

# 顶管施工隧道扰动区土体变形计算

施成华, 黄林冲

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙, 410075)

**摘要:** 针对目前已有顶管施工扰动区土体变形预计公式存在的缺陷, 提出了一种新的扰动区土体变形计算方法。将顶管施工隧道周边岩土体看作一种随机介质, 将隧道开挖(或挤压)所引起的土体移动看作一随机过程, 应用随机介质理论, 对顶管施工隧道开挖引起的扰动区土体的移动与变形进行分析, 推导了相应的扰动区土体下沉(隆起)、倾斜、水平移动、水平变形及弯曲曲率计算公式, 并编制了相应的计算程序。研究表明: 该方法预计结果精度高; 顶管施工引起的扰动区土体的变形较大, 超出地表建筑物及地下管线的允许变形, 在实际施工中应采取有效的防护措施。

**关键词:** 顶管; 扰动变形; 随机介质理论

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2005)02-0323-06

## Calculation of Soil Deformation in Area of Disturbance Due to Pipe-jacking Construction

SHI Cheng-hua, HUANG Lin-chong

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

**Abstract:** As the present calculated formulas of soil deformation in the area of disturbance due to pipe-jacking construction have some defects, a new calculated method was put forward. The rock and soil around pipe-jacking tunnel is considered as a stochastic medium, the movement of the soil due to tunnel excavation or squeeze is considered as a stochastic process and the stochastic medium theory is applied to analyse and calculate the movement and deformation in the disturbance area due to pipe-jacking construction. The formulas of rock and soil's subsidence, horizontal displacement, inclination, horizontal strain and curvature along tunnel are deduced and the computer program corresponding to it are compiled. The research result shows that the calculating results are in accordance with the measuring results, and the deformation in the area of disturbance due to pipe-jacking construction is large, and it surpasses the required deformation of the constructions on the ground and the pipes underground. Effective protection measures should be taken during the construction.

**Key words:** pipe-jacking; disturbance deformation; stochastic medium theory

顶管施工技术是地下管线非开挖施工的主要技术之一<sup>[1]</sup>。顶管法施工具有以下优点: 将施工作业面移至地下, 从而可以避免施工对地面交通的干扰

以及对城市周围环境的污染和破坏, 同时管线埋深不受限制, 可使管线从密集建筑物底部穿过。然而, 顶管施工时土体开挖引起卸载, 开挖面四周的土体

收稿日期: 2004-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50308029)

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

论文联系人: 施成华, 男, 博士, 讲师; 电话: 0731-2655605(0)

因应力松弛而向开挖面和隧道空间膨胀,引起地层损失,这必然会导致地面和地下土体移动,从而影响邻近建筑物及其他地下管线的安全,导致出现邻近管线断裂、建筑物开裂、路面坍塌等现象。因此,必须对顶管施工隧道扰动区土体的变形进行准确预计,从而为采取有效的防治和保护措施,避免施工病害的发生提供依据。目前,对顶管施工地表沉降的计算主要采用 Peck 公式<sup>[2~4]</sup>,或者在 Peck 公式的基础上提出修正的计算公式<sup>[5]</sup>。这些公式是在实际量测资料基础上提出的经验公式,此外,采用 Peck 公式及其修正公式只能对顶管施工引起的地表沉降进行预计,不能对隧道周边岩土体内部的地层移动和变形进行计算,这使得在实际施工中无法了解顶管周围其他邻近管线的变形,从而无法达到真正的指导施工的目的<sup>[6~15]</sup>。在此,作者视顶管施工引起的地层移动为一随机过程,应用随机介质理论对顶管施工隧道所引起的扰动区岩土体的变形进行分析计算。

### 1 单元开挖引起的地表移动

采用顶管法进行施工的隧道,隧道周边区域内的土体受施工扰动的影响会产生移动,这种土体移动传递到地表面上,会引起地表的升降,同时产生水平位移。

随机介质理论被认为是准确预计地下开采引起的地表移动和变形的有效方法之一。采用该理论,可以将整个隧道开挖分解为无限个无限小的开挖,整个开挖对地表的影响,就等于构成这一开挖的许多无限小开挖对地表影响的总和。根据随机介质理论,开挖岩土体引起的某点下沉是一随机事件。如图 1 所示,考虑在距地表深度为  $H$  处开挖一单元体  $d\xi d\zeta d\eta$ ,由单元开挖引起的地表下沉盆地定义为单元盆地,由此得到开挖单元完全塌落引起的隧道周边坐标点  $(X, Y, Z)$  的下沉量  $W_e(X, Y, Z)$  为<sup>[6,7]</sup>:

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

式中:  $r(Z)$  为单元开挖在  $Z$  水平上的主要影响半径,  $r(Z) = Z/\tan \beta$ ,  $\beta$  为隧道上部围岩的主要影响角,它表示单元开挖引起上部围岩移动和变形的扩散角,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。

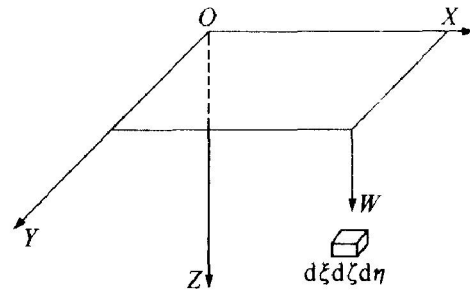


图 1 单元开挖示意图

Fig. 1 Schematic diagram of elemental excavation

顶管施工隧道在施工过程中,当出土量小于实际开挖体积时,隧道周边土体受到顶管的挤压,这会引起地表上升。顶管挤压土体引起的地表某点的上升同样是一个随机事件,可以认为是开挖引起的地表下沉的逆过程。由此,考虑在距地表深度为  $H$  处一单元体  $d\xi d\zeta d\eta$  被挤压向四周移动,则由该单元被挤压引起的隧道周边坐标点  $(X, Y, Z)$  的垂直位移  $H_e(X, Y, Z)$  为:

$$H_e(X, Y, Z) = -W_e(X, Y, Z). \quad (2)$$

式中,负号表示地面上的升。在离开挖工作面较远处,隧道可以被作为平面应变问题进行处理,取如图 2 所示坐标系  $XOZ$ ,则距地表深度为  $H$  处一单元体  $d\xi d\eta$  被开挖或挤压引起的坐标点  $(X, Z)$  的垂直位移为:

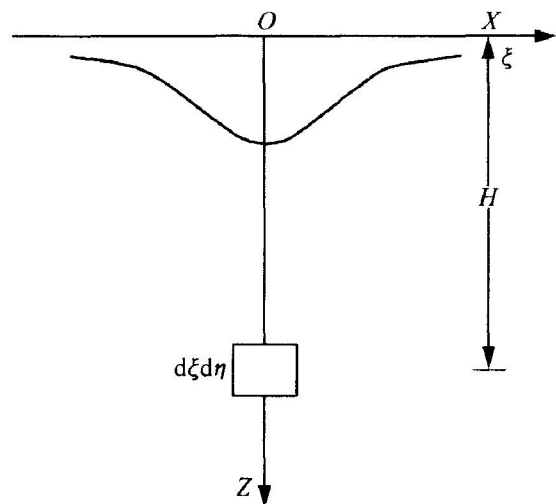


图 2 坐标系下单元开挖示意图

Fig. 2 Diagram of elemental excavation under  $XOZ$  coordinates

$$W_e(X, Z) = \pm \frac{1}{r(Z)} \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(Z)} X^2\right] d\xi d\eta. \quad (3)$$

单元体开挖引起土体上升或下沉的同时, 还会在隧道周边土体中引起水平位移。顶管方法通常用于土质地层, 为了研究各点的水平位移  $U_e(X, Z)$ , 假定土体不可压缩, 则有:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0. \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  和  $\varepsilon_z$  分别为单元岩土体沿  $X$ ,  $Y$  和  $Z$  方向的应变。

对于平面问题,  $\varepsilon_y = 0$ , 式(4)即为:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_z = 0. \quad (5)$$

即 
$$\frac{\partial U_e(X, Z)}{\partial X} + \frac{\partial W_e(X, Z)}{\partial Z} = 0. \quad (6)$$

根据边界条件, 由于存在对称性, 开挖单元中心线上的点不应发生水平位移, 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,  $U_e(X, Z) = 0$ , 由此得:

$$U_e(X, Z) = \pm \frac{X}{r^2(Z)} \frac{1}{\tan \beta} \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(Z)} X^2\right] d\xi d\eta.$$

## 2 顶管施工引起的扰动区土体变形

对岩土体来说, 顶管施工造成的地面升降与其他隧道开挖方法造成的地面升降是相似的。在顶管隧道施工过程中, 会产生正负地层损失, 这种正负地层损失是隧道周边土体发生升降的直接原因。顶管与盾构施工方法的主要区别在于顶管推进完成后不需要进行衬砌, 因此, 顶管与围岩之间不存在空隙, 顶管施工引起的地表升降由顶管施工过程中的出土量来控制。以顶管施工中的出土率  $n$  来表示地层损失,  $n$  为开挖出土量的折实土方与隧道实际开挖体积之比。 $n > 1$ , 表示开挖出土量大于隧道实际开挖体积, 此时产生正地层损失;  $n < 1$ , 表示开挖出土量小于隧道实际开挖体积, 此时隧道周边土体受到挤压, 产生负地层损失。因此, 顶管施工引起的地层损失率可用  $(n-1)$  统一表示。顶管施工隧道任何被开挖(或挤压)空间  $\Omega$  均可由有限个单元体组成, 将整个开挖(或挤压)部分分解成许多个单元体, 根据叠加原理可得隧道周边扰动区土体的上升或下沉量  $W(X, Z)$  为:

$$W(X, Z) = (n-1) \iint_{\Omega} \frac{\tan \beta}{(\eta-Z)} \cdot \exp\left[-\frac{\pi}{(\eta-Z)^2} \tan^2 \beta (X-\xi)^2\right] d\xi d\eta. \quad (7)$$

式中:  $\Omega$  为顶管施工隧道开挖区域的面积。

顶管施工隧道开挖断面通常为圆形或矩形。当开挖横断面为圆形时, 设隧道中心距地表深度为  $H$ , 隧道开挖半径为  $R$ , 则  $\Omega = \pi R^2$ , 式(7)成为:

$$W(X, Z) = (n-1) \iint_{\Omega} \frac{\tan \beta}{(\eta-Z)} \cdot \exp\left[-\frac{\pi}{(\eta-Z)^2} \tan^2 \beta (X-\xi)^2\right] d\xi d\eta. \quad (8)$$

式中:  $a = H - R$ ;  $b = H + R$ ;  $c = -[R^2 - (H - \eta)^2]^{1/2}$ ;  $d = -c$ 。

当开挖横断面为矩形时, 设隧道开挖宽度为  $s$ , 开挖高度为  $h$ , 则  $\Omega = sh$ , 隧道中心距地表深度为  $H$ , 式(7)成为:

$$W(X, Z) = (n-1) \int_{-s/2}^{s/2} \int_{H-(h/2)}^{H+(h/2)} \frac{\tan \beta}{(\eta-Z)} \cdot \exp\left[-\frac{\pi}{(\eta-Z)^2} \tan^2 \beta (X-\xi)^2\right] d\xi d\eta. \quad (9)$$

隧道周边土体各点的水平位移  $U(X, Z)$  为:

$$U(X, Z) = (n-1) \iint_{\Omega} \frac{\tan \beta}{(\eta-Z)^2} (X-\xi) \cdot \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta-Z)^2} (X-\xi)^2\right] d\xi d\eta. \quad (10)$$

隧道施工对地表建筑物及地下管线的破坏性影响主要是土体不均匀升降所导致的倾斜  $T(X, Z)$  和弯曲  $K(X, Z)$  以及不均匀的水平移动所导致的地表水平变形  $E(X, Z)$  造成的, 扰动区土体的倾斜、水平变形及弯曲曲率可按以下公式求解:

$$T(X, Z) = \frac{dW(X, Z)}{dX} = (n-1) \iint_{\Omega} \frac{-2\pi \tan^3 \beta}{(\eta-Z)^3} \cdot (X-\xi) \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta-Z)^2} (X-\xi)^2\right] d\xi d\eta \quad (11)$$

$$E(X, Z) = \frac{dU(X, Z)}{dX} = (n-1) \iint_{\Omega} \frac{\tan \beta}{(\eta-Z)^2} \cdot \left[1 - \frac{2\pi \tan^2 \beta}{(\eta-Z)^2} (X-\xi)^2\right] \cdot \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta-Z)^2} (X-\xi)^2\right] d\xi d\eta \quad (12)$$

$$K(X, Z) = \frac{d^2 W(X, Z)}{dX^2} = (n-1) \iint_{\Omega} \frac{2\pi \tan^3 \beta}{(\eta-Z)^3} \left[1 - \frac{2\pi \tan^2 \beta}{(\eta-Z)^2} (X-\xi)^2\right] \cdot \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta-Z)^2} (X-\xi)^2\right] d\xi d\eta. \quad (13)$$

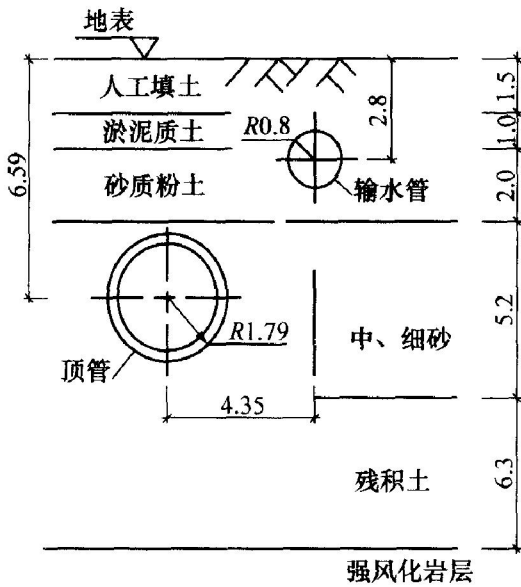
式(10)~(13)中积分区域  $\Omega$  根据不同的隧道开

挖横断面按式(8)或(9)进行求解。由此即可计算出顶管施工隧道扰动区土体移动和变形各分量,并将计算结果图形化。

### 3 计算实例及分析

#### 3.1 计算实例

房营光等介绍了广州市体育东路采用顶管法施工的电力输送管道工程<sup>[5]</sup>。该工程全长 398 m,管道内径为 1.5 m,外径为 1.79 m,管轴线埋深为 6.59 m。管道主要穿越砂质粉土和饱和中细砂层。管道周围分布有自来水管、煤气管、排污管、高压电线管和电讯线路管等,其中外径为 0.8 m 的混凝土自来水管与顶管外壁之间的水平距离仅为 1.76 m。因此,顶管施工扰动对管线的影响非常明显,必须对顶管施工扰动区土体的变形进行准确预测,以防止相邻管线被损坏。顶管工程的施工断面图见图 3。



单位: m

图 3 顶管施工断面图

Fig. 3 Cross-section of pipe-jacking construction

根据已有工程地质资料,参照文献[6]进行工程类比,选取主要影响角的正切  $\tan \beta$  为 0.835,选取某一横断面的出土量经过计算得到其出土率  $n = 1.043$ 。根据以上参数计算得到该横断面的地表下沉分布如图 4 所示。可见,计算值同实测值较吻合。

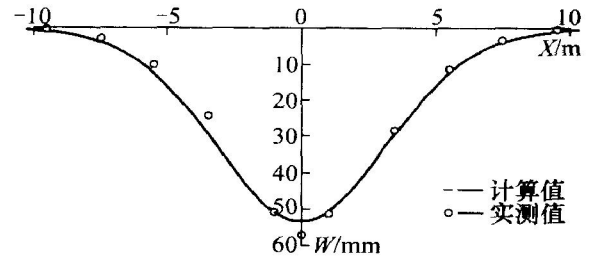


图 4 顶管施工隧道地表沉降计算与实测结果比较图

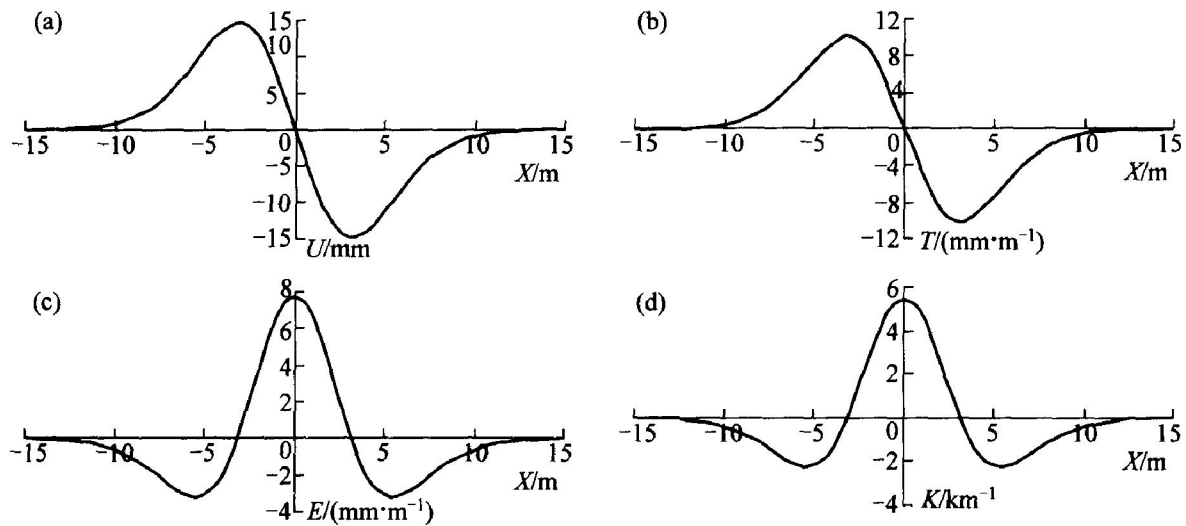
Fig. 4 Comparison of surface settlement between in case measurement and theory prediction

#### 3.2 算例分析

利用上述计算方法,对该断面的地表水平位移、地表倾斜、地表水平变形以及地表弯曲曲率分布分别进行计算,其变形分布见图 5。其中,  $X$  表示地表距顶管隧道中心(轴线)的距离。

从图 4 和图 5 可看出,顶管施工引起的地表沉降影响范围并不是很大,在顶管隧道轴线左、右 10 m 范围内,但其最大值达到 50 mm 以上,地表沉降最大值出现在顶管隧道轴线正上方;而地表水平位移和地表倾斜的影响范围为顶管左、右 12 m,其最大值出现在顶管左、右 3 m,水平位移最大值接近 15 mm,最大地表倾斜接近 10 mm/m;地表水平变形和弯曲曲率的最大值出现在隧道轴线正上方,其最大值分别接近 8 mm/m 和  $5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。经综合分析,在目前施工条件下,以顶管隧道轴线为中心左、右 15 m 范围内地表的移动和变形较大,参照文献[10],地表倾斜、水平变形及地表弯曲曲率等接近或达到砖石结构建筑物的 II 级破坏等级(地层倾斜度  $T \leq 10.0 \text{ mm/m}$ ,水平变形  $E \leq 6.0 \text{ mm/m}$ ,  $K \leq 6 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ),会对地表的建筑物产生破坏性影响,因此,必须对此范围内的建筑物采取必要的防护措施。

利用本文计算方法,对图 3 中自来水管中心位置的土体变形进行计算,得到该位置的土体下沉位移  $W = 8.83 \text{ mm}$ ,水平位移  $U = 7.59 \text{ mm}$ ,地层倾斜度  $T = 8.11 \text{ mm/m}$ ,水平变形  $E = 5.37 \text{ mm/m}$ 。因此,对于混凝土材质自来水管,施工中若不采取保护措施,很可能会导致水管破损断裂。



(a) 一地表水平位移; (b) 一地表倾斜; (c) 一地表水平变形; (d) 一地表弯曲曲率

图5 顶管施工隧道地表变形分布图

Fig. 5 Diagram of surface movement and deformation by pipe-jacking construction

## 4 结 论

a. 将顶管施工隧道周边岩土体看作一种随机介质,将隧道开挖(或挤压)所引起的土体移动看作随机过程,应用随机介质理论,对顶管施工隧道开挖所引起的扰动区土体的移动与变形进行分析,推导了相应的扰动区土体下沉(隆起)、倾斜、水平移动、水平变形及弯曲曲率计算公式。

b. 工程实例计算分析结果表明,采用随机介质方法所得计算结果同实测结果相吻合,这说明随机介质理论能用于计算由于顶管施工隧道开挖所引起的土体移动与变形。

c. 顶管施工扰动区土体的变形较大,特别是当顶管埋深较浅时,顶管施工的扰动区范围虽然不是很大,但其所引起的土体倾斜和水平变形均较大,对地表建筑物及地下管线影响明显,在实际施工中,必须采取有效的防护措施。

### 参考文献:

[1] 余彬泉,陈传灿. 顶管施工技术[M]. 北京:人民交通出版社,2000.  
YU Bin-quan, CHEN Chuang-chan. Pipe-jacking Construction Technology[M]. Beijing: People's Traffic

Press, 2000.

- [2] 周顺华,廖全燕,刘建国,等. 矩形顶管隧道顶进过程的地层损失[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(3): 342-345.  
ZHOU Shun-hua, LIAO Quan-yan, LIU Jian-guo, et al. Stratum Loss during Pipe Jacking of Rectangle Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 342-345.
- [3] 屠毓敏. 长距离顶管穿越海堤时的堤面沉降分析[J]. 中国市政工程,2001,3(1): 53-55.  
TU Yur-min. Surface Settlement from Long Distance Pipe-jacking through an Embankment[J]. Chinese Municipal Works, 2001, 3(1): 53-55.
- [4] 方从启,王承德. 顶管施工中的地面沉降及其估算[J]. 江苏理工大学学报,1998,19(4): 106-110.  
FANG Cong-qi, WANG Cheng-de. An Analysis and Prediction of Ground Settlement Due to Pipe Jacking[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 1998, 19(4): 106-110.
- [5] 房莹光,莫海鸿,张传英. 顶管施工扰动区土体变形的理论与实测分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(4): 601-605.  
FANG Ying-guang, MO Hai-hong, ZHANG Chuang-ying. Theoretic and Testing Analysis of Soil Deformation in the Area of Disturbance Caused by Pipe-jacking[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineer-

- ing, 2003, 22(4): 601 - 605.
- [6] 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.
- YANG Jun-sheng, LIU Bao-chen. Ground Surface Movement and Deformation Caused by Tunnel Construction in City[M]. Beijing: China Railway Press, 2002.
- [7] LIU Bao-chen. Ground Surface Movement Due to Underground Excavation in P. R. China[A]. Comprehensive Rock Engineering[C]. New York: Pergamon Press, 1993: 781 - 817.
- [8] 阳军生, 刘宝琛. 挤压式盾构隧道施工引起的地表移动及变形[J]. 岩土力学, 1998, 9(3): 10 - 13.
- YANG Jun-sheng, LIU Bao-chen. Ground Surface Movement and Deformation Due to Tunnel Construction by Squeezing Shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(3): 10 - 13.
- [9] 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, 14(4): 289 - 296.
- LIU Bao-chen, ZHANG Jia-sheng. Stochastic Method for Surface Subsidence Due to Near Ground Excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(4): 289 - 296.
- [10] 中华人民共和国煤炭工业部. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985.
- Coal Industry Department of P. R. China. The Mine Rules of Coal Pillar Remain under Building, Waters, Railway and Main Pit Shaft[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1985.
- [11] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 浅埋隧道施工引起的纵向地层移动与变形[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(4): 87 - 91.
- SHI Cheng-hua, PEN Li-min, LIU Bao-chen. Longitudinal Stratum Movement and Deformation Caused by Shallow Tunnel Construction[J]. China Railway Science, 2003, 24(4): 87 - 91.
- [12] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 盾构法施工隧道纵向地层移动与变形预计[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 585 - 589.
- SHI Cheng-hua, PEN Li-min, LIU Bao-chen. Prediction of Longitudinal Movement and Deformation of Stratum in Longitudinal Section Due to Tunnel Construction by Shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 585 - 589.
- [13] 施成华, 彭立敏, 胡自林. 隧道开挖对地表建筑物影响的随机介质分析方法[J]. 湘潭矿业学院学报, 2003, 18(3): 60 - 64.
- SHI Cheng-hua, PEN Li-min, HU Zi-lin. Application of Stochastic Medium Method to Predict the Influence Degree on Ground Surface Construction Due to Tunnel Excavation[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2003, 18(3): 60 - 64.
- [14] FANG Y S, LIN J S, SU C S. An Estimation of Ground Settlement Due to Shield Tunneling by the Peck-Fujita Method[J]. Can Geotech J, 1994, 31: 431 - 443.
- [15] 何国清, 杨 伦, 凌赓娣, 等. 矿山开采沉降学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991.
- HE Guo-qing, YANG Lun, LING Geng-di, *et al.* Settlement Theory of Mining Excavation [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1991.