,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。

单元体开挖在引起地层下沉的同时,还会引起地层的水平位移。为了研究各点的纵横向水平位移 $U_{eX}(X, Y, Z)$ 和 $U_{eY}(X, Y, Z)$, 假定岩土体不可压缩,则有

$$\varepsilon_{eX} + \varepsilon_{eY} + \varepsilon_{eZ} = 0, \quad (2)$$

式中 ε_{eX} , ε_{eY} , ε_{eZ} 分别为单元岩土体沿 X , Y , Z 方向上的应变。

单元开挖引起的地层移动和变形可以认为是宏观连续的,则有

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{eX} &= \frac{\partial U_{eX}(X, Y, Z)}{\partial X} \\ \varepsilon_{eY} &= \frac{\partial U_{eY}(X, Y, Z)}{\partial Y} \\ \varepsilon_{eZ} &= \frac{\partial W_e(X, Y, Z)}{\partial Z} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

因此式(2)成为

$$\frac{\partial U_{eX}(X, Y, Z)}{\partial X} + \frac{\partial U_{eY}(X, Y, Z)}{\partial Y} + \frac{\partial W_e(X, Y, Z)}{\partial Z} = 0. \quad (4)$$

解上面方程,根据边界条件,由于对称原因,开挖单元中心线上的点不会发生水平位移,而且,当距离单元中心线无穷远时,地表水平位移应为 0,即当 $X=0$ 和 $X \rightarrow \pm \infty$ 时, $U_{eX}(X, Y, Z)=0$, 当 $Y=0$ 和 $Y \rightarrow \pm \infty$ 时, $U_{eY}(X, Y, Z)=0$, 由此得

$$U_{eX}(X, Y, Z) = \frac{X}{r^3(Z)} \frac{1}{\tan \beta} \exp \left| -\frac{\pi}{r^2(Z)} (X^2 + Y^2) \right| \cdot d\xi d\zeta d\eta \quad (5)$$

$$U_{eY}(X, Y, Z) = \frac{Y}{r^3(Z)} \frac{1}{\tan \beta} \exp \left| -\frac{\pi}{r^2(Z)} (X^2 + Y^2) \right| \cdot d\xi d\zeta d\eta. \quad (6)$$

3 纵向地层移动与变形值计算

由以上盾构推进时地表的沉降变形特点可知:在隧道开挖工作面附近的纵向不均匀地表沉降和水平变形主要由 δ_1 和 δ_2 引起的,后期固结沉降 δ_3 一方面由于占地面总变形量的比例较小,另一方面需要长时间作用才形成,在开挖工作面附近, δ_3 可以忽略不计。 δ_1 通常表现为地表隆起上升,其主要原因是由于盾构开挖施工中为保证开挖面土体稳定,开挖面通常保证有足够的支护力,土体受到盾构挤压表现为地表隆起。 δ_2 则表现为地表下沉,其主要是由于隧道开挖引起的。根据以上分析,盾构推进对地层的扰动影响也可分为隧道开挖和盾构挤压两部分进行考虑,分别进行计算,而后由叠加原理求总的地层移动和变形量。

3.1 盾构隧道开挖地层下沉变形

不考虑盾构对开挖面前方地层的挤压作用,则盾构开挖也可被视为是一个沿 Y 轴为半无限长的空间半平面问题。取如图 2 所示的坐标系,在距离地表深度为 H 处开挖隧道,在隧道开挖工作面处 $Y=0$,这是一个沿 Y 轴方向为半无限长的空间半平面问题,根据随机介质理论,如果开挖空间完全塌落,则由式(1)可

得上覆地层坐标点 (X, Y, Z) 的下沉为

$$\begin{aligned}
 W(X, Y, Z) &= \iint_{\Omega} d\xi d\eta \int_{-\infty}^0 \frac{\tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} \cdot \\
 &\exp \left| - \frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} [(X - \xi)^2 + (Y - \zeta)^2] \right| d\zeta \\
 &= \iint_{\Omega} \frac{\tan \beta}{\sqrt{\pi}(\eta - Z)} \exp \left| - \frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} (X - \xi)^2 \right| \cdot \\
 &\left| \frac{\sqrt{\pi}}{2} + \int_{\frac{\pi Y \tan \beta}{\eta - Z}}^0 \exp(-\varphi^2) d\varphi \right| d\xi d\eta \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中 φ 为换元积分变量; Ω 为隧道开挖横断面区域。

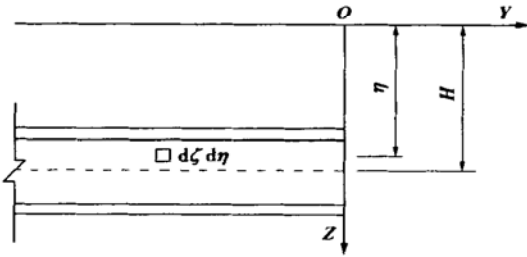


图2 纵向开挖示意图

Fig. 2 Schematic diagram of longitudinal excavation

同理, 开挖空间完全塌落引起上覆地层的纵向水平位移为

$$\begin{aligned}
 U_Y(X, Y, Z) &= \iint_{\Omega} d\xi d\eta \int_{-\infty}^0 \frac{\tan^2 \beta (Y - \zeta)}{(\eta - Z)^3} \cdot \\
 &\exp \left| - \frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} [(X - \xi)^2 + (Y - \zeta)^2] \right| d\zeta \\
 &= \iint_{\Omega} \frac{-1}{2\pi(\eta - Z)} \exp \left| - \frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} [(X - \xi)^2 + Y^2] \right| d\xi d\eta. \quad (8)
 \end{aligned}$$

实际上, 开挖空间完全塌落是一种极端情况, 实际施工时隧道开挖后即采取支护措施, 开挖空间只是发生变形而并未完全塌落。假定开挖平面区域 Ω 变形后成为 ω (见图3), 则上覆地层下沉为

$$\begin{aligned}
 W(X, Y, Z) &= \iint_{\omega} \frac{\tan \beta}{\sqrt{\pi}(\eta - Z)} \cdot \\
 &\exp \left| - \frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} (X - \xi)^2 \right| \cdot \\
 &\left| \frac{\sqrt{\pi}}{2} + \int_{\frac{\pi Y \tan \beta}{\eta - Z}}^0 \exp(-\varphi^2) d\varphi \right| d\xi d\eta \quad (9)
 \end{aligned}$$

上覆地层的纵向水平位移为

$$\begin{aligned}
 U_Y(X, Y, Z) &= \iint_{\omega} \frac{-1}{2\pi(\eta - Z)} \cdot \\
 &\exp \left| - \frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} [(X - \xi)^2 + Y^2] \right| d\xi d\eta. \quad (10)
 \end{aligned}$$

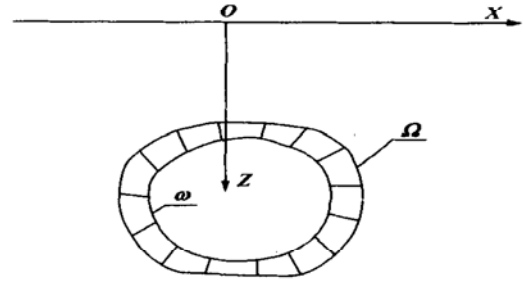


图3 任意断面开挖示意图

Fig. 3 Excavation of arbitrary cross section

隧道施工对地表建筑物及地下管线的影响主要是由于地层的不均匀沉降所导致的地层倾斜和地层弯曲以及不均匀的水平移动所导致的地层水平变形造成, 地层纵向倾斜 $T_Y(X, Y, Z)$ 、水平变形 $E_Y(X, Y, Z)$ 及纵向弯曲曲率 $K_Y(X, Y, Z)$ 可按式求解:

$$\begin{aligned}
 T_Y(X, Y, Z) &= \frac{dW(X, Y, Z)}{dY} = \iint_{\omega} \frac{-\tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} \cdot \\
 &\exp \left| - \frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} [(X - \xi)^2 + Y^2] \right| d\xi d\eta \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_Y(X, Y, Z) &= \frac{dU_Y(X, Y, Z)}{dY} = \iint_{\omega} \frac{Y \tan^2 \beta}{(\eta - Z)^3} \cdot \\
 &\exp \left| - \frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} [(X - \xi)^2 + Y^2] \right| d\xi d\eta \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_Y(X, Y, Z) &= \frac{dW^2(X, Y, Z)}{dY^2} = \iint_{\omega} \frac{2Y \pi \tan^4 \beta}{(\eta - Z)^4} \cdot \\
 &\exp \left| - \frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} [(X - \xi)^2 + Y^2] \right| d\xi d\eta. \quad (13)
 \end{aligned}$$

盾构法施工隧道开挖横断面通常为圆形, 假定隧道开挖后断面均匀变形, 隧道开挖初始半径为 A , 开挖后断面半径均匀收缩了 ΔA , 隧道中心距地表深度为 H (见图4), 则由式(9)可得地层下沉值为

$$\begin{aligned}
 W(X, Y, Z) &= \int_a^b \int_c^d \frac{\tan \beta}{\sqrt{\pi}(\eta - Z)} \cdot \\
 &\exp \left| - \frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} (X - \xi)^2 \right| \cdot \\
 &\left| \frac{\sqrt{\pi}}{2} + \int_{\frac{\pi Y \tan \beta}{\eta - Z}}^0 \exp(-\varphi^2) d\varphi \right| d\xi d\eta - \\
 &\int_e^f \int_g^h \frac{\tan \beta}{\sqrt{\pi}(\eta - Z)} \exp \left| - \frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} (X - \xi)^2 \right| \cdot \\
 &\left| \frac{\sqrt{\pi}}{2} + \int_{\frac{\pi Y \tan \beta}{\eta - Z}}^0 \exp(-\varphi^2) d\varphi \right| d\xi d\eta. \quad (14)
 \end{aligned}$$

式中 $a = H - A$; $b = H + A$; $c = -\sqrt{A^2 - (H - \eta)^2}$; $d = \sqrt{A^2 - (H - \eta)^2}$; $e = H - A + \Delta A$; $f = H + A - \Delta A$; $g = -\sqrt{(A - \Delta A)^2 - (H - \eta)^2}$; $h = \sqrt{(A - \Delta A)^2 - (H - \eta)^2}$.

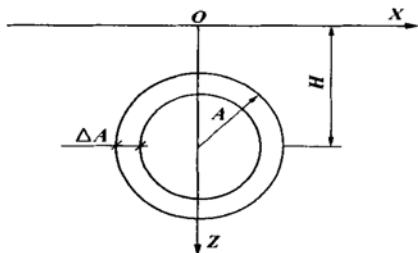


图4 圆形断面开挖示意图

Fig. 4 Excavation of round cross section

同理沿隧道纵向水平位移分布、倾斜分布、水平变形分布以及弯曲曲率分布可由式(10)、(11)、(12)、(13)按以上方法分别计算得到。

3.2 盾构挤压地层隆起变形

盾构推进对前方土体产生挤压变形,反映到地表,便形成了地表的隆起。土体被挤压引起的地层上升同样可以视为一随机事件,可认为是隧道开挖时土体向开挖面运动引起地层下沉的逆过程,考虑单元土体挤压引起的地层上升,取距离地表深度为 Z 处一单元体 $d\xi d\zeta d\eta$,其因挤压引起的上部地层的微上升为

$$H_e(X, Y, Z) = \frac{-1}{r^2(Z)} \exp \left| -\frac{\pi}{r^2(Z)} (X^2 + Y^2) \right| \cdot d\xi d\zeta d\eta \quad (15)$$

同理,根据岩土体不可压缩的假定,即式(2),可得各点的水平位移为

$$U'_{eX}(X, Y, Z) = \frac{-X}{r^3(Z) \tan \beta} \exp \left| -\frac{\pi}{r^2(Z)} (X^2 + Y^2) \right| \cdot d\xi d\zeta d\eta \quad (16)$$

$$U'_{eY}(X, Y, Z) = \frac{-Y}{r^3(Z) \tan \beta} \exp \left| -\frac{\pi}{r^2(Z)} (X^2 + Y^2) \right| \cdot d\xi d\zeta d\eta \quad (17)$$

以上式中,各符号的意义同前。

根据文献[2],盾构推进对前方土体的挤压会产生负地层损失,用 n 表示负地层损失率(n 取负值),同时盾构推进对前方土体的挤压有一定的影响范围,通常为盾构开挖直径的1.5倍(1.5D),任何被挤压空间均可由有限个单元体组成,对每个单元土体挤压的影响进行叠加,则盾构挤压引起的上部地层某点 (X, Y, Z) 的上升值 $H(X, Y, Z)$ 为

$$H(X, Y, Z) = n \int_a^b \int_c^d d\xi d\eta \int_0^{1.5D} \frac{\tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} \cdot \exp \left| -\frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - Z)^2} [(X - \xi)^2 + (Y - \zeta)^2] \right| d\zeta \quad (18)$$

式中符号意义同前。

同理,盾构挤压引起的纵向水平位移、纵向倾斜、纵向水平变形以及纵向地层弯曲曲率可由式(10)、(11)、(12)、(13)按以上同样的方法分别计算得到。

3.3 纵向地层总移动与变形计算

将盾构开挖引起的地层下沉和变形与盾构挤压引起的地层隆起和变形进行叠加,即可得到纵向地层总位移量和总变形量。以上计算公式编制成相应的计算机程序,这样即可方便的计算出由于盾构推进施工引起的周围地层的移动和变形。

4 计算实例

文献[1]介绍了上海某盾构施工隧道正上方纵向地表沉降量测的工程实例,根据实际量测资料绘制了平均埋深为12.5 m的7条纵向沉降曲线,并将这7条曲线拟合成了一条标准的纵向地表沉降曲线。隧道盾构外径6.26 m,地层主要影响角的正切值为0.52,隧道施工完成后半径收敛值 ΔA 为15.0 mm,盾构刀盘挤压前方工作面引起的负地层损失率为-1.2%。利用本文方法对纵向地表下沉分布 $W(X=0, Y, Z=0)$ 进行计算,并与实测的地表下沉位移进行了比较,如图5所示,从图中比较可以看出,本文计算结果同实际量测结果具有良好的一致性。

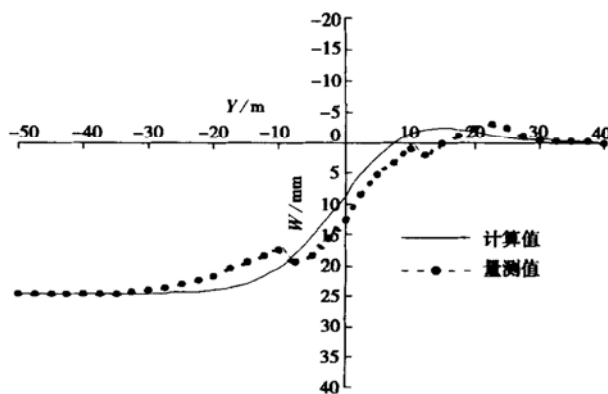


图5 某盾构隧道纵向地表沉降分布实测与计算比较图

Fig. 5 Comparison between measured and predicted surface settlement in a tunnel constructed by shield

为了解盾构隧道施工引起的纵向地层变形规律及其对地下管线设施的影响,假设距隧道开挖中线3 m,地表以下1.5 m处有一煤气管道沿隧道纵向铺设,隧道开挖必然导致煤气管道沿纵向变形,变形过大则在管道接头处引起煤气泄漏,从而引起安全事故。采用本文的计算方法对盾构隧道施工引起的沿煤气管道中心线的纵向水平位移、地层倾斜、水平变形以及地层弯曲曲率进行了计算,其具体分布图见图6。

从图中可以看出,隧道开挖后,沿隧道纵向地表向着隧道已开挖方向移动,地表的纵向最大水平位移发生在隧道开挖工作面前后,其值为5.39 mm;最大纵向地表倾斜发生在开挖工作面处,其值为1.75 mm/m;而最大纵向地表水平变形发生在工作面后7 m附近,其

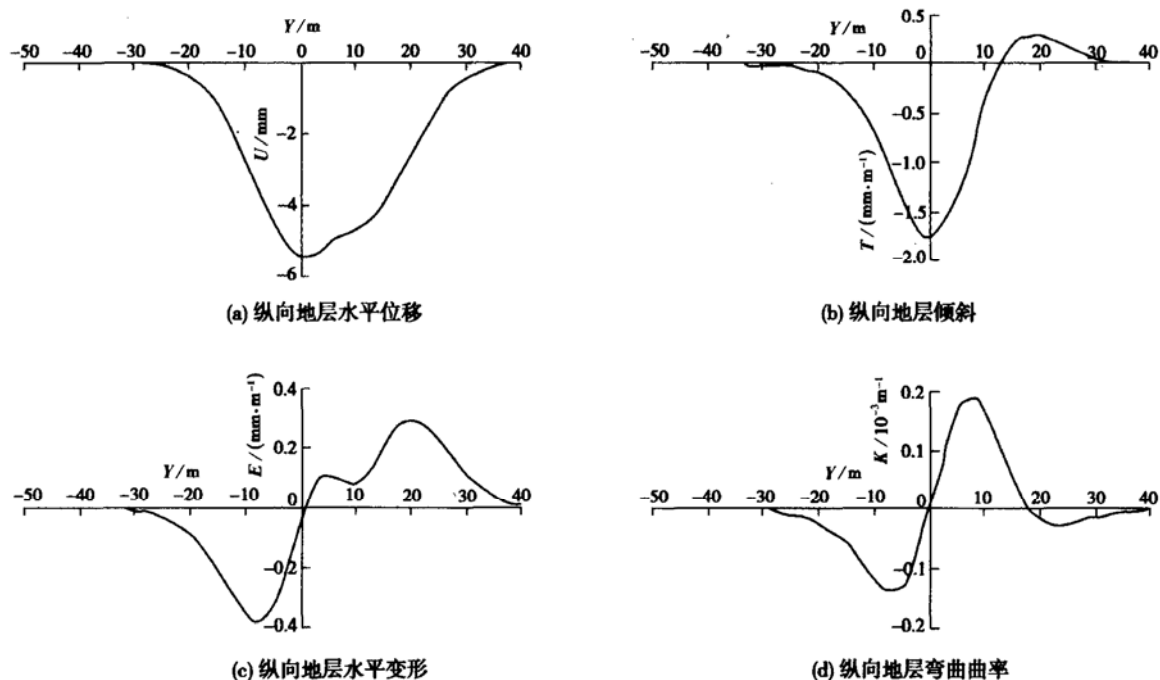


图6 盾构施工隧道纵断面地表移动和变形分布

Fig. 6 Movement and deformation of ground surface on longitudinal section of a tunnel constructed by shield

值为 0.39 mm/m ; 地表弯曲曲率发生在开挖工作面前方 7 m 左右, 其值为 $0.19 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, 说明采用盾构进行施工的隧道, 由于盾构对开挖工作面前方土体的挤压作用, 地层产生微量隆起, 从而造成纵向地层斜率、水平变形等叠加, 使得盾构施工隧道纵向地层变形增大, 从而对隧道附近地下管道设施产生一定的影响, 导致管道(特别是接头部位)破损或处于不平顺工作状态, 影响管道的正常使用及其寿命, 应引起足够重视。

5 结 语

将隧道围岩看作一种随机介质, 将盾构法施工隧道开挖所引起地表下沉以及盾构挤压所引起地表隆起均看作一随机过程, 应用随机介质理论, 对浅埋隧道盾构施工所引起的纵向地层移动与变形进行了分析计算。算例分析表明, 在不考虑后期土体固结沉降的条件下, 计算结果同实测结果具有良好的一致性, 说明采用随机介质方法预测盾构隧道施工阶段纵向地层移动与变形具有一定的实用价值, 特别是对于地表

以下一定深度土层中的地下管线, 采用本文计算方法可较准确地预计其由于隧道开挖所引起的变形, 从而为进一步采取工程措施控制地层移动与变形提供理论依据。当然, 影响盾构施工隧道地层移动与变形的因素很多, 本文未能考虑周全, 也未考虑土体的后期固结沉降, 这些都将在以后的研究工作中作进一步完善。

参考文献:

- [1] 朱忠隆, 等. 软土隧道纵向地表沉降的随机预测方法[J]. 岩土力学, 2001, (3): 56–59.
- [2] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [3] 阳军生, 刘宝琛. 城市隧道施工引起的地表移动与变形[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [4] Liu Baochen. Ground surface movement due to underground excavation in P R China[J]. Comprehensive Rock Engineering, 1993, 4: 780–816.
- [5] 刘宝琛, 张家生. 近地表开挖引起的地表沉降的随机介质方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 12(4): 289–295.