

# 地铁隧道开挖过程三维物理模型动态试验研究

王克忠

(浙江工业大学 建筑工程学院, 杭州 310014)

**摘要:**据相似材料大比尺三维概念物理模型理论,高仿真度制作了成型盾构隧道地铁站厅隧道开挖试验物理模型。模拟了双盾构隧道之间开挖站厅隧道的全过程,研究了站厅隧道、横通道开挖过程中模型地表沉降,土体的变形,盾构隧道及站厅隧道洞周特征点的位移。模拟并研究了混凝土加固桩对土体位移的影响,总结出土体的动态力学特征和变形规律,得出一些有益的认识和结论。对指导地铁施工、研究在已建成双隧道间拓展开挖站厅空间具有十分重要的意义。

**关键词:**模型试验;多点位移;站厅隧道;地表沉降

**中图分类号:**U452 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7329(2008)05-0042-05

## Real Simulation of 3-D Physical Model Testing for Metro Station Tunnel Construction

WANG Ke-zhong

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, P. R. China)

**Abstract:** Based on the large scale conceptual model theory of similar material, a physical model of metro station tunnel excavation was simulated. The excavation process of metro station tunnel between existing double tubes also was simulated. Ground settling, soil deformation and displacement of specific points around tunnels were studied. The influence of a cast-in-place pile on reducing soil displacement was simulated. The dynamic mechanical behavior and deformation laws of the soil were obtained along with some useful conclusions. The conclusions are beneficial for guiding the construction and expanded excavation of metro station spaces between existing double tubes.

**Key words:** model test; multi-point displacements; metro station tunnel; ground settling

盾构法与浅埋暗挖法结合建造地铁车站在国内研究较少,采用相似材料进行大比尺三维物理模型试验是一种有效的研究方法<sup>[1-3]</sup>。其不仅能够真实反映地层构造和站厅隧道的空间关系,更能准确地模拟施工过程的影响,并使人更容易从全局上把握站厅隧道的整体力学特征、变形趋势和稳定性特点。物理模型试验对数值模拟结果可以进行一定程度的验证<sup>[4-6]</sup>。论文对直径6 m的区间盾构隧道拓展建造地铁车站的物理模型进行试验研究,研究了隧道洞周土压力变化规律、洞周地层变形规律、地表沉降规律和地层变形隔离桩支撑效果等,研究成果对解决目前盾构区间施工和车站施工工期矛盾、寻求盾构法在城市地铁工程中大规模应用、进一步提高地铁工程的建设质量,缩短建设

周期、大幅度降低工程造价等具有重要的意义<sup>[7-9]</sup>。

### 1 试验研究内容及模型制作

#### 1.1 试验研究内容

本试验主要研究塔柱式地铁车站的扩挖方式,即通过相似概念模型试验手段,研究在已经建成的盾构隧道之间采用浅埋暗挖法拓展建造车站的施工力学规律和模型土体的变形规律。主要研究内容如下:塔柱式车站站厅空间开挖及衬砌过程中(1)洞周土压力变化规律;(2)洞周地层变形规律;(3)地表沉降规律;(4)观察地层变形隔离桩方案对保护盾构管片的效果。两个盾构隧道的中心距离为23 m,隧道内径为5.4 m,开挖外径为6.0 m,两洞开挖外边线间距为29 m。考虑

\* 收稿日期:2008-05-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50779025);中国博士后基金资助项目(20070410530)

作者简介:王克忠(1965-),男,副教授,博士后,主要从事地下空间与工程等领域的教学与科研工作。(E-mail)wkz@tsinghua.edu.cn

到边界条件的影响,盾构隧道外侧距离模型边界应满足3倍洞径的要求,即每侧需要 $6.0\text{ m} \times 3 = 18.0\text{ m}$ ,这样模型范围在垂直洞轴的水平方向应该达到 $29\text{ m} + 18\text{ m} \times 2 = 65\text{ m}$ ,按几何比尺1:10(模型尺寸和原型尺寸比为1:10),模型宽度按1:10要求取为 $6.5\text{ m}$ 。在垂直方向上,隧道上部按 $8.0\text{ m}$ 埋深考虑(其中顶部 $2.5\text{ m}$ 为杂填土),下部地层考虑一倍车站高度,这样需要模拟的高度为: $8.0\text{ m} + 10.364\text{ m} \times 2 = 28.728\text{ m}$ ,模型高度为 $2.88\text{ m}$ 。所以模型在车站隧道横断面的尺寸可取为 $6.5\text{ m} \times 2.88\text{ m}$ 。结合试验台的实际情况,模型实际尺寸确定为 $L \times W \times H = 6.5\text{ m} \times 1.8\text{ m} \times 2.88\text{ m}$ ,见图1。

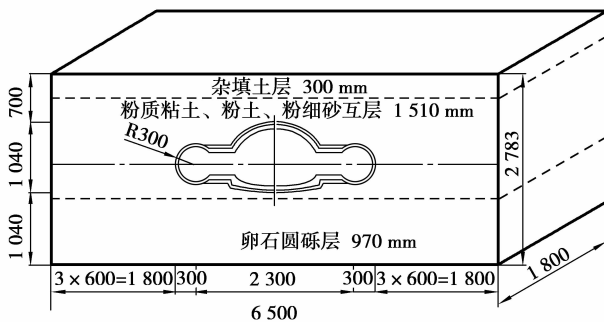


图1 塔柱式车站模型横剖面

## 1.2 模型制作

据北京地铁隧道地层断面地质剖面图,并根据模型制作过程中材料相似原则,取模型材料与原型材料比重比尺为1:1。模型自下而上分为3层。第1层为卵石圆砾为粗碎屑土,当粒径 $>2\text{ mm}$ 的颗粒在土中占50%以上时,称为粗碎屑土。砂粒组粒径 $2 \sim 0.05\text{ mm}$ ,因此采用砂砾土来模拟卵石圆砾是合理的。砂砾土填筑压实干容重为 $21\text{ kN/m}^3$ 。模型试验中这一地层位于地铁车站的底部,厚度为 $0.97\text{ m}$ 。这一层内没有任何埋件,施工相对简单。分两次填筑,每次虚方填高约为 $65 \sim 60\text{ cm}$ ,用铁夯经3遍压实到 $48\text{ cm}$ 。第2层为模型主体材料层,系经过配比试验得出的等效混合材料层,层厚 $166\text{ cm}$ 。包括管片在内的各种埋件以及预加固带均集中在这一层,填筑过程、分块分区复杂,控制要求高,是模型制作的关键层。第3层是地表杂填土层,用中细砂料填筑,层厚约 $30\text{ cm}$ ,一次填筑约 $40\text{ cm}$ ,压实后至 $30\text{ cm}$ ,主要控制容重,力学参数不作严格要求。填筑顶部杂填土层 $25\text{ cm}$ ,并压实达到设计容重。模型尺寸: $L \times W \times H = 6.5\text{ m} \times 1.8\text{ m} \times 2.88\text{ m}$ ,图1。

模型完成后,补充水分至土层含水量 $12.5\%$ ,固结 $2 \sim 3$ 周,并用千分表测量模型地面沉降值。连续3天没有读数变化时,认为达到稳定。图2是模型制作

过程中东盾构隧道外侧灌注桩模拟。

## 2 监测仪器布设

图3是模型制作过程中多点位移计的埋设情况。位移监测采用DWG-K2000微型多点位移计,该仪器是工程模型试验内部变位测量的专用仪器。它是在DWG-40原型观测用的多点位移计的基础上研制开发而成的。位移测量精度 $0.001\text{ mm}$ 。多点位移计测杆采用“多点支撑结构”,具有较高的位移传递精度,而其外形尺寸大大减小(护管外径仅为 $6\text{ mm}$ ),以尽量减少对模型试验的影响(图3)。采用的金属护管有较高的强度及刚度,对模型制作过程中的夯实、振动有一定承受能力。它可以配用多种形式的位移传感器,实现遥测及自动巡检,亦可人工测量。仪器零部件均采用耐腐蚀材料制成,使用过程中稳定持久,并可回收再用。

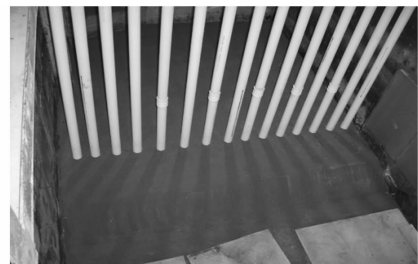


图2 模型制作过程中东盾构隧道外侧灌注桩模拟



图3 模型中多点位移计埋设

### 2.1 地面沉降

**测点布置位置** 布置3个测试断面,分别位于第4、5环之间、第8环中心和第11、12环之间。每个断面布置7个测点。地表沉降测点布置断面见图4。

**测点数量**  $3\text{ 个断面} \times 7\text{ 个测点/每个断面} = 21\text{ 个测点}$ 。

1、2、3号测线上地表位移测点编号见表1。

### 2.2 多点位移计

**测点布置位置** 布置3个测试断面,分别位于第4、5环之间、第8环中心和第11、12环之间(图5)。每个断面5条测线,其中两条水平测线分别布置3个测点,盾构拱顶和车站拱顶三条垂直测线各布置两个测点。

**测点数量**  $3\text{ 个断面} \times [2 \times 3\text{ 个点/每条测线} + 3 \times 2\text{ 个点/每条测线}] = 36\text{ 个测点}$ 。

3 条测线上模型地表位移监测点的编号见表 1。

表 1 各测线上地表位移监测点编号

测线号	测点编号						
1	10	13	22	25	34	37	46
2	11	16	23	29	35	40	47
3	12	19	24	32	36	43	48

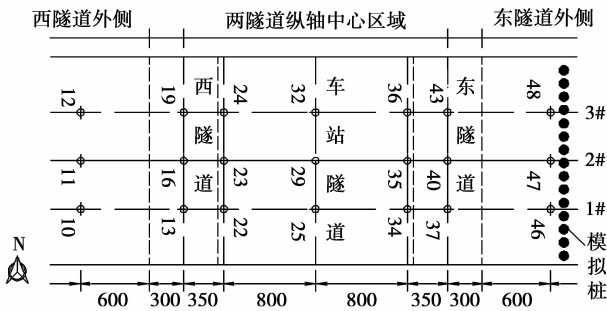


图 4 模型地表沉降点平面布置图(单位 mm)

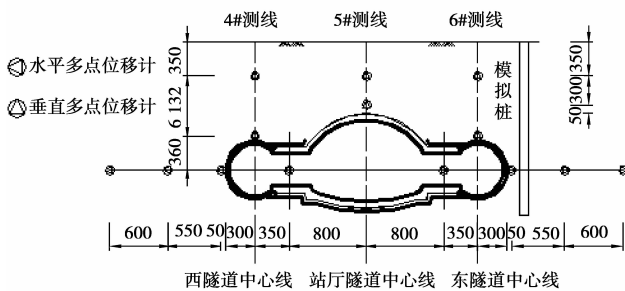


图 5 模型内部多点位移计布置剖面图

### 3 站厅隧道开挖和支护

开挖方案具体分区顺序见图 6。采用双侧导洞先行同时开挖、上中下 3 级台阶式开挖顺序,按照开挖位置拆除堵头钢板,以先左后右顺序用手工工具开挖导洞上台阶至设计断面,进尺为 1 个管片轴向长度(12 cm),作临时支护;继续开挖这 2 个导洞上台阶至两个管片长度,作临时支护;然后开挖左右导洞中台阶至 1 个管片长度、上台阶至 3 个管片长度,作临时支护;继续开挖左右导洞中台阶至 2 个管片长度、上台阶至 4 个管片长度,作临时支护;再开挖左右导洞下台阶至 1 个管片长度、中台阶至 3 个管片长度,上台阶至 5 个管片长度,作临时支护;此时在 1 个管片长度进尺内的左右 2 个导洞全断面已经完成。每个台阶之间相差 2 个管片的长度。

然后开挖中导洞的上台阶,使得在 1 个管片长度进尺内的车站全断面顶拱连通,可以进行顶拱钢拱架的架立和焊接成整体形状。进行第 1 个管片进尺内的车站断面顶拱的初期混凝土衬砌。开挖中导洞的上、中台阶,分别到第 4、2 台阶,作临时支护;然后开挖左

右导洞的上、中、下台阶至第 6、4、2 管片长度,中导洞下台阶至第 1 管片长度,完成第 1 个管片进尺内的车站全断面开挖。然后架立底板的钢拱架,与顶拱边墙钢拱架底部焊接;再进行底板混凝土衬砌。至此第 1 个管片进尺内的车站断面开挖、初期支护全部完成(见图 7)。此时站厅开挖掌子面的体形为左右导洞相邻台阶之间相差 2 个管片长度,中导洞每个台阶滞后左右导洞相应台阶两个管片长度。

再从左右导洞上台阶向前开挖推进 1 个管片长度(第 7 个管片长度)开始,各个导洞的每个台阶都推进 1 个管片长度,进行第 2 个循环操作,至第 2 个管片进尺内的车站站厅断面开挖、初期支护全部完成。依次类推,直到 15 个管片长度全部车站断面的开挖、1 次衬砌完成。

站厅开挖、1 衬完成之后,进行 2 衬钢筋绑扎,架立模板,浇注 2 衬混凝土。2 衬混凝土由南侧的 15 号管片开始,与开挖方向相反,分 6 次浇注完成,每次浇注长度沿轴线方向 30 cm。

在试验过程中随时观测记录各种监测数据、照相、摄影。

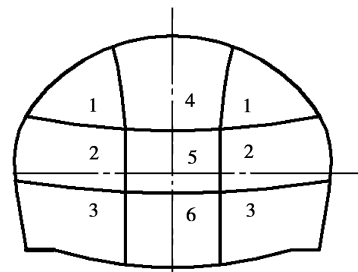


图 6 分块及开挖步骤

### 4 监测结果及分析

#### 4.1 地表沉降监测

1、2、3 号测线地表各测点最大位移累计值如表 2、3、4 所示。根据表 2、3、4 所示的各地表监测点的位移,利用 Tecplot 绘出 3 个阶段的模型地表沉降曲线如图 8、9、10。



图 7 站厅隧道顺序开挖

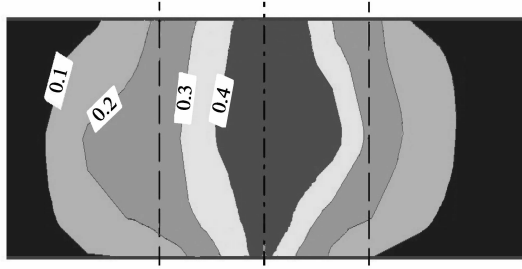


图 8 模型地表沉降第 1 阶段末等值线

表 2 1 号测线各测点在 3 个阶段末位移最大值累计值/mm

测点编号	10	13	22	25	34	37	46
1 阶段	0.138	0.146	0.332	0.483	0.367	0.012	0.127
2 阶段	0.386	0.522	0.84	1.011	0.914	0.189	0.379
3 阶段	0.407	0.566	1.045	1.133	1.178	0.209	0.414

表 3 2 号测线各测点在 3 个阶段末位移最大值累计值/mm

测点编号	11	16	23	29	35	40	47
1 阶段	0.213	0.033	0.281	0.462	0.456	0.002	0.047
2 阶段	0.593	0.52	0.798	0.925	1.118	0.113	0.266
3 阶段	0.659	0.57	1.02	1.098	1.387	0.365	0.291

表 4 3 号测线各测点在 3 个阶段末位移最大值累计值/mm

测点编号	12	19	24	32	36	43	48
1 阶段	0.093	0.1	0.427	0.324	0.257	0.076	0.11
2 阶段	0.35	0.46	0.957	0.888	0.66	0.34	0.339
3 阶段	0.415	0.585	1.218	1.041	1.084	0.505	0.384

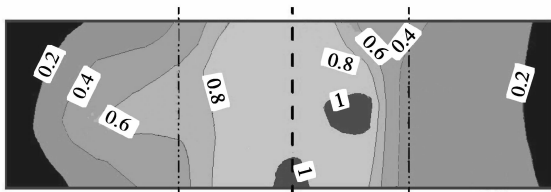


图 9 模型地表沉降第 2 阶段末等值线

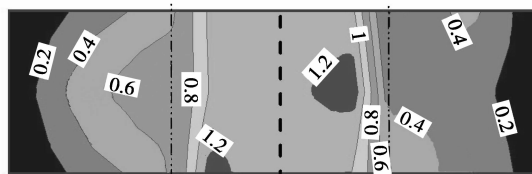


图 10 模型地表沉降第 3 阶段末等值线

### 4.2 地表沉降规律

1)图 8~10 显示,随着试验阶段的进行,地面沉降由站厅顶部地面逐渐向东西两侧发展。在第 2、3 阶段,东侧位移等值线在盾构隧道附近变得非常密集,而西部等值线则分布较均匀。这说明西侧的地层收到加固桩的阻挡,影响了沉降向东的发展。如果东侧有地面或地下建筑物,加固桩可以有效地减少地铁车站施工对它们的影响;

2)较大的沉降发生在站厅隧道顶部一定范围内,即在西、东行车隧道纵轴线之间区域,超出这一范围,地表虽有部分沉降,但沉降量较小;最大的地表沉降发生在站厅隧道纵轴线正上方地表及其附近区域,站厅隧道开挖阶段和横通道开挖阶段,地表沉降量较大,超载加压阶段沉降量较小,至试验结束,模型地表最大沉降值为 1.387 mm,发生在 2 号测线 35 测点(表 3),该点位于东侧隧道中间;

3)由图 8~10 可以看出,3 个阶段的最大的地表沉降发生在站厅隧道轴线顶部地表及其周围,在西、东侧隧道轴线范围内的地表沉降较大,而在这一范围之外,地表沉降量较小。

### 4.3 顶拱及洞周特征点位移量测结果及分析

限于篇幅,选取站厅顶拱 3 个测点在整个试验过程中的位移变化进行研究。

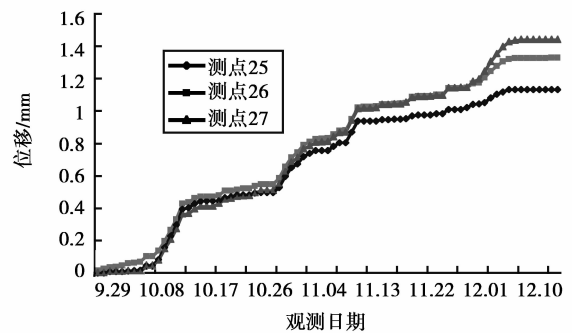


图 11 顶拱 25、26、27 点位移变化规律曲线

图 11 是站厅隧道顶拱 2 号测线垂直剖面上的三个测点在整个试验过程中的位移-时间变化曲线,竖向多点位移测点,埋置最深的 25 测点位移曲线在其它两曲线上方,显示拱顶测点位移变化比远离洞顶的测点竖向位移大,从洞顶起算,各点竖向位移依次减小。10 月 8 日开挖掌子面通过该测量断面时,该断面的测点位移会发生突然增加,其后位移-时间曲线呈平稳上升趋势。

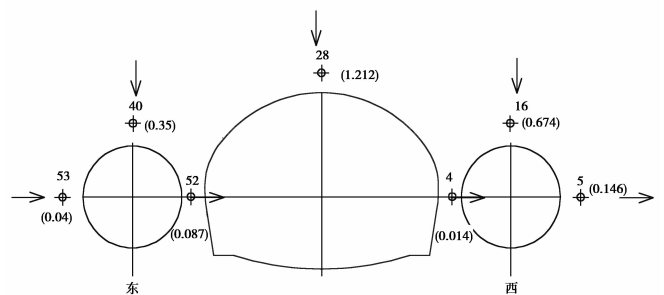


图 12 第 3 阶段末模型特征点最终位移增量/mm

图 12 是模型试验完全结束时各特征点的位移变化,图中括号外数字为位移测点号,括号内为测点位移数据。从图 12 可以看出,整个试验结束时,站厅隧道顶拱 28 测点位移下降 1.212 mm,东、西隧道顶拱 40、16 测点下降 0.35 mm、0.674 mm。站厅隧道东、西测

点 52、4(位于横通道之间的土柱内)分别向西内侧移动 0.087 mm, 0.014 mm, 说明站厅隧洞水平方向既有 0.073 mm 的向内收敛, 同时又整体向西平移了 0.014 mm。从图中可以看出, 整个站厅隧道及东、西隧道均有向西侧移动的趋势。

## 5 结 论

1) 试验结果验证了设计给定的盾构法与浅埋暗挖法相结合建造地铁车站的方案是可行的, 应该予以支持和推广;

2) 两个盾构隧道的各种相关试验数据比较证明, 设计提出的灌注加固桩隔离隧道周围地层方案可以明显减少洞室范围以外的地层沉降和水平变形, 提高洞室群的安全度。实际施工中两侧均应设置灌注加固桩或在载荷较大的一侧设混凝土灌注桩;

3) 在开挖掌子面通过某测量断面时, 该断面的测点位移会发生突然增加, 在其后面一倍洞径处的已开挖断面位移也有明显增加, 位移增量约为掌子面处位移增量的 1/2; 在其前方一倍洞径处的未开挖断面处位移也有一定增加, 其位移增量约为掌子面处位移增量的 1/5~1/6;

4) 同一测量垂线上的测点, 靠近洞室顶拱的测点竖向位移较大, 远离顶拱的测点位移较小;

5) 较大的沉降发生在站厅隧道顶部一定范围内, 即在西、东侧隧道纵轴线之间区域, 超出这一范围, 地表虽有部分沉降, 但沉降量较小; 最大的地表沉降发生在站厅隧道纵轴线正上方地表及其附近区域, 站厅隧道开挖阶段和横通道开挖阶段, 地表沉降量较大, 超载加压阶段沉降量较小。

## 参考文献:

- [1] 崔玖江. 隧道与地下工程修建技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 247-255.
- [2] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004. 683-708.
- [3] 刘招伟, 王梦恕, 董新平. 城市隧道盾构法施工引起的地表沉降分析. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 297-1 301. LIU Zhao-Wei, WANG Meng-Shu, DONG Xin-ping. Analysis of ground surface settlement of metro tunnel by shield construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1 297-1 301.
- [4] 孔恒, 王梦恕, 谭忠盛等. 城市地铁隧道工作面开挖的地层变位规律[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(增): 52-56. KONG Heng, WANG Meng-Shu, TAN Zhong-Sheng, et al. Rule of ground surface settlement by working face in subway [J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41 (Supp): 52-56.
- [5] 周书名. 城市地铁浅埋暗挖法施工地面沉降的预测分析[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(增): 444-448. ZHOU Shu-Ming. The analysis and prediction of ground surface settlement of shallow tunnel excavation [J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39(Suup.): 444-448.
- [6] 张志强, 何川. 地铁盾构隧道近接桩基的施工力学行为研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(1): 92-95. ZHANG Zhi-Qiang, HE Chuan. Research on mechanical behaviour of a shield tunnel construction in metro adjacent to existing pile foundation [J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1): 92-95.
- [7] 李强, 王明年. 浅埋隧道近接施工地表沉降有限元分析[J]. 四川建筑, 2004, 24(1): 98-101. LI Qiang, WANG Ming-Nian. FEM on groud surface settlement of shallow adjacent tunnel [J]. Sichuan Architecture, 2004, 24(1): 98-101.
- [8] 李围, 何川. 盾构隧道基础上修建三条平行隧道地铁车站的施工力学行为研究[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(1): 5-9. LI Wei, HE Chuan. Study on the mechanical behavior of a metro station with three parallel tubes [J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41(1): 5-9.
- [9] 李仲奎, 王爱民. 微型多点位移计新型位移传递模式研究和误差分析, 实验室研究与探索, 2005(6): 21-26. LI Zhong-Kui, WANG Ai-min. Research on the displacement transfer pattern and error analysis for mini-type multi-point extensometer [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2005(6): 21-26.
- [10] 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.
- [11] 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, ZHAN G 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.
- [12] 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.

(编辑 王秀玲)