

# 铁路轨道下盾构施工所致地面沉降的数值模拟

肖立<sup>1,2</sup>, 张庆贺<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 以天津滨轻轨天津站站——七经路站盾构施工区间工程为对象, 采用三维有限元方法, 对在多条铁路轨道下长距离盾构掘进过程引起的地表变形进行数值模拟. 根据模拟结果, 详细分析盾构穿越导致的沿盾构方向和垂直于盾构方向的地表沉降, 得出盾构施工各阶段的地表沉降规律, 研究盾构掘进对地表的扰动范围, 分析先施工隧道和后施工隧道对地表沉降的贡献差异, 并探讨对铁路荷载的影响. 计算结果与监测结果吻合较好.

**关键词:** 铁路轨道; 盾构施工; 地表沉降; 三维有限元; 数值模拟

**中图分类号:** O 319.56

**文献标识码:** A

## 3D Numerical Modeling of Ground Settlements Caused by Shield Tunneling Across Multi-tracks of Railway

XIAO Li<sup>1,2</sup>, ZHANG Qinghe<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the bid-section of Binhai mass transit from Tianjin Station to Qijing Road Station, 3D-FEM is put forward to simulate shield tunneling long distance under multi-tracks of railway. According to the simulation results, settlement of ground surface along and perpendicular to the shield tunnel are analyzed in detail, the discipline of ground surface settlement in different driving stages is uncovered; the disturbance area of ground and the settlement ratio dedicated by first tunnel and second tunnel are studied, the function of railway load in causing ground displacement is also discussed. The results fit well with monitoring data and can be used as a reference for similar projects.

**Key words:** railway track; shield tunneling; ground settlement; 3D-finite element method; numerical modeling

随着盾构施工技术的不断完善, 盾构法在地下铁道中得到广泛的应用. 地铁建设的飞速发展使得盾构穿越既有铁路的情况时有发生, 施工中对既有铁路的变形控制是一个难题. 预测盾构施工引起的地层位移, 确保既有铁路的安全运营和盾构顺利掘进, 是盾构隧道设计与施工的关键. 目前, 对盾构穿越铁路的研究大多是根据监测结果分析地表及铁路的变形规律, 进而对隧道施工和铁路运营风险提出评价和控制措施<sup>[1-5]</sup>. 常用的地表变形分析及预测方法有经验公式法、模型试验法、数值模拟法等<sup>[6-10]</sup>. 经验公式法一般以自由场为基础, 应用于盾构穿越铁路具有局限性; 模型试验法受经费及条件限制, 要准确地预测较为困难; 数值模拟法不仅能够反映土层性质的影响, 还能模拟盾构施工过程, 得到地层变形过程, 因此得到了越来越广泛的应用<sup>[11-15]</sup>. 但应用数值模拟对盾构下穿越铁路过程进行分析的研究不多<sup>[16]</sup>, 尤其是用三维模型模拟盾构长距离穿越多条铁路股道的情况更为少见, 因此有必要对其开展研究.

## 1 工程概况

天津站站——七经路站的盾构施工区间段, 是天津市至滨海新区快速轨道交通工程 5 个区间段中最困难的施工段之一. 全长 2 423.06 m, 两侧建筑物较多, 地下管线复杂, 地面交通比较繁忙; 盾构掘进施工中要穿越天津站全部 23 条铁路股道, 且必须保证铁路列车的正常安全运营, 是工程的最难点. 盾

收稿日期: 2010-05-22

第一作者: 肖立(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为盾构隧道及地下建筑工程设计、施工技术. E-mail: xiaoliye777@126.com

通讯作者: 张庆贺(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为岩土及地下结构工程. E-mail: zhang\_qh@tongji.edu.cn

构穿越铁路股道情况如图1所示.

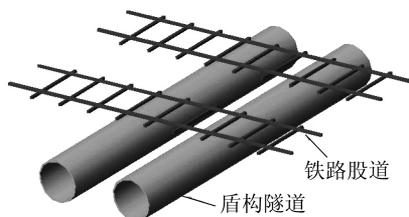


图1 盾构隧道下穿铁路轨道示意图

Fig.1 Schematic diagram of shield tunneling under multi-tracks of railway

隧道左右线均以七经路站为始发井,天津站站为接收井.采用土压平衡盾构施工.右线施工超前左线120 m左右.管片外径6 200 mm,内径5 500 mm,厚350 mm,长1 200 mm,每环由6片组成,错缝拼装.区间各土层种类自上而下为填土、黄色粉质黏土、灰褐色粉质黏土、黄灰色粉土、灰色粉质黏土、灰黄及灰绿色粉质黏土、黄褐色粉质黏土、黄色粉砂、灰褐色粉质黏土、灰黄色粉砂、黏土.盾构隧道主要穿越灰色、灰黄、灰绿色、黄褐色、粉质黏土.浅层地下水属孔隙潜水,埋深为0.50~3.80 m.

## 2 数值分析

### 2.1 模型建立

采用大型有限元计算软件 ABAQUS 建立三维数值模型,模拟盾构穿越铁路股道段过程中的地面变形情况.模拟中考虑的工程条件如下:①隧道穿越的介质为水平分层均质土层;②不考虑管片接头及错缝拼装方式对衬砌整体刚度的影响;③不考虑土体固结引起的长期沉降;④铁路荷载按照均布静荷载计算<sup>[17]</sup>.模型如图2所示,沿隧道纵向长108 m,宽100 m,高50 m.隧道中心埋深22 m,两盾构中心水平间距13 m,开挖步长每次6环(7.2 m).参考相关文献并考虑工程实际情况<sup>[18]</sup>,应力释放率取80%.土体本构采用DP模型,道砟层、管片、注浆材料采用线弹性材料,土体、道砟及注浆材料采用实体单元模拟,管片采用壳单元模拟,土体与管片的接触采用薄层单元<sup>[19]</sup>.模型共38 904个单元,33 945个节点.

### 2.2 参数取值

各材料参数取值如表1所示.铁路荷载转换为静荷载计算<sup>[17]</sup>,考虑到铁路股道间距,按照作用于所有股道折算,取均布荷载为100 kPa.结合实际推

进参数,土舱压力取0.39 MPa,注浆压力取0.2 MPa,注浆量为5 m<sup>3</sup>.

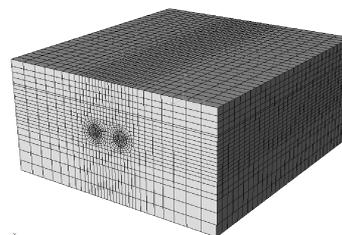


图2 计算模型

Fig.2 Calculating model

表1 材料物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of materials

土层/材料	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$E/MPa$	$\nu$	$\varphi/(^{\circ})$	$c/kPa$
道砟层	2.00	$1.30 \times 10^2$	0.30		
填土	1.96	3.11	0.34	11.2	26
粉质黏土	1.90	7.40	0.33	27.5	8
粉土	1.92	11.20	0.36	17.1	32
粉质黏土	2.02	5.27	0.37	30	12
粉砂	2.01	5.79	0.33	9.5	23
粉质黏土	1.98	7.65	0.38	19.1	33
黏土	2.05	12.20	0.38	25	30
注浆层	2.10	$2.58 \times 10^3$	0.29		
衬砌	2.50	$3.45 \times 10^4$	0.20		

注: $\rho$ 为密度, $E$ 为弹性模量, $\nu$ 为泊松比, $\varphi$ 为内摩擦角, $c$ 为黏聚力.

### 2.3 结果分析

模型竖向位移云图如图3所示.

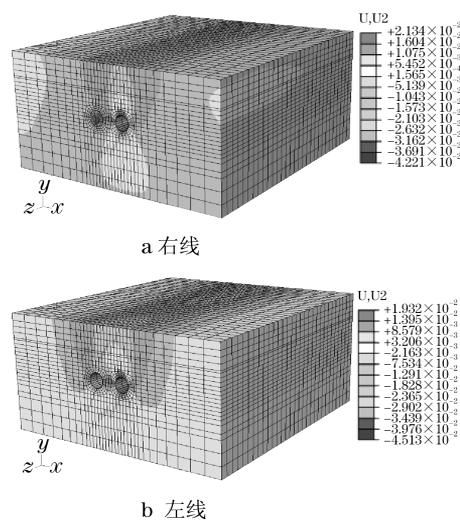


图3 盾构通过后地层竖向位移

Fig.3 Vertical settlement after crossing

## (1) 沿盾构方向的地表沉降

选取部分测点分析,如图 4 所示.  $R_{36}$  代表右线正上方与模型初始开挖面水平距离为 36 m 的地表测点;  $L_{36}$  代表左线正上方与模型初始开挖面水平距离为 36 m 的地表测点. 其余测点符号与之类似.

从图 4 可以看出,右线盾构通过后,右线正上方地表测点沉降在 12~18 mm,左线正上方地表测点沉降在 7~11 mm;随后的左线盾构通过后,右线正上方地表测点总沉降在 15~23 mm;左线正上方地表测点总沉降在 14~19 mm.

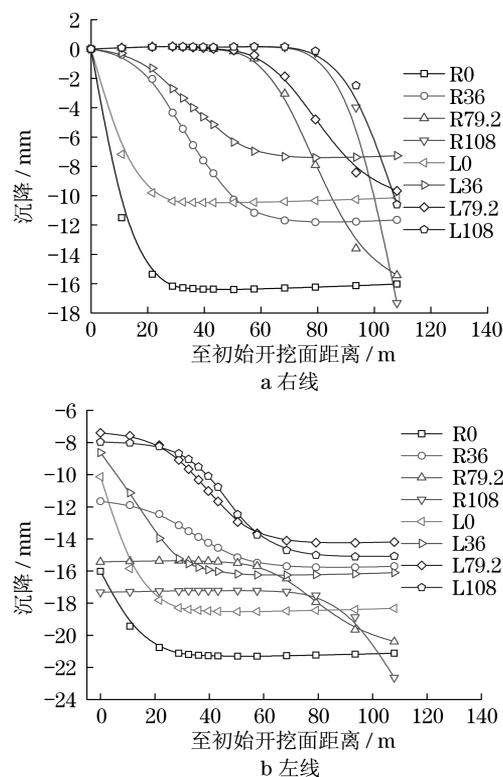


图 4 盾构通过时地表各测点沉降过程

Fig. 4 Settlement of different measuring points on ground surface while crossing

图 5 为几个不同的盾构掘进状态对应的盾构轴向测线的地表沉降分布.  $R(R_{36})$  表示右线盾构机头位于  $R_{36}$  测点所在断面时,沿右线隧道轴线的地表沉降分布;  $L(R_{36})$  表示右线盾构机头位于  $R_{36}$  测点所在断面时,沿左线隧道轴线的地表沉降分布. 其余符号以此类推. 可以看出,右线盾构机头由  $R_{36}$  所在断面推进到  $R_{50.4}$  所在断面时,初始开挖面附近 ( $R_0, R_{10.8}$ ) 的测点沉降基本不再变化,  $R_{72}$  以远各测点的沉降变化也很小. 上述情况说明,盾构开挖断面后方 40~50 m 处的地表沉降已经基本稳定,而开挖断面前方 20~30 m 处地表沉降刚刚开始. 盾构对

前方土体的扰动范围大致为 1 倍盾构埋深,对盾构后方土体影响范围大致为 2 倍盾构埋深. 盾构推进前方地表未出现隆起,这与地表有铁路荷载以及盾构推进参数取值有关.

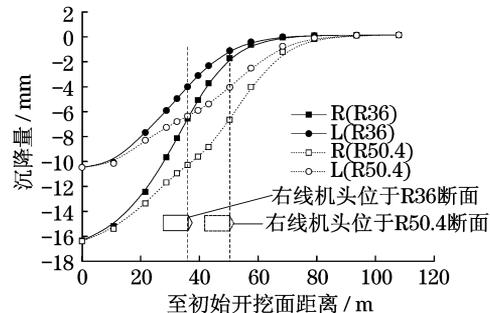


图 5 沿盾构方向的地表沉降

Fig. 5 Settlement of ground surface along the shield tunnel

## (2) 垂直于盾构方向的地表沉降

图 6 所示为盾构推进到不同位置时,与初始开挖面相距 36 m 处垂直于盾构方向的地表沉降分布情况. 图中,  $T(R_{36})$  表示右线盾构机头与初始开挖面相距 36 m 时的情况,  $T(L_{43.2})$  表示左线盾构机头与初始开挖面相距 43.2 m 时的情况. 盾构施工造成的地表最大沉降为 17 mm,位于两条盾构隧道的中间偏右 1.55 m;距两隧道中心 30 m 以外的最终沉降小于 2 mm,即盾构施工对地表横向影响范围为 60 m,此距离约为 2 倍隧道埋深 (22 m) 与两隧道中心水平间距 (13 m) 之和 (57 m);右线盾构机头位于 36 m 处时,最大沉降 ( $R_{36}$ ) 为 4 mm;盾尾脱出时,最大沉降 ( $R_{43.2}$ ) 为 6 mm;盾构远离后,最大沉降 ( $R_{108}$ ) 为 12 mm. 说明盾构机头到达盾尾脱出阶段引起的沉降不到右线总沉降的 20%,而盾尾脱出后的沉降占右线沉降的 50%.

## (3) 右线盾构施工对左线地表沉降的影响

图 7 给出了左线和右线盾构隧道分别开挖、先右线后左线开挖,所引起地表最终沉降在距初始开挖面 36 m 垂直于盾构隧道方向上的分布情况. 从图 7 可以看出,右线盾构通过引起的最大沉降为 12 mm,沉降中心与右线隧道轴线位置对应 (横坐标 6.5 m);左线盾构通过引起的最大沉降为 7 mm,沉降中心与左线隧道轴线位置对应 (横坐标 -6.5 m);先右后左盾构开挖后的最大总沉降为 17 mm,位于两条盾构隧道的中间偏右 1.55 m (横坐标 1.55 m),其中右线贡献 11 mm (占 65%),左线贡献 6 mm (占 35%).

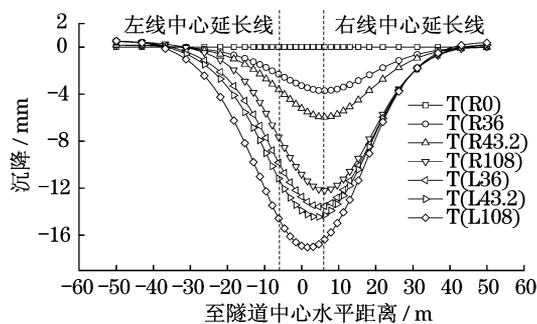


图6 垂直于盾构方向的地表沉降

Fig.6 Settlement of ground surface perpendicular to the shield tunnel

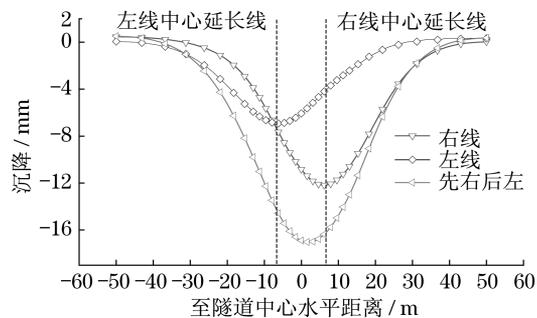


图7 左右两盾构隧道引起的地表沉降分析

Fig.7 Settlement caused by two shields respectively

(4) 铁路荷载对地表沉降的影响

图8中,R-N表示无铁路荷载情况下右线盾构通过后,R36断面垂直于盾构隧道轴线的地表沉降分布情况;T-N表示无铁路荷载情况下右线和左线隧道都完成后,R36断面垂直于盾构隧道轴线的地表沉降分布;R-L和T-L分别为有铁路荷载时的右线隧道开挖后和左右线隧道都完成后的沉降分布.可见,无铁路荷载的情况下,右线盾构完成后的地表最大沉降为9 mm,左右线隧道都完成后的地表最大沉降为13 mm,大致为有铁路荷载时的75%.

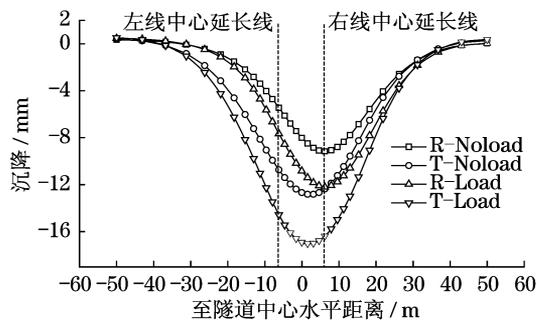


图8 铁路荷载对地表沉降的影响

Fig.8 Settlement with railway load and without railway load

### 3 监测结果

选取有完整数据的典型监测断面进行分析.测点布置如图9所示.

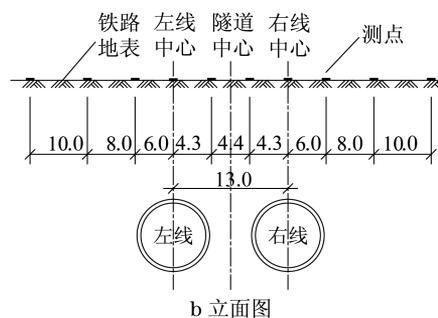
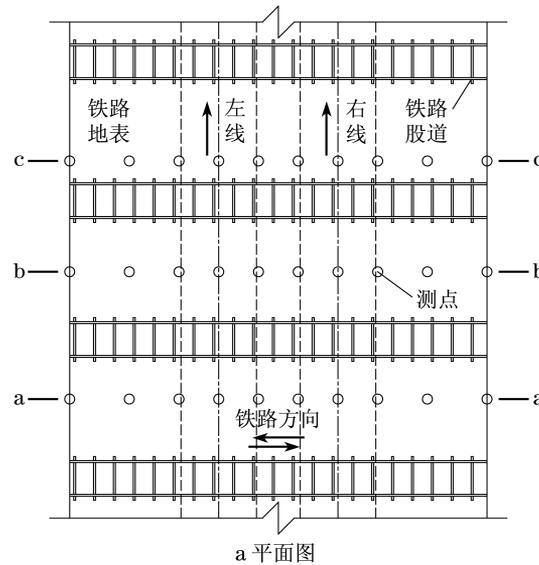


图9 测点布置图(单位:m)

Fig.9 Monitoring points (unit:m)

监测结果与数值解对比如图10,11所示.

由图10可以看出,数值解与监测数据规律一致,吻合较好.数值解比监测值略大,与数值模拟参数的选取有关;监测数据的个别测点有隆起现象,原因在于现场的实际荷载与模拟有一定差异;图10b揭示的盾构沉降最大值偏心规律不明显.

图11显示,沿盾构方向的地表沉降规律与数值解符合程度较高,仅有个别监测点与数值解存在一定的差异,这与实际施工参数的调整有关.

### 4 结论

(1) 数值模拟结果表明,盾构开挖引起的地表最大沉降在16~24 mm;与盾构隧道轴线平行、垂直

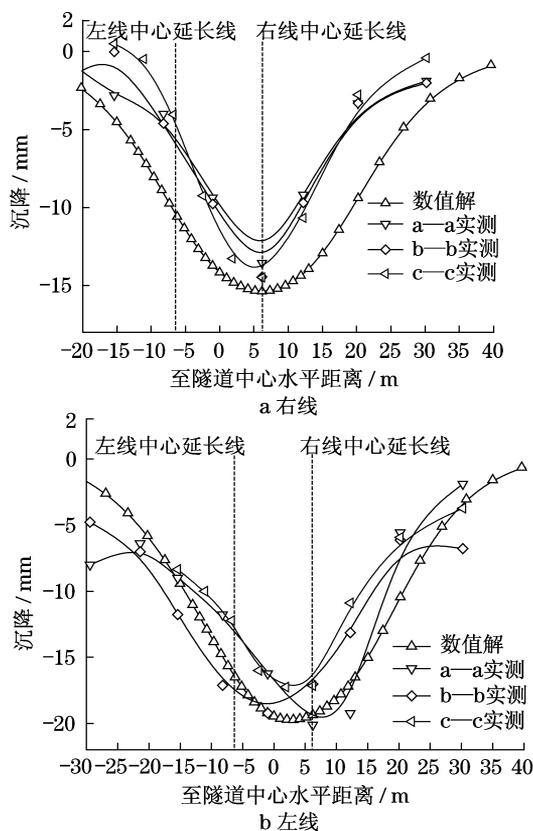


图10 盾构通过后垂直盾构隧道轴线的各断面地表沉降  
Fig.10 Settlement of ground surface (monitoring & numerical) perpendicular to the shield tunnel after crossing

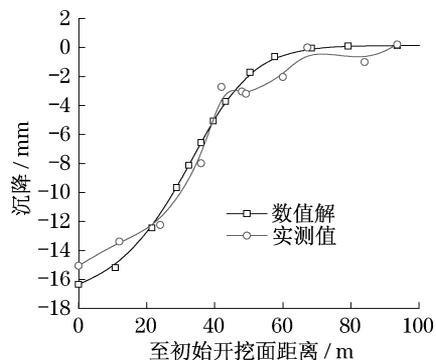


图11 沿盾构方向的地表沉降对比  
Fig.11 Settlement of ground surface (monitoring & numerical) along the shield tunnel

的沉降曲线,均与监测值吻合较好,说明数值模拟结果较可信.沉降量较大,对铁路的安全运营不利,有必要对土层采取加固、随时调整轨道高差等措施,保证铁路股道运营的安全.

(2) 盾构施工对前方地表的平行于隧道轴线的扰动范围大致为1倍隧道埋深,对盾构后方地表平行于沿隧道轴线的扰动范围大致为2倍隧道埋深;

垂直于隧道轴线方向的扰动范围,约为2倍隧道埋深与两隧道中心水平间距之和.盾构机头到达至盾尾脱出阶段的沉降不到总沉降的20%,盾尾脱出以后又发生的沉降约占总沉降的50%.盾构推进前方地表并未出现隆起.

(3) 先期施工的盾构隧道(右线)引起的地表沉降远大于后期施工的盾构隧道(左线),右线盾构对地表沉降的贡献在65%左右,左线只占35%左右.反映了右线盾构先期施工时对周围土体注浆加固的作用.

(4) 数值模拟揭示的最大沉降偏心规律(本工程铁路地表沉降偏心距为1.55 m),并未在监测数据中得到很好体现,可能与施工参数并非固定值有关.

(5) 铁路荷载对沉降的影响显著,地表无荷载时盾构施工的沉降约为有铁路荷载时的75%.

#### 参考文献:

- [1] 曹剑锋,韦凯.软土地区盾构下穿铁路地表变形规律研究[J].甘肃科技,2008,24(4):111.  
CAO Jianfeng, WEI kai. Study on soft ground settlement resulting from shield tunneling across railway [J]. Gansu Science and Technology, 2008, 24(4): 111.
- [2] 杨天亮,李新,董金奎,等.地铁盾构铁路下推进引起的地面沉降分析[J].矿山测量,2009(1):12.  
YANG Tianliang, LI Xin, DONG Jinkui, et al. Analysis on ground settlement resulting from shield tunneling across railway [J]. Mine Surveying, 2009(1): 12.
- [3] 吕培林,周顺华.软土地区盾构隧道下穿铁路干线引起的线路沉降规律分析[J].中国铁道科学,2007,28(2):12.  
LV Peilin, ZHOU Shunhua. Analysis on upper rail settlement in soft ground resulting from shield tunnelling across main railway line [J]. China Railway Science, 2007, 28(2): 12.
- [4] 余才高.地铁盾构隧道下穿铁路的安全措施[J].城市轨道交通研究,2009(4):33.  
SHE Caigao. Safety measures on shield tunneling across railway [J]. Urban Mass Transit, 2009(4): 33.
- [5] 田海波,宋天田.轨道交通9号线下穿铁路工程风险及对策研究[J].地下空间与工程学报,2007,3(1):147.  
TIAN Haibo, SONG Tiantian. Research of risks and counter measures on project of metro beneath the railway [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 147.
- [6] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: [s. n.], 1969: 225 - 290.
- [7] 周文波.盾构法隧道施工技术及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.  
ZHOU Wenbo. Shield tunneling construction technology and its application [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.
- [8] 璩继立,葛修润.软土地区盾构隧道施工沉降槽的特征分析

- [J]. 工业建筑, 2005, 35(1): 42.  
 QU Jili, GE Xiurun. Analysis of characteristics of settlement trough induced by shield construction in soft soil area [J]. Industrial Construction, 2005, 35(1): 42.
- [9] 魏纲. 盾构施工中土体损失引起的地面沉降预测[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2375.  
 WEI Gang. Prediction of surface settlement induced by ground loss during shield tunneling construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2375.
- [10] 侯学渊, 钱达仁, 杨林德. 软土工程施工新技术[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1999.  
 HOU Xueyuan, QIAN Daren, YANG Linde. New construction technologies on soft soil engineering[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1999.
- [11] 孙玉永, 周顺华, 宫全美. 软土地区盾构掘进引起的深层位移场分布规律 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 500.  
 SUN Yuyong, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei. Distribution of deep displacement field during shielded tunneling in soft-soil areas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 500.
- [12] Lee K M, Rowe R K. Finite element modeling of the three dimensional ground deformations due to tunneling in soft cohesive soil: part I—method of analysis [J]. Computers and Geotechnics, 1990, 2(2): 87.
- [13] Lee K M, Rowe R K. Finite element modeling of the three dimensional ground deformations due to tunneling in soft cohesive soil: part II—results [J]. Computers and Geotechnics, 1990, 2(2): 111.
- [14] Lee K M, Rowe R K. Analysis of three-dimensional ground movements: the thunder bay tunnel [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(1): 25.
- [15] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高. 地铁隧道盾构法施工过程中地层变位的三维有限元模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 755.  
 ZHANG Haibo, YIN Zongze, ZHU Jungao. 3D finite element simulation of deformation of soil mass during shield tunneling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 755.
- [16] 龚伦, 郑余朝, 仇文革. 列车动载引起下穿隧道振动三维数值分析 [J]. 现代隧道技术, 2008, 45(4): 23.  
 GONG Lun, ZHENG Yuchao, QIU Wenge. 3D dynamic FE analysis on the behavior of under-crossing tunnels caused by overhead passing trains [J]. Modern Tunnel Technology, 2008, 45(4): 23.
- [17] 铁道部第一勘察设计院. TB 10001—2005 铁路路基设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.  
 China Railway First Survey and Design Institute. TB 10001—2005 Code for design on subgrade of railway [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [18] 范新健. 天津地铁盾构隧道施工引起土体变形及环境保护措施研究 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2009.  
 FAN Xinjian. Research on the deformation of soil induced by shield tunneling and protection measures in Tianjin metro [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2009.
- [19] 郭海柱. 天津地铁盾构隧道施工引起土体变形及环境保护措施研究 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2009.  
 GUO Haizhu. Several key technologies study on adjacent construction of subway interchange stations [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2009.

.....

(上接第 1265 页)

- [11] 刘齐茂, 李徽. 基于有限元法的钢-混凝土组合梁截面优化设计 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2005, 37(4): 514.  
 LIU Qimao, LI Hui. Optimal section design of steel concrete composite beams based on the finite element [J]. Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2005, 37(4): 514.
- [12] 韦芳芳, 吕志涛, 孙文彬. 部分剪力连接钢-混凝土组合梁的非线性分析 [J]. 工业建筑, 2003, 33(9): 78.  
 WEI Fangfang, LV Zhitao, SUN Wenbin. Nonlinear finite element analysis of composite steel-concrete beams with partial shear connection [J]. Industrial Construction, 2003, 33(9): 78.
- [13] 张琪, 胡夏闽, 王干. 钢-混凝土组合梁纵向抗剪非线性分析 [J]. 南京工业大学学报, 2005, 27(5): 37.  
 ZHANG Qi, HU Xiamin, WANG Gan. Nonlinear analysis for longitudinal shear resistance of steel-concrete composite beams [J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2005, 27(5): 37.
- [14] CHEN Shiming. Experimental study of prestressed steel-concrete composite beams with external tendons for negative moments [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61: 1613.
- [15] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
 SHI Yiping, ZHOU Yurong. Explains on ABAQUS FEM [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [16] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
 JIANG Jianjing, LU Xinzhen, YE Lieping. FEM analysis of concrete structure [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [17] Ollgaard J G, Slutter R G, Fisher J W. Shear strength of stud connectors in light-weight and normal-weight concrete [J]. Engrg J AISC 1971(9): 55.
- [18] CHEN Shiming, JIA Yuanlin, WANG Xindi. Study of inelastic buckling of continuous composite beams-finite element analysis [C] // The 4th International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics. Jeju: Korea Advanced Institute of Science & Technology, 2008: 26 - 28.
- [19] EN 1994: Eurocode 4 European Committee for Standardisation. Eurocode 4 design of composite steel and concrete structures, part 1. 1: general rules and rules for buildings [S]. Brussels: [s. n.], 1994.