

盾构隧道叠交施工引起的土层位移场分布规律

廖少明¹, 余 炎¹, 白廷辉², 高立群¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海申通集团有限公司, 上海 200031)

摘 要: 考虑盾构隧道叠交施工之间的相互影响, 应用边界单元法对相邻隧道开挖过程中的三种典型叠交位置关系, 引起的地层位移场分布规律及相互影响进行分析。分析结果表明: 单条隧道开挖引起的地表最大沉降值出现在隧道轴线的正上方, 而两左右或上下相邻隧道开挖的地表及土层内部的最大沉降值则出现在两隧道的纵轴线之间, 且偏向上方埋深较浅的隧道。隧道开挖引起的地层深层与浅层变形趋势是一致的, 但在两隧道轴线上方的深层土体的沉降要远比浅层土体大。叠交隧道的埋深及其相对空间位置关系对土层的位移场有较大的影响。

关键词: 盾构; 地铁隧道; 边界单元法; 相互作用; 位移场

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)04-0485-06

作者简介: 廖少明(1966-), 男, 湖北天门人, 工学博士, 副教授, 主要从事盾构法隧道工程设计与信息化施工技术研究。

Distribution of ground displacement field owing to two overlapped shield tunneling interaction

LIAO Shao-ming¹, YU Yan¹, BAI Ting-hui², GAO Li-qun¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Shentong Holdings Co., Ltd., Shanghai 200031, China)

Abstract: Considering the interaction of overlapped shield tunneling, the boundary element method was applied to analyze the ground displacement distribution and interaction between two adjacent tunnels in three typical situations. It was shown that the maximum displacement occurred on the tunnel axis when one tunnel was excavated, while the maximum value happened near the shallow tunnel and between the area of two tunnels when two adjacent tunnels were excavated at the same time. The tendency of deformation of deep stratum was consistent with that of the shallow stratum, but the settlement of deep stratum over the tunnel was far larger than that of the shallow stratum. The embedded depth and relative location of two tunnels severely affected the displacement field.

Key words: shield; subway tunnel; boundary element method; interaction; displacement field

0 前 言

随着城市的发展地下工程建设项目数量和规模迅速增大, 尤其是 20 世纪 90 年代至今, 地铁的迅猛发展, 以及其他地下公用设施规模迅速扩大, 带来了大量的施工相互影响问题。特别是随着地铁网络的逐步形成, 地下铁道几乎要覆盖上海大部分主要车行干道及商业繁华地段, 其他地下市政工程及地铁相遇及相邻相交的机会大大增加, 特别是盾构隧道的施工, 相互交叉穿越的情况越来越复杂, 最近还出现了叠交施工的高难度工程, 使得施工相互影响问题日益突出, 因此如何在设计和施工中准确预报位移, 保护既有地下构筑物的安全便成为设计和施工中的一个十分棘手而重大的技术问题。

Peck^[1], Attewell 和 Woodman^[2]分别提出用正态分布曲线估算由于隧道开挖引起的地面变形, 基于已有的施工经验, 应用 Peck 方法可以取得较好的预测结果。但由于它只是一种经验方法, 缺少必要的理论依据。Peck 认为地面的变形主要取决于土层和地下水位条件, 修建隧道的深度和隧道直径, 以及施工过程。但这些影响因素都没有在 Peck 公式中体现出来, 且该公式也不能估计土层内部的位移场分布。

对于土层内部的位移场一些学者采用近似的分析解进行预测, Sagaseta^[3]利用各向同性均质不可压缩土的地层损失概念, 给出了应变场的近似解。Verruijt 和 Booker^[4]在 Sagaseta 的基础上结合土层泊松比和隧

道空间椭圆化的影响,提出了均质弹性半无限土层中埋藏一圆形隧道的位移场和应力场近似解,但运用 Verruijt 和 Booker 的方法求得的地面沉降槽宽度和土层水平位移值一般情况下都较实测值大。Loganathan 和 Poulos^[5]重新定义了地层损失参数,并将其带入 Verruijt 和 Booker^[4]近似解中,得到的预测结果与大多数实测结果都较为接近。

在利用有限单元法分析隧道开挖问题中, Rowe, et al^[6]和 Ng, et al^[7]对隧道附近土层位移进行二维弹塑性计算分析,结果显示在平面应变条件下预测值与现场实测值较为吻合。Lee, et al^[8-10]考虑了隧道开挖的三维实际效果,提出了三维弹塑性分析模型,得到不同截面处的位移值与实测值都较为一致。为了能在二维有限元分析中考虑三维效应, Lee, et al^[11]对 Rowe, et al^[12]提出的间隙参数进行了重新定义,同时 Rowe, et al^[13]将这一重新定义的间隙参数引入二维弹塑性有限元分析,计算结果表明对于 14 组实测数据预测值都与之较吻合。Yamaguchi, et al^[14]分析了东京 4 条近距离隧道施工引起的相互作用情况,总结出一些有意义的结论。

对于相邻双隧道叠交施工问题,目前很少有这方面的研究分析。本文提出应用间接边界单元法对这一问题进行分析,考虑相邻隧道间的共同作用对隧道周边位移场的影响,取得了一些有意义的计算结果,为保护已建建筑和地下管线的安全提供了可靠的理论依据。

1 相邻隧道开挖的边界单元法分析

如图 1 所示,对双隧道开挖问题中的土层位移可以通过对隧道的边界进行积分,即弹性半无限土体中任意一点的水平位移的积分表达式为^[15]

$$u(A) = \int_{S_1} KUW(A, B) \phi_{w_1}(B) dS_1 + \int_{S_1} KUU(A, B) \phi_{u_1}(B) dS_1 + \int_{S_2} KUW(A, B) \phi_{w_2}(B) dS_2 + \int_{S_2} KUU(A, B) \phi_{u_2}(B) dS_2 \quad (1)$$

同理可得弹性半无限土体中任意一点的竖向位移为

$$w(A) = \int_{S_1} KWW(A, B) \phi_{w_1}(B) dS_1 + \int_{S_1} KWU(A, B) \phi_{u_1}(B) dS_1 + \int_{S_2} KWW(A, B) \phi_{w_2}(B) dS_2 + \int_{S_2} KWU(A, B) \phi_{u_2}(B) dS_2 \quad (2)$$

式中 $u(A)$, $w(A)$ 分别为 A 的水平位移和竖向位移; S_1, S_2 分别表示隧道 1 和隧道 2 的边界; ϕ_u , ϕ_w 分别为隧道边界上虚拟水平应力和虚拟竖向应力。 $KUW(A, B)$, $KWW(A, B)$ 分别表示土层中 B 点作用一竖向单位力引起土层中 A 点的水平位移和竖向位移。 $KUU(A, B)$, $KWU(A, B)$ 分别表示在土层中 B 点

作用一水平单位力引起土层中 A 点的水平位移和竖向位移^[16]。

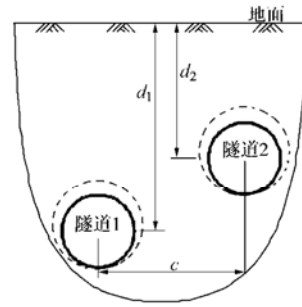


图 1 弹性半无限土体中的隧道截面图

Fig. 1 Section tunnels in the elastic semi-infinite soil

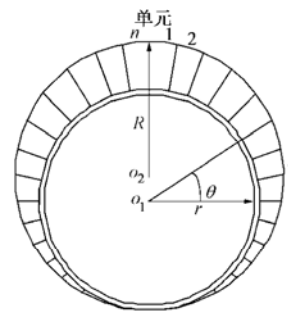


图 2 隧道边界单元

Fig. 2 Boundary elements of the tunnel

当 A, B 都为隧道边界土层上的点时, 则可将式

(1) 和 (2) 离散化得

$$w(A)_i = \sum_{j=1}^n \phi_{w_1}(B)_j (KWW)_{ij} + \sum_{j=1}^n \phi_{u_1}(B)_j (KWU)_{ij} + \sum_{j=1}^n \phi_{w_2}(B)_j (KWW)_{ij} + \sum_{j=1}^n \phi_{u_2}(B)_j (KWU)_{ij} \quad (3)$$

$$u(A)_i = \sum_{j=1}^n \phi_{w_1}(B)_j (KUW)_{ij} + \sum_{j=1}^n \phi_{u_1}(B)_j (KUU)_{ij} + \sum_{j=1}^n \phi_{w_2}(B)_j (KUW)_{ij} + \sum_{j=1}^n \phi_{u_2}(B)_j (KUU)_{ij} \quad (4)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} (KWW)_{ij}^1 &= \int_{\Delta S_1} KWW(A_i, B_j) \phi_{w_1}(B_j) dS_1, \\ (KWU)_{ij}^1 &= \int_{\Delta S_1} KWU(A_i, B_j) \phi_{u_1}(B_j) dS_1, \\ (KUW)_{ij}^1 &= \int_{\Delta S_1} KUW(A_i, B_j) \phi_{w_1}(B_j) dS_1, \\ (KUU)_{ij}^1 &= \int_{\Delta S_1} KUU(A_i, B_j) \phi_{u_1}(B_j) dS_1, \\ (KWW)_{ij}^2 &= \int_{\Delta S_2} KWW(A_i, B_j) \phi_{w_2}(B_j) dS_2, \\ (KWU)_{ij}^2 &= \int_{\Delta S_2} KWU(A_i, B_j) \phi_{u_2}(B_j) dS_2, \\ (KUW)_{ij}^2 &= \int_{\Delta S_2} KUW(A_i, B_j) \phi_{w_2}(B_j) dS_2, \\ (KUU)_{ij}^2 &= \int_{\Delta S_2} KUU(A_i, B_j) \phi_{u_2}(B_j) dS_2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将式(3)和(4)写成矩阵形式如下:

$$\begin{bmatrix} [KWW]_{11} & [KWU]_{11} & [KWW]_{12} & [KWU]_{12} \\ [KUW]_{11} & [KUU]_{11} & [KUW]_{12} & [KUU]_{12} \\ [KWW]_{21} & [KWU]_{21} & [KWW]_{22} & [KWU]_{22} \\ [KUW]_{21} & [KUU]_{21} & [KUW]_{22} & [KUU]_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\phi_w\}_1 \\ \{\phi_u\}_1 \\ \{\phi_w\}_2 \\ \{\phi_u\}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{w\}_1 \\ \{u\}_1 \\ \{w\}_2 \\ \{u\}_2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, $\{w\}_1$ 、 $\{u\}_1$ 分别为隧道1边界上土层的实际竖向位移和水平位移, $\{w\}_2$ 、 $\{u\}_2$ 分别为隧道2边界上土层的实际竖向位移和水平位移。

将式(6)简化得

$$[K][\phi] = [W], \quad (7)$$

求解式(7)得弹性边界上虚拟应力为

$$[\phi] = [W]/[K]. \quad (8)$$

在求得隧道边界上土层的虚拟应力后, 则土层中任意点的位移值可以通过式(1)和(2)求得。

2 隧道边界位移的确定

一般而言, 盾构脱出盾尾后, 隧道边界位移大小由实际盾尾间隙大小决定。盾尾间隙的大小包括以下几部分^[12]:

$$g = G_p + U_{3d} + \omega, \quad (9)$$

式中, G_p 为盾构尾部物理间隙, 完全代表了盾构机外径和衬砌外径的几何之差, 如果由注浆填充, 此时 G_p 应该为 0.07~0.1 倍原始值, U_{3d} 为在开挖面处土体的等效损失, ω 为考虑了施工质量所带来的损失。

对于土压力平衡盾构机, 开挖面处的变形相对于盾构物理间隙而言可以忽略不计, 而且在施工质量得到有效控制的条件下 ω 也可以认为很小。可以认为 $\omega \approx 0$, 这样一来, g 参数可以认为: $g \approx G_p$ 。

因此, 按照如图2所示的几何关系, 根据盾构外圆环与衬砌外圆环之间的几何关系, 盾构外圆环上土层各点对应的的径向位移函数表示为如下形式:

$$\Delta L = \frac{(R-r)\tan\theta + \sqrt{R^2 \tan^2\theta - r^2 + 2Rr}}{\sqrt{1 + \tan^2\theta}} - r, \quad (10)$$

式中, θ 为关于圆心 O_1 的值, R 为外圆环半径, r 为内圆环半径(隧道外半径)。

实际工程开挖时为了防止盾尾空隙过大而产生较大的地面沉降, 盾构施工过程中同时伴随着盾尾同步注浆的进行。通过修正可得隧道边界上土层的实际位移为

$$u = \alpha \Delta L \cos\theta, \quad (11)$$

$$w = \alpha \Delta L \sin\theta, \quad (12)$$

式中, α 为盾尾注浆修正系数, 由实际注浆效果决定, 可取 $\alpha = 0.07 \sim 0.1$ 。

将式(11)、(12)代入式(8)即可求得隧道边界

上土层的虚拟边界力。

3 计算分析

本文选用上海地铁某盾构隧道区间为例, 所研究的两隧道交叠推进段的实际情况: 里程 XK11+980 以前, 两隧道水平同向推进; 里程 XK11+980~XK12+586 为由水平同向推进向垂直同向推进的过渡段; 里程 XK12+586~XK12+822 为垂直同向推进段, 由水平平行推进向垂直平行推进过渡示意图见图3。具体计算参数如下: 盾构直径 $d = 6.34$ m, 隧道直径 $D = 6.2$ m, 隧道1与隧道2的实际埋深可参见图表, 土的泊松比取 $\nu = 0.4$ 。

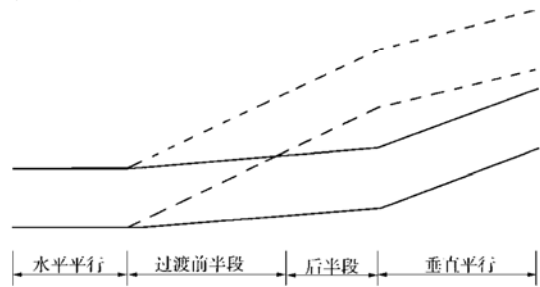


图3 两隧道示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the two tunnels

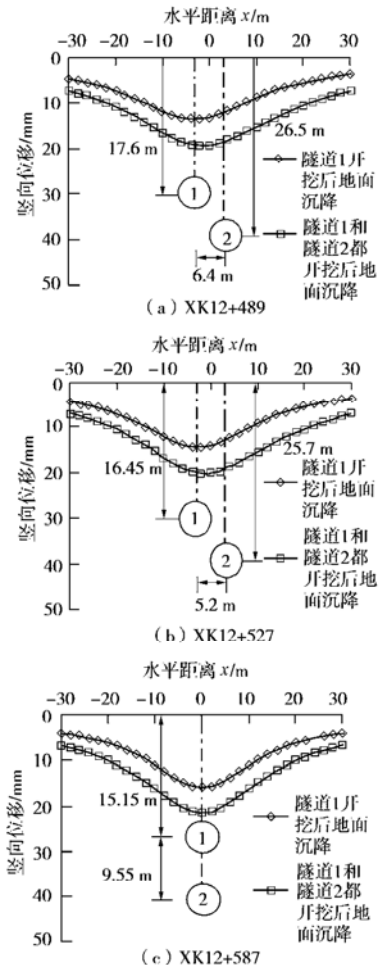


图4 地表沉降槽

Fig. 4 Vertical displacement curves of the ground surface

图 4 给出两隧道在 3 种不同埋深时引起地表的沉降情况。从图中可以看出, 当只开挖隧道 1 时地表最大沉降均在隧道的正上方纵轴线上。当隧道 1 施工完后进行隧道 2 的开挖时, 地表沉降的最大值位置与隧道 2 的埋置有较大的关系。如果隧道 2 与隧道 1 具有同一纵轴线时, 则地表最大沉降仍在隧道的正上方。若隧道 2 与隧道 1 的纵轴线不同时, 则地表最大沉降位置将发生偏移, 该位置将出现在两隧道正上方的轴线之间, 且偏向埋深较浅的隧道 1。可见埋深较浅的隧道对地表沉降的影响更大。因此在进行监测布点时应当注意在埋深较浅的隧道上方布置较密的监测点, 以便能准确测出地面沉降的最大值, 指导实际工程施工。从图 4 中还可以看出, 当两隧道的相对位置变化时地表最大沉降值也随着发生变化, 且当两隧道具有同一纵轴线时, 地表最大沉降值达到最大。总之地表的沉降量与隧道埋深及两隧道的相对位置有着密切的关系。

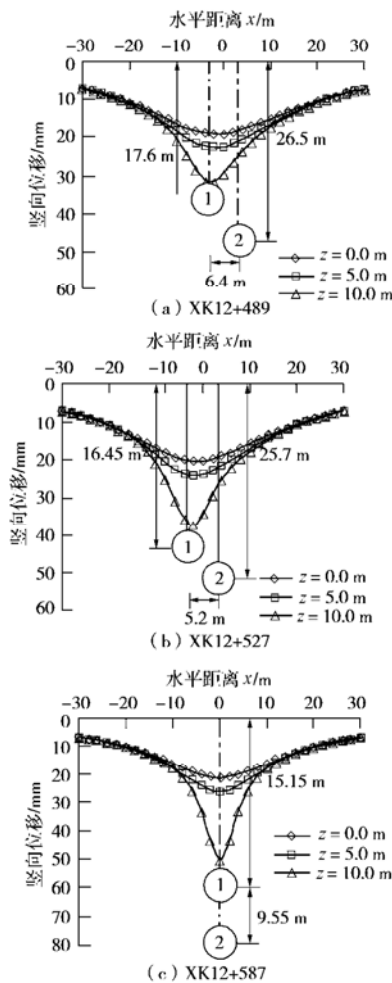


图 5 土层竖向位移计算值

Fig. 5 Calculated vertical displacement of the ground

图 5 给出两隧道在 3 种不同埋深时引起土层不同深度处的沉降情况。从图中可以看出, 在同一深度处

土层沉降最大值仍然出现在两隧道间, 且偏向埋深较浅的隧道。随着土层深度的增加, 土层沉降最大值迅速增大。比较图 5 还可以看出, 当两隧道轴线距离变小时, 土层沉降最大值将增大, 且当两隧道轴线重叠时, 不同深度处的土层沉降最大值都达到最大。目前实际工程中的沉降监测点都布置在地表, 对土层内部的沉降情况却很少有监测数据可供参考。而由图 5 可知, 一般情况下在隧道轴线上方土层内部的沉降值要比地表沉降大得多, 所以对于隧道开挖附近有桩基或地下管线存在时, 施工过程中应特别注意。

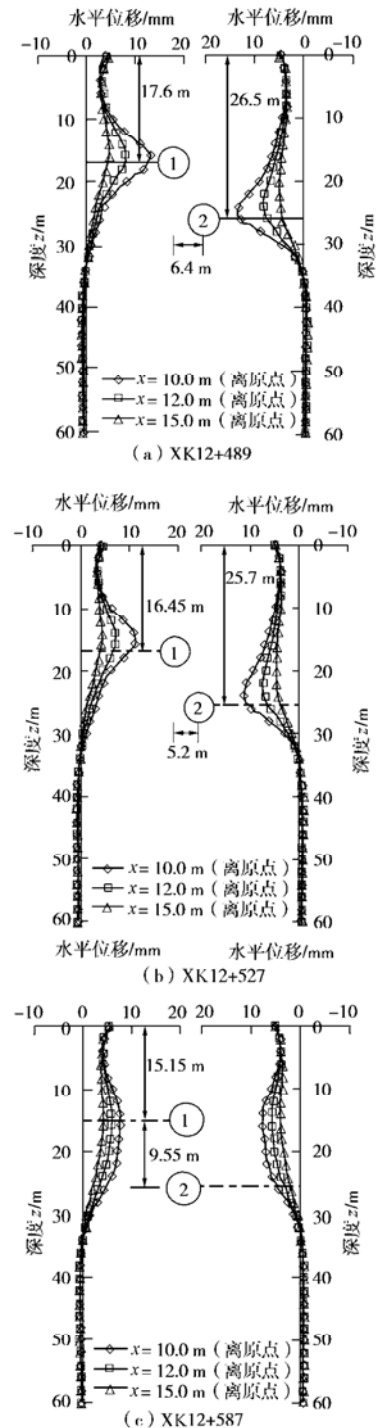


图 6 土层水平位移计算值

Fig. 6 Calculated horizontal displacement of the ground

图 6 给出两隧道在三种不同埋深时引起土层的水平位移情况。从图中可以看出, 当两隧道的纵轴线不同时, 土层中的水平位移具有不对称性, 且隧道 1 左侧土层的水平位移最大值出现在隧道 1 左侧横轴线附近, 隧道 2 右侧土层的水平位移最大值则出现在隧道 2 右侧的横轴线附近。当两隧道的纵轴线重叠时, 土层中的水平位移是对称的, 且在两隧道横轴线附近的水平位移都较大。从图 6 中还可以看出埋深较浅的隧道对土层水平位移的影响更大。

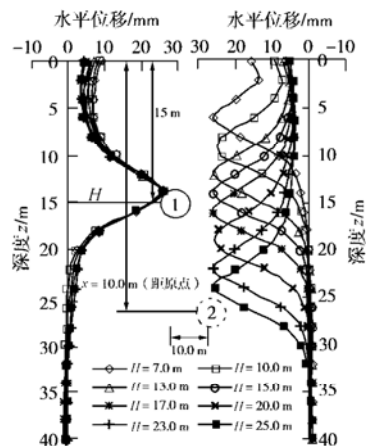


图 7 隧道竖向位置变化引起的土层水平位移计算值
($x = \pm 10.0\text{ m}$)

Fig. 7 Calculated horizontal displacement of the ground with various vertical positions of tunnel ($x = \pm 10.0\text{ m}$)

图 7 给出隧道 2 相对与隧道 1 的竖向位置变化时引起土层的水平位移变化情况, 图 8 给出隧道 2 相对与隧道 1 的竖向位置变化时引起土层的竖向位移变化情况, 图 9 给出隧道 2 相对与隧道 1 的水平位置变化时引起土层的竖向位移变化情况。从图 7 中可以看出, 隧道 2 竖向位置变化对隧道 1 左侧的土层水平位移没有多大的影响, 而对隧道 2 右侧的土层水平位移的影响却较大, 且水平位移最大值始终出现在隧道 2 的附近。由图 8 可知, 隧道 2 由浅土层向深土层变化的过程中, 地表沉降逐渐减小, 且当隧道 2 深度达到一定

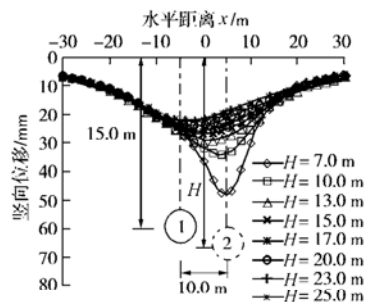


图 8 隧道竖向位置变化引起的地表沉降槽

Fig. 8 Vertical displacement curves of the ground surface with various vertical positions of tunnel

程度时, 开挖隧道 2 对地表沉降几乎没有影响。图 9 显示当两隧道的间距逐渐增大时, 两隧道轴线上地表沉降将逐渐减小, 可见适当增大隧道间距可降低地表的沉降量。

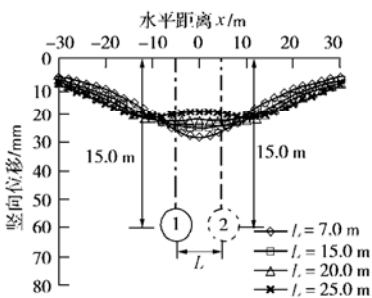


图 9 隧道水平位置变化引起的地表沉降槽

Fig. 9 Vertical displacement curves of the ground surface with various horizontal positions of tunnel

4 结 论

针对实际工程中的双线叠交隧道施工问题, 本文采用边界单元法对叠交隧道开挖过程的 3 种典型位置情况进行分析, 同时考虑隧道间的共同作用影响。在本文选择的 3 个典型计算实例中, 开挖隧道 1 时地表最大沉降值均出现在隧道 1 的正上方, 隧道 1 施工完后进行隧道 2 的开挖, 当两隧道具有相同的纵轴线时, 地表以及土层内部的最大沉降值仍在隧道 1 的正上方, 而当两隧道的纵轴线不同时, 地表以及内部的最大沉降位置发生移动, 最大沉降位置出现在两隧道轴线之间, 且偏向埋深较浅的隧道。由盾构法施工引起的浅表层与深表层土体的沉降趋势是一致的, 且深层土体的沉降量要比浅层土大得多, 对施工条件也更为敏感。两隧道相对位置的变化对土层的位移场影响较大。

参考文献:

[1] PECK R B. Deep excavation and tunnelling in soft ground[C]// 7th International Conference on Soil Methanics and Foundation Engineering. Mexico City, 1969, 225 - 290.

[2] ATTEWELL A B, WOODMAN J P. Predicting the dynamic of ground settlement and its derivatives by tunneling in soil[J]. Ground Engineering, 1982, 15: 13 - 22.

[3] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Geotechnique, 1987, 37: 301 - 320.

[4] VERRUIJT A. BOOKER J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half space[J]. Geotechnique, 46(4): 753 - 756.

[5] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for

- tunneling induced ground movement in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998(9): 846 - 856.
- [6] ROWE R K, LO K Y, KACK G J. A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(8):11 - 22.
- [7] NG R M C, LO K Y, ROWE R K. Analysis of field performance: the thunder bay tunnel[J]. Canadian Geotechnical Journal, 23, 30 - 50.
- [8] LEE K M, ROWE R K. Finite element modeling of the three-dimensional ground deformations due to tunneling in soft cohesive soil: Part I [J]. Methods of Analysis, Computers and Geotechnics, 1990, 10(2): 87 - 110.
- [9] LEE K M, ROWE R K. Finite element modeling of the three-dimensional ground deformations due to tunneling in soft cohesive soil: Part II [J]. Results Computers and Geotechnics, 1990, 10(2):111 - 138.
- [10] LEE K M, ROWE R K. Analysis of three-dimensional ground movements: the thunder bay tunnel[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(1): 25 - 41.
- [11] LEE K M, ROWE R K, LO K Y. Subsidence owing to tunneling: I. estimating the gap parameter[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29: 929 - 940.
- [12] ROWE R K, LEE K M. Subsidence owing to tunneling: II. evaluation of a prediction technique[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29: 941 - 954.
- [13] ROWE R K, KACK G J. A theoretical examination of the settlements induced by tunneling: four case histories[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20: 299 - 314.
- [14] YAMAGUCHI I, YAMAZAKI I, KIRITANI Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, in relation to design and construction of parallel shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 289 - 304.
- [15] 班努杰 P K, 白脱费尔德 R. 工程科学中的边界元法[M]. 北京: 国防工业出版社. 1988. (BANERJEE P K, BUTTERFIELD R. Boundary element methods in engineering science[M]. Beijing: Mc Graaw-Hill, 1988.)
- [16] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics, 1936, 195 - 202.

2006 年全国振动工程及应用学术会议征文通知

2006 年全国振动工程及应用学术会议(暨第十届全国设备故障诊断学术会议、第十九届全国振动与噪声控制学术会议)将于 2006 年 8 月中旬在云南省昆明市召开。本次会议由中国振动工程学会故障诊断和振动与噪声控制两个专业委员会联合主办,由郑州大学、东方振动和噪声技术研究所、昆明理工大学三个单位共同承办。会议组织委员会由两个专业委员会组成,负责人为韩捷教授、陈进教授和应怀樵教授。

本次学术会议是继 2004 年全国振动工程及应用学术会议之后的又一次全国振动领域的系列性会议。会前将由中文核心期刊《振动与冲击》出版论文集。

会议正在征文,征文选题 3 次,包括故障诊断领域和振动与噪声控制领域各个方面的内容,具体内容可以向各专业委员会索取会议的征文通知详细了解。征文应于 2006 年 6 月 15 日前提交对应的专业委员会,于 2006 年 6 月 30 日前提交《振动与冲击》编辑部。各专业委员会和编辑部的联系方式如下:

1. 故障诊断专业委员会(受理故障诊断方面的稿件)

联系人:李志农 王丽雅

联系地址:郑州市文化路 97 号,郑州大学振动工程研究所,
邮编:450002

E-Mail: lizhinong@zzu.edu.cn, wangliya@zzu.edu.cn

电话:0371-63887383

传真:0371-63887263

2. 振动与噪声控制专业委员会(受理振动与噪声控制方面的稿件)

联系人:应怀樵 雷速华

联系地址:北京市海淀区上地信息产业基地科贸大厦 516 室,
东方振动和噪声技术研究所

邮编:100085

E-Mail: dasp@coinv.com.cn

电话:010-62967740, 62976685, 62989889

传真:010-62970728

3. 《振动与冲击》编辑部

邮编:200030

地址:上海市华山路 1954 号 上海交通大学

电话:021-62822934

E-mail: zdycjyun@263.net

(中国振动工程学会振动与噪声控制分会和
中国振动工程学会故障诊断专业委员会 供稿)