

文章编号:1673-2049(2006)02-0062-06

双圆盾构隧道土体地表沉降特性

朱洪高^{1,2}, 郑宜枫³, 陈 昊⁴

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 200098; 2. 无锡市勘察设计院, 江苏 无锡 214026;
3. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 200082; 4. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030)

摘要:介绍了双圆盾构隧道这种新型隧道形式,与圆形盾构隧道相比,双圆盾构隧道具有占用地下空间小、施工效率高、掘削土量少等优点,但双圆盾构隧道引起的土体位移相对较大,影响范围也比较广。基于双圆盾构隧道的施工特点,通过计算圆形盾构的土体地表沉降,运用土体位移叠加法,研究了双圆盾构隧道引起的土体地表沉降的特性,建立了双圆盾构隧道直径、埋深和地层损失等因素与土体地表沉降的关系。结果表明:双圆盾构隧道的地表沉降槽的形态与圆形盾构隧道相似;双圆盾构隧道的地表沉降量大,影响范围广;双圆盾构隧道的地表沉降与埋深和直径之比有关。

关键词:双圆盾构;隧道;土体地表沉降;位移叠加

中图分类号:U455.4 **文献标志码:**A

Characteristics of Soil Surface Settlement for Double-O-Tube Shield Tunnel

ZHU Hong-gao^{1,2}, ZHENG Yi-feng³, CHEN Hao⁴

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 200098, Jiangsu, China; 2. Wuxi Investigation and Design Research Institute, Wuxi 214026, Jiangsu, China; 3. Shanghai Tunnel Engineering Ltd, Shanghai 200082, China; 4. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Double-o-tube (DOT) shield method is a new method to construct tunnel in the development of underground space. DOT shield tunnel has many advantages, such as less underground space occupancy, higher construction efficiency, less soil excavation, etc, but larger surface settlement and larger disturbance of soils exist in the construction of DOT shield tunnel. Based on the characteristics of the DOT shield tunnel construction, the soil surface settlement was studied using the method of the displacement overlapping. The relationship between the soil surface settlement and the tunnel depth, the tunnel diameter and the gap parameter was also derived. It is shown that the soil surface settlement curve of DOT shield tunnel is similar with that of circle tunnel; the soil surface settlement and the width of the settlement trough of DOT shield tunnel are larger than those of circle tunnel, and the soil surface settlement of DOT shield tunnel is related to the ratio of the depth to diameter of tunnel.

Key words: double-o-tube shield; tunnel; soil surface settlement; displacement overlapping

收稿日期:2006-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(40201024)

作者简介:朱洪高(1963-),男,江苏无锡人,无锡市勘察设计院高级工程师,河海大学工学博士研究生,
E-mail:yongfuxu@sjtu.edu.cn.

0 引言

随着城市化进程的发展,地下空间的开发和利用是必然的。地下空间的开发和利用不可能采用大面积敞开式开挖施工,盾构法施工是主要施工手段之一。盾构掘进引起周围土体产生位移,特别是地表发生沉降,势必影响地面建筑和地下已有管线和构筑物的安全。为了对地面建筑和地下管线采取针对性的保护措施,应了解土体的位移特性和位移大小,确定土体的位移特性和位移大小一直是盾构隧道施工的重要内容^[1-3]。

1 研究现状

估算盾构隧道引起土体地表沉降的方法主要有:经验公式法、理论解析解法和数值分析法。经验公式法以 Peck 公式最为典型^[4]。Peck 公式用正态分布函数表示地表沉降,具体表达式为

$$s_x = s_{0\max} \exp\{-x^2/i^2\} \quad (1)$$

式中: $s_{0\max}$ 为隧道中心的地表沉降的最大值; x 为距隧道中心的距离; i 为沉降曲线反弯点距隧道中心的距离,也为沉降槽宽度系数。Peck 经验公式只是从形态上表示了沉降曲线的形状,没有任何理论依据,虽能很好地拟合正常固结粘土的地表沉降,但在估算粒状土体和超固结粘土的地表沉降时存在很大的误差。此外,Peck 经验公式无法给出土体深层位移和水平位移的计算方法,其适用范围有限。

正是由于 Peck 经验公式的不足,寻找盾构隧道引起地表沉降的理论解析解一直没有间断过。Sagaseta^[5]给出了浅层盾构隧道开挖引起均匀、各向同性、不可压缩土体的地表沉降的半弹性空间的解析解,Verruijt 和 Booker^[6]采用类似于 Sagaseta 的方法得到了由地层缺失引起的地表沉降的半弹性空间的解析解。实际测量结果表明:Verruijt 和 Booker 计算出的沉降槽尺寸比实际的宽,水平位移比实际的大。Sagaseta、Verruijt 和 Booker 都是假设隧道是等向、均匀收缩的[图 1(a)],这与事实不符。Loganathan 和 Poulos^[7]通过准确确定土体地层损失而对 Verruijt 和

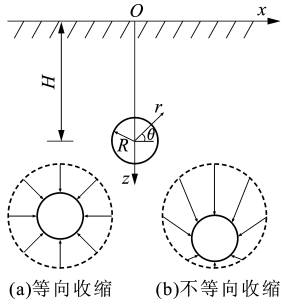


图1 盾构隧道周围土体位移分布

Fig.1 Soil Displacement Distribution Around Shield Tunnel

Booker 公式进行了修正[图 1(b)],给出了准确计算地表沉降和土体水平位移的理论公式。Bobet^[8]、Chou 和 Bobet^[9]考虑了土体与隧道衬砌结构的相互作用,给出了浅层盾构隧道施工引起土体地表沉降的弹性解析解,Yang^[10]等用随机介质理论得到了盾构隧道引起的地表沉降公式,Park^[11-12]考虑到隧道周围土体不均匀变形并假设隧道衬砌是椭圆形[图 1(b)],给出了土体地表沉降的表达式。

双圆盾构工法首先于 1989 年在日本问世,它是指采用在同一平面上配置两个刀盘的双圆形加泥式土压平衡盾构机,并在圆形断面连接部的相切部分的相对位置设置有 Y 形(海鸥形)接头管片来构筑双圆形隧道的施工方法^[13-14]。目前,中国是世界上紧随日本之后掌握双圆盾构施工法的国家。由于双圆盾构施工法是一个新生事物,目前对双圆盾构隧道引起地表沉降的研究很少。周文波^[15]首次报道了中国双圆盾构隧道施工引起周围土体地表沉降的监测结果,监测结果表明:双圆盾构隧道引起地表沉降符合正态分布(图 2)。根据图 2 中的拟合结果,得到 Peck 经验公式的参数为: $s_0 = 28 \text{ mm}$, $i = 5 \text{ m}$ 。项兆迪^[16]等分析了日本大阪商街公园地铁车

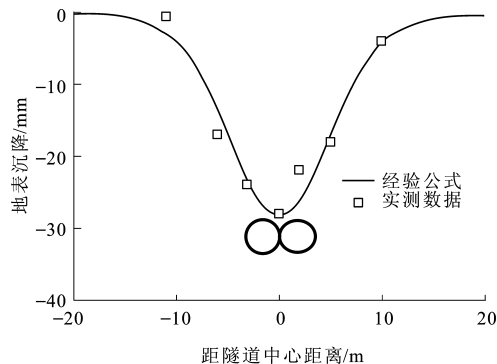


图2 双圆盾构隧道的土体地表沉降

Fig.2 Soil Surface Settlement of DOT Shield Tunnel

站三连体盾构掘进引起地表沉降,并用 Peck 经验公式对其进行拟合,发现三连体盾构掘进引起地表沉降同样符合 Peck 经验公式(图 3),其中 $s_0 = 6 \text{ mm}$, $i = 13 \text{ m}$ 。Addenbrooke 和 Potts^[17]分析了两相邻盾构隧道前后施工引起地表总沉降的计算方法,即将单个隧道沉降进行叠加,得到总沉降(图 4)。尽管单个隧道的沉降槽形状不同,但叠加后得到双圆盾构隧道总沉降仍然符合正态分布^[18-19]。本文中从分析双圆盾构隧道引起地表沉降的特性入手,对圆形盾构隧道地表沉降进行叠加,给出了计算双圆盾构隧道地表沉降的计算方法,并对双圆盾构隧道的埋深、隧道直径等因素对地表沉降的影响进行分

析,提出了规律性的结论,供工程实践参考应用。

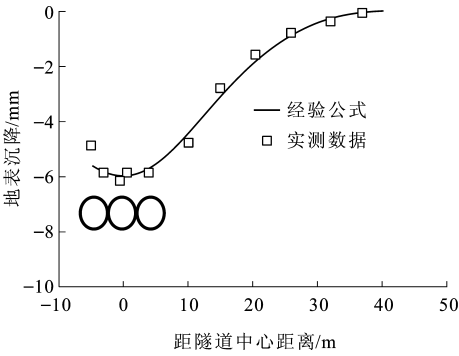


图 3 三连体盾构隧道的土体地表沉降
Fig. 3 Soil Surface Settlement of Triple-Shield Tunnel

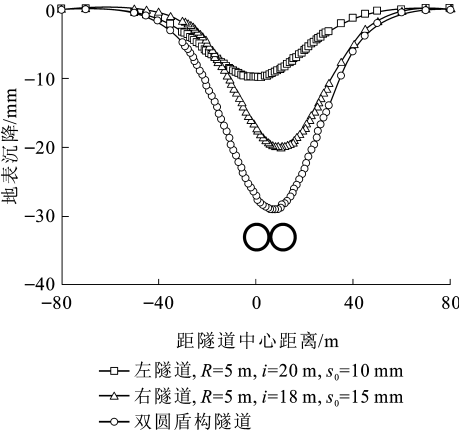


图 4 用叠加法得到的双圆盾构隧道的土体地表沉降
Fig. 4 Soil Surface Settlement Obtained by Overlapping Method of DOT Shield Tunnel

2 双圆盾构隧道与圆形盾构隧道比较

自有了盾构施工法以来,隧道断面一般采用圆形,主要原因有:

- (1)对于隧道承受外荷载来说,圆形是结构力学中最稳定的形状。
- (2)在施工方面,圆形盾构开挖、管片制作、拼装都比较容易。
- (3)圆形盾构推进时,即使盾构产生绕中心轴转动的情况,也不会改变净空断面。
- (4)圆形对以旋转刀盘为开挖机构的机械开挖盾构有利。

目前,圆形盾构隧道的施工技术已经日趋成熟。城市地铁区间隧道传统的施工方法是采用圆形盾构法分别建造两条单体隧道。上海并列圆形单体隧道已有 60 余公里,随着施工技术的进步,发现建造并列圆形单体隧道存在以下弊端:

- (1)两条隧道分别施工,相互之间存在影响,增

加了两条隧道的不稳定性。

(2)为了克服并列单体隧道之间的相互影响,保证两条隧道之间的必要间距,要加大盾构工作井的规模,占用较大的城市地下空间,特别在工程条件受限制的狭窄空间里往往难以实施。

(3)两条隧道分别施工,存在盾构二次转换、拆装和吊运,工作量大,施工效果低等问题。

与圆形盾构隧道相比,双圆盾构隧道在外形上宛如一对连体的普通圆形盾构隧道,在功能上却具有普通盾构不能比拟的优势,其主要表现在以下几个方面:

(1)一次推进就能完成地铁上、下行线两条隧道,施工效率高。

(2)比普通盾构隧道更有效地节约了空间,保护了环境。

(3)如图 5 所示,与一个同大的圆形隧道相比,横断面开挖面积减少了 30%,高度降低了 32%,宽度则增加了 18%,衬砌量减少了 28%;与两个中等大小的圆形隧道相比,横断面开挖面积减少了 24%,宽度减少了 14%,衬砌量减少了 28%。

(4)在建筑物下狭小的空间中穿行的能力也优于普通盾构,更为重要的是,双圆盾构隧道在两条隧道相连处,每 13 m 就自然形成一个宽 48 cm 的通道,正好能穿过一个成年人,一旦隧道中遇到火警等险情,人员逃生和撤离变得极为便利,隧道的安全性大大提高。

(5)缩小了区间隧道所占用的地下空间,减小掘削土量。

(6)缩小对区间隧道沿线地面建筑物的影响范围,更有利于城市的地面规划和建设。

(7)可以在狭窄的道路或地下管线之下较浅的位置进行施工。

(8)由于工作井的规模缩小了,可以降低地铁区内隧道和车站的建设成本。

3 双圆盾构隧道引起的土体地表沉降

Park 给出了土体地表沉降的表达式

$$\left. \begin{aligned} s_0 &= 2\epsilon \frac{R^2 H}{x^2 + H^2} \\ \epsilon &= \frac{g[1 - (z - H)/R - x^2/(2R^2)]}{2R} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: s_0 为地表沉降; g 为隧道顶的地层损失; H 为隧道中心的埋深; R 为隧道半径。Loganthan 和 Poulos 及 Lee^[20] 详细讨论了地层损失 g 的确定方

法,对于地层损失 g 的确定方法,不再赘述。

双圆盾构隧道的高程主要受盾构机自身偏转的影响,当盾构转角比较大时,盾构高程控制效果较差,特别是盾构机与隧道管片之间存在比较大的转角差的情况下,将导致左右隧道的地层损失不一样,如图 6 所示,因此在计算双圆隧道土体地表沉降时,应分别考虑左右隧道的地层损失,再进行叠加。

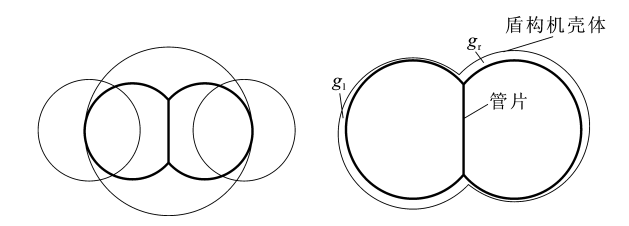


图 5 双圆盾构隧道与单圆隧道的比较

图 6 双圆盾构隧道地层损失的一般情况

Fig. 5 Comparison Between DOT Shield Tunnel and Single Circle Tunnel

Fig. 6 General Situation of Ground Loss of DOT Shield Tunnel

假设左、右两侧隧道的地层损失分别为 g_1 和 g_r ,以左侧隧道中心为计算的基准点,那么双圆盾构隧道施工引起的土体地表沉降可以由 Park 提出的圆形隧道的土体地表沉降叠加得到

$$s_0 = s_{0l}(g_1, x) + s_{0r}(g_r, x - 2R) \quad (3)$$

式中: s_{0l} 和 s_{0r} 分别为左侧隧道和右侧隧道单独引起的地表沉降; $x-2R$ 为对右侧隧道的坐标进行了变换。

现就以下几种工况对双圆盾构隧道引起的土体地表沉降的特性进行分析。

工况 1:双圆盾构隧道直径为 $2R=10\text{ m}$,隧道中心埋深为 $H=20\text{ m}$,左侧隧道的地层损失为 $g_1=20\text{ mm}$,右侧隧道的地层损失为 $g_r=60\text{ mm}$ 。

工况 2:双圆盾构隧道直径为 $2R=10\text{ m}$,隧道中心埋深为 $H=10\text{ m}$,左侧隧道的地层损失为 $g_1=20\text{ mm}$,右侧隧道的地层损失为 $g_r=60\text{ mm}$ 。

工况 3:双圆盾构隧道直径为 $2R=20\text{ m}$,隧道中心埋深为 $H=20\text{ m}$,左侧隧道的地层损失为 $g_1=20\text{ mm}$,右侧隧道的地层损失为 $g_r=60\text{ mm}$ 。

工况 4:双圆盾构隧道直径为 $2R=10\text{ m}$,隧道中心埋深为 $H=20\text{ m}$,左侧隧道的地层损失为 $g_1=20\text{ mm}$,右侧隧道的地层损失为 $g_r=60\text{ mm}$ 。

双圆盾构隧道 4 种工况的地表沉降的计算结果如图 7 所示。图 7(a)为不同埋深双圆盾构隧道的地表沉降比较,图 7(b)为不同直径双圆盾构隧道的地表沉降比较。从图 7 中可以看出,相比于圆形盾构隧道,双圆盾构隧道的地表沉降具有以下特点:

(1)与圆形盾构隧道的地表沉降一样,双圆盾构

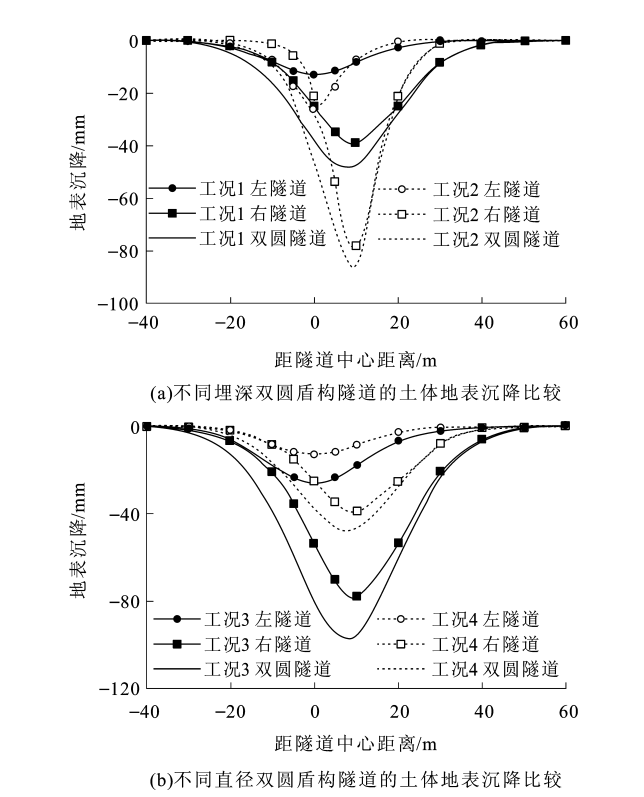


图 7 双圆盾构隧道土体地表沉降的计算结果

Fig. 7 Calculation Result of Soil Surface Settlement of DOT Shield Tunnel

隧道的地表沉降槽的形态也可以用 Peck 经验公式所采用的正态分布函数表示。

(2)双圆盾构隧道的地表沉降量比圆形盾构隧道的大,影响范围也比圆形盾构隧道广,是圆形盾构隧道直径的 4 倍以上,这与现场实际监测结果一致。

(3)从图 7(a)中可以看出,双圆盾构隧道的埋深越大,地表沉降相对越小,沉降槽的宽度越大,也就是影响范围越广。

(4)从图 7(b)中可以看出,双圆盾构隧道的直径越大,地表沉降越大,沉降槽的宽度越大,也就是影响范围越广。

(5)在地层损失和埋深与直径之比 $H/(2R)$ 相同的情况下,双圆盾构隧道地表的沉降最大,地表沉降与埋深和直径的具体数值无关,而取决于两者的比值。

(6)双圆盾构隧道的地表沉降槽不总是对称分布在两个圆形隧道之间,往往是偏向地层损失大的隧道一侧,这与现场实际监测结果一致。

Park 研究了盾构隧道周围土体位移分布对地表沉降的影响,将盾构隧道周围土体位移分布简化为图 8 中的 3 种可能的形式,并提出与地层损失有关的参数 ϵ 的表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \frac{g}{2R} \left(1 - \frac{z-H}{R} \right) \\ \epsilon &= \frac{g}{2R} \left(1 - \frac{z-H}{R} - \frac{x^2}{2R^2} \right) \\ \epsilon &= \frac{g}{8R} \left(5 - 3 \frac{z-H}{R} - \frac{3x^2}{R^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对图 8 中的 3 种情况,分别计算双圆盾构隧道的地表沉降,计算结果比较如图 9 所示。从图 9 中可以看出,图 8 中的 3 种位移分布形式对双圆盾构隧道的地表沉降的影响不大,表明采用任何一种位移分布形式都可得到比较准确的地表沉降结果。

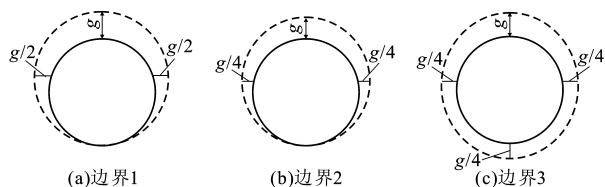


图 8 隧道周围土体的位移分布形式

Fig. 8 Displacement Distribution Form of Soil Around Tunnels

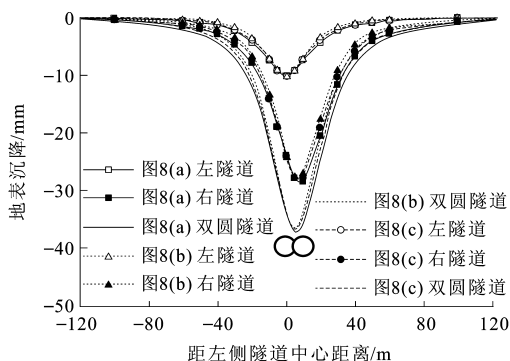


图 9 隧道周围土体位移分布对土体地表沉降的影响

Fig. 9 Effect of Soil Displacement Distribution Around Tunnels on Soil Surface Settlement

4 结 语

(1) 双圆盾构隧道的地表沉降槽的形态也可以用 Peck 经验公式所采用的正态分布函数表示,地表沉降槽不总是对称分布在两个圆形盾构隧道之间,往往是偏向地层损失大的隧道一侧。

(2) 双圆盾构隧道的地表沉降量越大,影响范围越广;埋深越大,地表沉降相对越小,沉降槽的宽度越大,也就是影响范围越广;双圆盾构隧道的直径越大,地表沉降越大,沉降槽的宽度也越大。

(3) 双圆盾构隧道地表的沉降与埋深和直径的具体数值无关,而取决于两者的比值。

(4) 双圆盾构隧道的地表沉降与隧道周围土体

位移分布的关系不大,主要取决于隧道的地层损失。

参考文献:

References:

- [1] 张云,殷宗泽,徐永福.盾构法隧道引起的地表变形分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(3):388-392.
ZHANG Yun, YIN Zong-ze, XU Yong-fu. Analysis of Three-Dimensional Ground Surface Deformations Due to Shield Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 388-392.
- [2] 沈培良,张海波,殷宗泽.上海地区地铁隧道盾构施工地面沉降分析[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(5):556-559.
SHEN Pei-liang, ZHANG Hai-bo, YIN Zong-ze. Ground Settlement Due to Shield Construction in Shanghai Metro Tunnel Project[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2003, 31(5): 556-559.
- [3] 施成华,彭立敏,刘宝琛.盾构法施工隧道纵向地层位移与变形预测[J].岩土工程学报,2003,25(5):585-589.
SHI Cheng-hua, PENG 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.
- [4] PECK R B. Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground[C]// Soil Mech. and Found Engrg. Institute. Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found Engrg. Mexico: Mexico Press, 1969: 225-290.
- [5] SAGASETA C. Analysis of Undrained Soil Deformation Due to Ground Loss[J]. Geotechnique, 1987, 37(3): 301-320.
- [6] VERRUIJT A, BOOKER J R. Surface Settlement Due to Deformation of a Tunnel in an Elastic Half Plane[J]. Geotechnique, 1996, 46(4): 753-756.
- [7] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movement in Clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 129(9): 846-856.
- [8] BOBET A. Analytical Solutions for Shallow Tunnels in Saturated Ground[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(12): 1 258-1 266.
- [9] CHOU W I, BOBET A. Predictions of Ground Deformation in Shallow Tunnels in Clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, 17(1): 3-19.
- [10] YANG J S, LIU B C, WANG M C. Modeling of Tunneling-Induced Ground Surface Movements Using

- Stochastic Medium Theory[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(2): 113-123.
- [11] PARK K H. Elastic Solution for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays[J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(4): 310-318.
- [12] PARK K H. Analytical Solution for Tunnelling-Induced Ground Movement in Clays[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(3): 249-264.
- [13] 周文波, 顾春华. 双圆盾构施工技术[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(4): 22-44.
ZHOU Wen-bo, GU Chun-hua. Construction Technique of DOT Shield[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41(4): 22-44.
- [14] 宋 博. 地下隧道双圆盾构施工技术研究[J]. 建筑施工, 2004, 26(2): 150-152.
SONG Bo. Research on Double Circle Shield Construction Technique Underground Tunnelling [J]. Building Construction, 2004, 26(2): 150-152.
- [15] 周文波. 双圆隧道施工对环境的影响[J]. 上海建设科技, 2004, 12(6): 36-37.
ZHOU Wen-bo. Environmental Effect of the DOT Shield Construction [J]. Shanghai Construction Science and Technology, 2004, 12(6): 36-37.
- [16] 项兆迪, 楼如岳, 傅德明. 最新泥水盾构技术[R]. 上海: 上海隧道工程股份有限公司, 2001.
XIANG Zhao-di, LOU Ru-yue, FU De-ming. The Newest Technology of Soil-Water Balance Shield[R]. Shanghai: Shanghai Tunnel Engineering Ltd, 2001.
- [17] ADDENBROOKE T I, POTTS D M. Twin Tunnel Interaction: Surface and Subsurface Effects[J]. The International Journal of Geomechanics, 2001, 1(2): 249-271.
- [18] 丁洲祥, 龚晓南, 李又云, 等. 考虑变质量的路基沉降应力变形协调分析法[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 6-11.
DING Zhou-xiang, GONG Xiao-nan, LI You-yun, et al. Method of Stress-Deformation Compatibility Analysis Considering Variable Mass for Roadbed Settlement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 6-11.
- [19] 张仪萍, 曹国强, 李 涛, 等. 分级加载条件下沉降预测方法[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 30-33.
ZHANG Yi-ping, CAO Guo-qiang, LI Tao, et al. Prediction Method of Settlement Under Multi-stage Loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 30-33.
- [20] LEE K M, ROWE R K, LO K Y. Subsidence Owing to Tunneling I: Estimating the Gap Parameter[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(6): 929-940.

《建筑工人》2006 年征订通知

《建筑工人》创刊于 1980 年,曾多次获得北京市和华北地区优秀期刊称号,在第二届全国优秀科技期刊评比中荣获二等奖。《建筑工人》拥有一支高水平的作者队伍和高质量的审稿队伍,并建立了一套完善的质量控制体系和制度,坚持在三校的基础上,实行内部统校审读、读者有奖挑错、专家评刊等行之有效的作法,在提高质量的进程中自我加压、自绝退路,力求将少差错乃至无差错的精品期刊奉献给读者。

《建筑工人》主要栏目有:经验交流、建筑知识、技术革新、操作工艺、技术讲座、质量病院、水电暖通、工程预算、测量经纬、装修世界、防水天地、施工管理、施工计算、岗位培训、安全园地、建筑生活、建筑法规和建筑文萃。

欢迎订阅、投稿及刊登广告!

地 址:北京市三里河北街甲 1 号建筑技术杂志社

电 话:(010)68511882

邮 编:100045

传 真:(010)68589257