

文章编号: 1000-7598-(2007) 07-1402-05

# 平行盾构隧道施工对既有隧道影响的数值分析

方 勇, 何 川

(西南交通大学 地下工程系, 成都 610031)

**摘 要:** 采用三维有限元方法对平行盾构隧道施工进行模拟, 分析新隧道动态掘进时既有隧道位移、变形和内力的变化规律。模型中考虑了盾构机与管片衬砌相互作用, 管片衬砌结构的横观各向同性性质。计算结果表明, 既有隧道在盾构机附近主要产生纵向上的不均匀沉降和侧移, 在盾构机后方主要产生横断面内的旋转。新隧道的修建还将使既有隧道受到“侧向加载”效应, 使其横断面内的弯矩减小, 轴力增大, 且左、右侧受力不再对称。既有隧道纵向受力出现先受压、后受拉的特征, 且在远离新隧道侧将出现最不利应力状态。分析表明盾构机顶进力、注浆压力和地层损失对既有隧道的影响较大, 施工中应严格控制, 而顶进反力的影响相对较小。该工作为类似工程的施工提供参考。

**关 键 词:** 平行隧道; 盾构法; 有限元分析; 横观各向同性

中图分类号: U 45

文献标识码: A

## Numerical analysis of effects of parallel shield tunneling on existent tunnel

FANG Yong, HE Chuan

(Department of Tunnel and Underground Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** 3D-FEM is applied to simulate the construction of parallel shield tunnels, and the laws of displacement, deformation and internal force of the old tunnel are analyzed along with the dynamic driving of the new one. In analyzing the interaction between shield machine and lining structure is taken into consideration in the model, as well as the transverse isotropy of lining structure. The results show that in the existent tunnel longitudinal nonuniform settlement and lateral displacement appear around the shield machine, and traverse torsion occurs behind the shield machine. The construction of new tunnel will apply the “lateral loading” effects to the old one, decrease the moment and increase the axial force in the traverse section, and make the internal force state of left and right sides to be not symmetrical any more. The longitudinal force-bearing state of the existent tunnel experiences a process of first compression followed by tension, and the most unfavorable stress state appears in its side far away from the new one. The thrust force, grouting pressure, and stratum loss, which should be controlled strictly, have great effects on the old tunnel; and the counterforce of thrust has a minor effect comparatively. This work offers references for the construction of similar engineering.

**Key words:** parallel tunnel; shield method; finite element analysis; transversely isotropy

## 1 前 言

盾构法修建地铁隧道具有对周围环境影响小、施工安全快速等优点, 已成为地铁建设的主流施工方法。盾构法施工时, 往往会引起周围地层移动<sup>[1]</sup>, 地层移动一方面在地表引起不均匀沉降, 另一方面直接引起地下近接结构物的变位, 当变位不均匀时还会产生附加应力。预测和控制盾构近距离通过地下结构物时所引起的地层变位, 有利于盾构机的顺利掘进和确保既有地下设施的正常使用。

为了节约造价, 地铁隧道常采用平行双洞的构

造形式, 同时地铁线路一般位于城市交通干道的下方, 为了减小地铁施工对周围建筑物的影响, 两隧道间距会尽可能地减小。此时, 新隧道的施工将对既有隧道产生影响, 且这种影响随着新隧道的掘进而不断变化。目前国内对外对盾构隧道动态施工的三维有限元模拟还处于研究阶段, 难以将施工过程中的全部影响因素体现出来<sup>[2, 3]</sup>, 也没有考虑管片衬砌结构的横观各向同性性质。本文分析以土压平衡式盾构机为背景, 考虑管片结构的横观各向同性性质以及盾构机和管片的相互作用, 采用三维有限元方法来研究修建平行隧道时, 随着盾构机的动态掘进,

收稿日期: 2005-08-10

基金项目: 国家高技术研究发展专项 (863 计划) 经费资助 (No. 2006AA11Z116)。

作者简介: 方勇, 男, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事盾构隧道方面的研究工作。E-mail: fy980220@tom.com

既有隧道位移、变形和应力产生的变化。

## 2 计算模型及掘进模拟

盾构施工中顶进力及地层损失是引起周围土体移动的主要原因，模型中通过适当的简化来考虑它们的影响，使之在计算上可行又能反映出既有隧道位移、变形及应力的动态变化规律。本次计算采用有限元软件 ANSYS 进行，以期获得理想效果。

### 2.1 三维有限元模型的建立

计算模型的地质剖面如图 1 所示，两隧道位于可塑残积土地层中，间距为  $0.5D$  ( $D$  为隧道外径)，管片衬砌的外径为 6 m，内径为 5.4 m，管片厚 30 cm，管片幅宽为 1.5 m，模型中沿盾构机推进方向每 3 m（两环管片）划分一个单元。

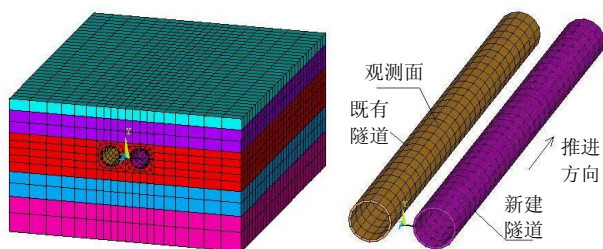


图 1 平行盾构隧道计算模型  
Fig.1 Parallel shield tunnel model

管片衬砌结构是通过螺栓将单个管片连接在一起的整体结构，具有横观各向同性性质，为了充分体现该特性，分析中采用空间 8 节点实体单元来模拟。采用均值体等效管片衬砌时，需乘以一刚度折减系数，在横断面内该系数通常取  $0.6 \sim 0.8$ <sup>[4]</sup>。在纵向上，该系数除了与螺栓的刚度、颗数等因素有关外，还与管片结构的受力状态有关，根据文献[5]的公式可以计算出该模型中管片结构纵向抗拉、抗剪和抗弯的刚度折减系数约为 0.01，而纵向抗压刚度基本不折减。鉴于本模型的实际情况，取既有隧道纵向刚度折减系数为 0.01，而新建隧道在纵向上主要承受盾构机顶进反力，故纵向刚度不折减。既有隧道折减后的管片材参如表 1 所示，其中各材料参数根据单元坐标系确定（单元坐标系中  $Z$  方向与隧道轴向一致）。

表 1 管片衬砌材料参数

Table 1 Material parameters of segment lining

| $E_x$ | $E_y$ | $E_z$ | $G_{xy}$ | $G_{yz}$ | $G_{xz}$ | $\mu_{xy}$ | $\mu_{yz}$ | $\mu_{xz}$ |
|-------|-------|-------|----------|----------|----------|------------|------------|------------|
| / GPa | / GPa | / GPa | / GPa    | / GPa    | / GPa    |            |            |            |
| 27.6  | 27.6  | 0.345 | 11.5     | 0.158    | 0.158    | 0.2        | 0.2        | 0.2        |

盾构机、土层和扰动层也采用空间 8 节点实体单元来模拟。盾构机为海瑞克土压平衡式盾构机，盾构机重量按 385 t 处理。盾尾空隙采用杀死单元的方法来模拟，同时在空隙上施加注浆压力。盾构周围由于施工而引起土体扰动，其厚度需根据计算和经验来确定，本分析由文[6]确定扰动层厚度为 20 cm，对于盾尾注浆的模拟采用提高扰动层刚度的方法来模拟，扰动层的泊松比与变形模量可以参考水泥土取值<sup>[7]</sup>。

模型高 41 m，宽 72 m，长 90 m，埋深 12 m，盾构掘进方向为  $Z$  轴负方向，水平方向为  $X$  轴，竖直方向为  $Y$  轴，共 12 960 个实体单元，14 415 个节点。

### 2.2 土层和材料参数

表 2 列出了模型计算所用的土层和材料参数。

表 2 土层和材料参数

Table 2 Parameters of soils and construction materials

| 名称    | 层厚<br>/ m | 凝聚力<br>/ kPa | 内摩擦角<br>/ (°) | 重度<br>/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ | 弹性模量<br>/ MPa | 泊松比  |
|-------|-----------|--------------|---------------|-----------------------------------------|---------------|------|
| 填土    | 4         | 17           | 30            | 18.3                                    | 3.94          | 0.35 |
| 粉质黏土  | 6         | 21           | 18            | 17.5                                    | 6.00          | 0.33 |
| 可塑残积土 | 13        | 30           | 18            | 19.5                                    | 6.02          | 0.30 |
| 完全风化层 | 8         | 37           | 20            | 20.1                                    | 10.5          | 0.33 |
| 微风化层  | 10        |              |               | 21.6                                    | 1 000         | 0.32 |
| 盾构机   |           |              |               |                                         | 210 000       | 0.12 |
| 注浆层   |           |              |               | 21.0                                    | 1 000         | 0.2  |

### 2.3 盾构机掘进模拟

对于盾构施工过程的动态模拟，可以采用单元“生”“死”和改变材参的方法来完成，其中，盾构机单元、衬砌单元和扰动层单元都是预设单元。当盾构机推进时，将以前的土层材参改变为盾构机材参，并杀死盾尾空隙处单元，同时沿径向施加注浆压力（取  $0.2 \text{ MPa}$ <sup>[8]</sup>），在掘削面施加顶进压力（取  $0.25 \text{ MPa}$ ，对应的顶进力为 800 t），在盾构机后方管片上施加顶进反力。盾尾脱出一段距离后，激活管片衬砌单元和扰动层单元。盾构推进的示意图如图 2 所示。掘进模拟时，将掘进前的状态设为参考状态（第 0 步），为减小边界影响，第 1 步掘进 15 m，第 2 步到第 17 步每步掘进 3 m，第 18 步掘进余下的 27 m。

## 3 计算结果分析

由平行隧道的结构特征可知，在顶进力、盾尾注浆及地层损失等因素的作用下，盾构机附近的既有隧道将产生不均匀沉降和不均匀侧移。在盾构机

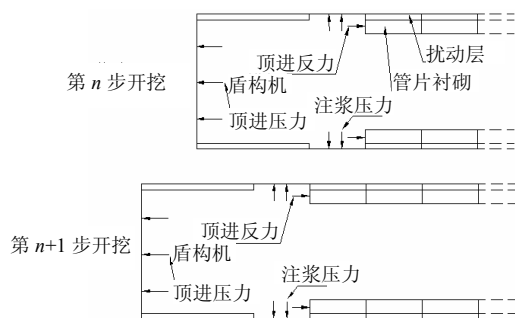


图 2 盾构推进示意图  
Fig.2 Sketch of shield tunnel's driving

后方, 虽然纵向上的沉降和侧移是均匀的, 但横断面内的沉降或侧移仍是不均匀的, 这些不均匀位移将引起既有隧道产生变形和旋转。为了减小边界效应的影响, 取  $Z = -36$  m 处既有隧道截面为观测面 (图 1), 来分析新隧道动态掘进过程中, 既有隧道位移、变形及应力的变化规律。

### 3.1 既有隧道沉降分析

图 3 显示了观测截面处, 既有隧道管片衬砌外表面上、下、左、右四处节点 (如图 4 所示) 的沉降值随盾构机掘进过程的变化情况。可以看出, 随着盾构机的推进, 既有隧道的沉降是逐渐增大的, 且右节点的沉降总是最大, 左节点的沉降总是最小, 而上、下节点的沉降位于它们之间。

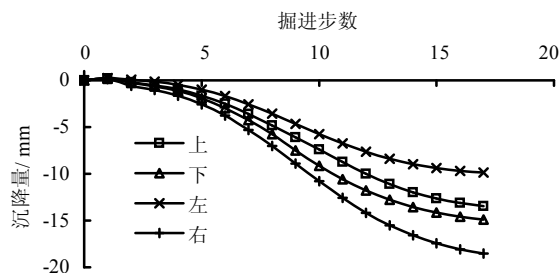


图 3 既有隧道沉降随盾构掘进的变化  
Fig.3 Variation of settlement along with driving

由图 3 看出, 同一截面内各节点的沉降量是不同的, 它们之间产生了相对沉降。左、右节点的相对沉降说明管片环发生了旋转, 上、下节点的相对沉降说明了管片环发生了变形。右侧节点 (靠近新隧道一侧) 的沉降量始终大于左侧节点 (远离新隧道一侧), 而且它们之间的相对沉降随盾构的掘进逐渐增大, 在第 17 步掘进时达到了  $-8.65$  mm, 此时, 右节点相对于左节点向下旋转了  $4.96^\circ$ , 如图 4 所示。新隧道修建后, 由于周围受扰动土体的次固结作用, 既有隧道横断面内节点还会继续产生不均匀沉降, 使其旋转量继续增大。

盾构机在新隧道中推进时, 下节点始终比上节点沉降的多, 说明上、下节点在向外变形, 根据圆形衬砌的受力和变形特点可知, 既有隧道受到“侧向加载”作用, 上、下节点的向外变形在第 11 步达到最大值  $1.85$  mm。第 11 步以后, 上、下节点的相对沉降逐渐减小, 最后稳定在  $1.44$  mm。

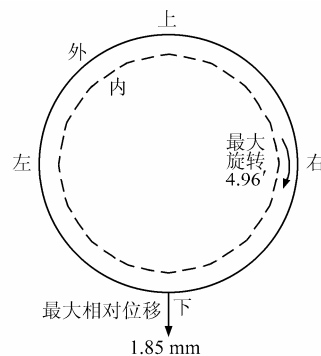


图 4 沉降引起的管片相对位移  
Fig.4 Relative displacement of segment induced by settlements

### 3.2 既有隧道侧移分析

平行隧道掘进时, 既有隧道还会产生侧移。在盾构机前方, 受顶进力影响, 既有隧道朝远离新隧道方向移动; 在盾构机后方, 受注浆压力与地层损失的影响, 既有隧道仍朝远离新隧道方向移动。侧移量与顶进力、注浆压力和地层损失的大小等因素有关。

图 5 显示了观测截面处既有隧道外表面上、下、左、右四处节点的侧移量随盾构机掘进过程的变化情况。总体来看, 在整个施工过程中, 下节点的侧移量总是最大, 上节点的侧移量总是最小, 而左、右节点的侧移量介于它们之间。在盾构机接近观测面前 (第 1 步到第 4 步), 侧移量较小, 各节点之间相对侧移也小, 既有隧道基本上只产生刚体位移; 当盾构机通过观测面时 (第 5~12 步), 侧移量急剧增大, 各节点之间产生了相对位移; 当盾构机远离观测面后 (第 13 步), 侧移量逐渐收敛于一定值。

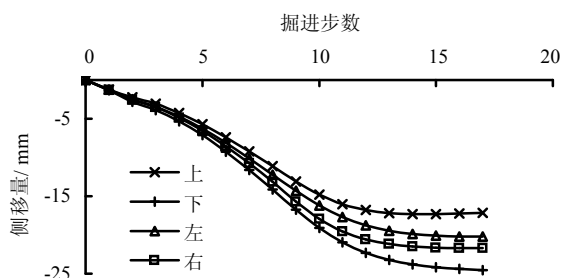


图 5 既有隧道侧移随盾构掘进的变化  
Fig.5 Variation of lateral displacement along with driving

由图 5 看出, 同一截面内各节点的侧移量是不同的, 它们之间产生了相对侧移。上、下节点的相对侧移说明管片环发生了旋转, 左、右节点的相对侧移说明了管片环发生了变形。下侧节点的侧移量始终大于上侧节点, 而且它们之间的相对侧移随盾构的掘进逐渐增大, 在第 17 步掘进时达到了  $-7.39 \text{ mm}$ , 此时, 下节点相对于上节点向左旋转了  $4.23^\circ$ , 如图 6 所示。

盾构机在新隧道中推进时, 右节点始终比左节点侧移的多, 说明左、右节点在向内变形, 根据圆形衬砌的受力和变形特点可知, 既有隧道受到“侧向加载”作用, 左、右节点的向内变形在第 11 步达到最大值  $1.85 \text{ mm}$ 。第 11 步以后, 左、右节点的相对侧移逐渐减小, 最后稳定在  $1.48 \text{ mm}$ 。

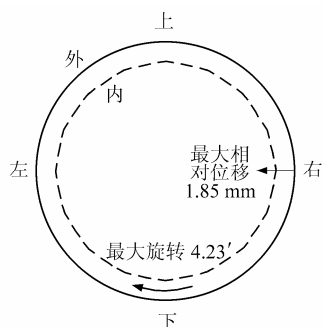


图 6 侧移引起的管片相对位移  
Fig.6 Relative displacement of segment induced by lateral displacement

### 3.3 既有隧道受力分析

由管片的结构和受力特征可知, 既有隧道上、下、左、右四截面处的管片弯矩和轴力具有极值。根据材料力学公式将管片衬砌内外表面上的应力转换为对应截面上的轴力和弯矩, 来分析管片结构受力随盾构掘进的变化情况。

图 7 显示了盾构机掘进过程中, 观测面上、下、左、右四处截面弯矩的变化情况。随着盾构机的推进, 各截面的弯矩先逐渐减小, 在第 11 步达到最小值, 然后逐渐增大, 直至稳定。总的看来, 新隧道修建后, 既有隧道各截面的弯矩减小了。

由图 7(b)可以看出, 在第 5 步掘进前, 观测面处既有隧道左、右截面的弯矩基本上相等, 管片结构受力是对称的, 第 6 步后, 左、右截面的弯矩不再相等, 管片结构受力也不再对称。可以看出, 新隧道修建后, 既有隧道的弯矩虽然降低了, 但管片结构的受力不再对称。

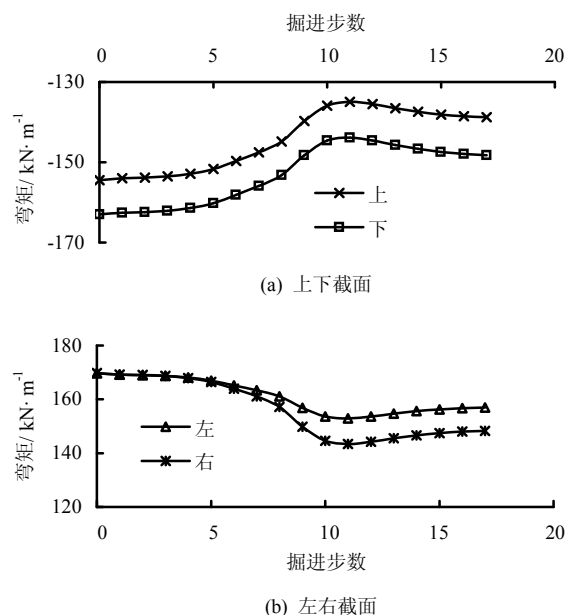


图 7 管片弯矩随盾构掘进的变化  
Fig.7 Variation of moment along with the driving

图 8 显示了盾构机掘进过程中, 观测面上、下、左、右四处截面轴力的变化情况, 总的看来, 新隧道修建后既有隧道各截面的轴力增加了。随新隧道掘进, 上、下载面的轴力逐渐增加, 到第 11 步掘进时, 上截面轴力增加了  $4/5$ , 下截面轴力增加了  $1/2$ , 第 11 步以后轴力略有降低。第 8 步掘进 (掘剖面位于观测面正右方) 前, 左截面轴力大于右截面轴力, 第 8 步后, 右截面 (靠近新隧道一侧) 轴力大于左截面, 而且左、右截面的轴力差异较大, 说明既有隧道结构受力不再对称。

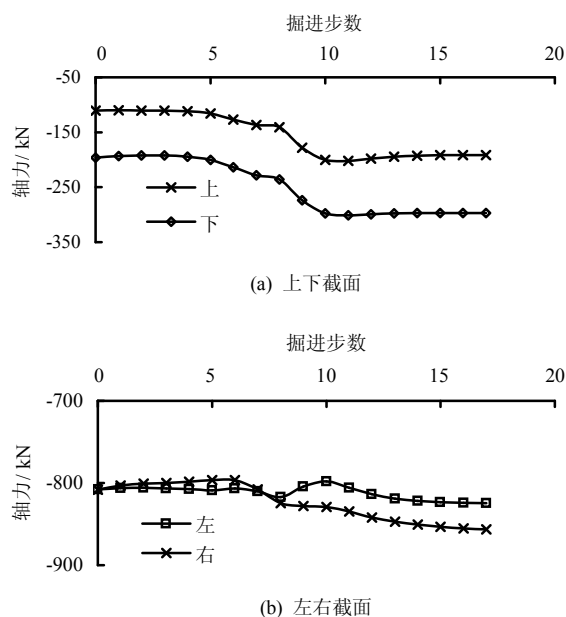


图 8 管片轴力随盾构掘进的变化  
Fig.8 Variation of axial force of segment along with driving

图9显示了观测面外侧各节点纵向应力(Z方向应力)的变化情况。在盾构机的推进过程中,既有隧道经历了一个先受压,后受拉的过程。盾构机到达前,观测面下侧在第4掘进步出现最大压应力0.101 MPa,盾构机通过后,观测面左侧在第13掘进步出现了最大拉应力0.105 MPa。可以看出,在直线施工情况下,盾构机的顶进反力对既有隧道基本没有影响,盾构机通过后,并没有出现既有隧道受压的状态。由于管片结构纵向抗拉能力很低,因而在施工过程中,既有隧道左侧(远离新隧道侧)的受力状态将是不利的,应重点监测。

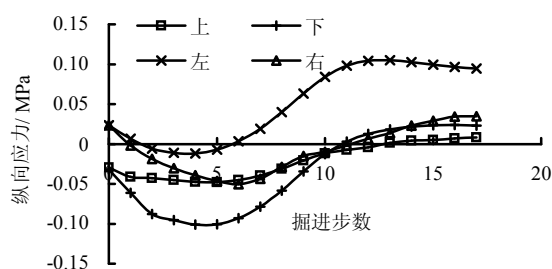


图9 纵向应力随盾构掘进的变化

Fig.9 Variation of longitudinal stress along with driving

## 4 结 论

通过对平行隧道动态施工的三维有限元分析,可以得出下面一些结论:

(1) 平行隧道施工时,盾构机附近的既有隧道将在纵向上产生不均匀沉降和不均匀侧移。在盾构机后方,既有隧道虽然在纵向上的沉降和侧移是均匀的,但在横向上会出现不均匀沉降和不均匀侧移,这些不均匀位移将使盾构机后方的既有隧道产生旋转和变形。

(2) 平行盾构隧道施工时,既有隧道将产生二次变形:上、下侧节点将向外变形,左、右侧节点将向内变形。可以认为,平行隧道施工将对既有隧道产生“侧向加载”效应。

(3) 新隧道修建后,既有隧道管片环内各截面的弯矩呈减小趋势,轴力呈增大趋势,其中上、下截面的轴力增长得较多,这对于管片结构来说是有利的。但是,新隧道的修建将使既有隧道的受力不再左、右对称。

(4) 在纵向上,随着盾构机的推进,既有隧道先受压,后受拉。在远离新隧道一侧,既有隧道将出现较大拉应力,应重点监测。

(5) 在平行盾构隧道的直线施工中,顶进力、注浆压力和地层损失是影响既有隧道的重要因素,应严格控制,而盾构机顶进反力对周围土层的影响相对较小。

## 参 考 文 献

- [1] 刘建航,侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. 329—333.
- [2] 于宁,朱合华. 盾构隧道施工地表变形分析与三维有限元模拟[J]. 岩土力学, 2002, 25(8): 1 330—1 334.  
YU Ning, ZHU He-hua. Analysis of earth deformation caused by shield tunnel construction and 3D-FEM simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 25(8): 1 330—1 334
- [3] 王敏强,陈胜宏. 盾构推进隧道结构三维非线性有限元仿真[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 228—232.  
WANG Ming-qiang, CHEN Sheng-hong. 3-Dimensional nonlinear finite element simulation of tunnel structure for moving forward shield[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(2): 228—232.
- [4] 土木学会(日). 隧道标准规范(盾构篇)及解说[S]. 朱伟译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 68—72.
- [5] 何川. シールドトンネル縦断方向の地震時挙動に関する研究[博士学位論文 D]. 東京: 早稲田大学専業理工学部, 1999.
- [6] 易宏伟. 盾构法施工对土体扰动和地层移动影响的研究[博士论文 D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [7] 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, YING 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.
- [8] 张凤祥,朱合华,傅德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. 388—390.