

# 地铁车站洞桩法施工对地层沉降影响研究

王峥峥\*, 郭翔宇

(大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 结合大连地铁松江路车站的工程条件,运用有限元软件 MIDAS-GTS 建立车站结构-地层三维模型,得出了地表沉降、沉降槽以及塑性区的发展规律.结果表明:地表沉降依照施工过程具有阶段性,导洞施工是控制地表沉降的关键阶段;最大地表沉降及最终地表沉降均符合 60 mm 的控制基准,故洞桩法在控制地表沉降方面是有效的;沉降槽形态及深度受群洞效应影响,且与结构埋深及施工方式有密切关系;塑性区主要产生于导洞阶段,洞桩法基本抑制了塑性区的发展.

**关键词:** 地铁车站;洞桩法;地表沉降;沉降槽;群洞效应

**中图分类号:** TU443

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb201603006

## 0 引言

随着中国城市化的进展,密集的地面建筑及拥堵的交通成为制约城市发展的主要问题.地下轨道交通作为一种新兴的运营方式,成为解决城市问题的理想方案.

地下轨道交通的发展离不开地下车站的建设,而地下车站的施工往往由于其埋深浅、断面大而产生较大的地面沉降,影响地面建筑物的安全.故有效地控制施工期间的地表沉降,便成为地下车站施工的关键问题.

洞桩法是近年来发展起来的针对城市软土地层中浅埋暗挖结构的施工方式<sup>[1]</sup>,在控制地表沉降方面逐步显示出其优越性.北京地铁东单站首先采用了洞桩法施工,地表沉降控制在 15 mm,有效保护了地上结构的安全<sup>[2]</sup>.袁扬等<sup>[3]</sup>结合北京地铁 6 号线朝阳门车站工程对洞桩法导洞开挖方案进行优化,指出相比于先开挖下导洞,先开挖上导洞可以更好地控制地表沉降槽的形状和管线的变形;高成雷等<sup>[4]</sup>采用数值方法研究了洞室跨度、高度、埋深、施工工序等因素对浅埋暗挖洞桩法的影响规律;王霆等<sup>[5]</sup>采用数值方法,针对洞桩

法施工引起的地表沉降和相邻柔性接头管道变形进行研究,指出管道正下方土体开挖过程对管道的的影响最为显著;Liu 等<sup>[6]</sup>分析采用洞桩法扩挖大断面盾构隧道从而建立地铁车站的施工过程,得出导洞施工是控制地表最终沉降的关键阶段的结论.

已有研究往往针对洞桩法施工的某个关键步骤,而涉及洞桩法完整历程的地表最大沉降及沉降槽发展的研究较少.本文以大连地铁松江路车站为背景,运用数值分析的方法针对洞桩法施工过程中地表最大沉降的变化及沉降槽形态发展进行研究,拟求为相关工程提供一定指导及建议.

## 1 工程概况

大连地铁松江路车站设在山东路与松江路交叉口,为地下车站,车站主体沿山东路方向南北设置.车站为地下两层两跨岛式站台形式,地下一层为站厅层,地下二层为站台层.车站全长 182.6 m,标准断面高 16.36 m,宽 22.9 m,顶拱覆土厚度 10.6 m.车站主体结构主要穿越素填土、黏土、卵石等地层,车站结构与地层的剖面关系如图 1 所示.

收稿日期: 2015-12-01; 修回日期: 2016-03-29.

基金项目: 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2014-K5-005);大连市建委科技项目(052033).

作者简介: 王峥峥\*(1982-),男,博士,副教授, E-mail: wangzhengzheng@dlut.edu.cn;郭翔宇(1991-),男,硕士生, E-mail: 117763009@qq.com.

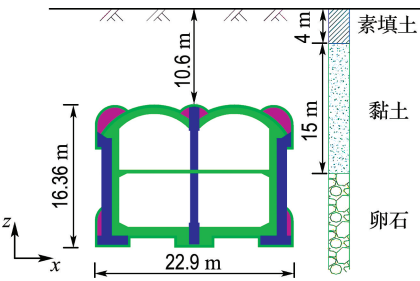


图 1 车站-地层剖面关系

Fig.1 Cross-section of underground station

车站主体采用洞桩法施工,如图 2 所示. 施工过程可简化为 4 个阶段:(a)导洞开挖及初期支护;(b)桩-柱-梁体系形成;(c)扣拱;(d)车站剩余主体扩挖. 其中,导洞阶段依照设计说明采用“先开挖下层边洞 46,再开挖下层中洞 5,接着开挖上层边洞 13,最后开挖上层中洞 2”的对称开挖方式. 由于上覆土层为素填土及黏土,自稳性差,导洞及扣拱施工前需要对地层采取超前小导管加固措施,提高围岩的稳定性. 超前小导管加固采用注入水玻璃与稀硫酸混合浆液预加固措施以提高围岩的稳定性,计算采用等效方法,在模拟计算时依据经验将围岩参数中的弹性模量、内摩擦角及黏聚力提高 50%<sup>[7]</sup>. 车站主体在已完成的地下维护结构(桩-梁-柱-拱)的保护下采用逆作法施工. 施工前,已经对车站周边地层进行降水处理,故不考虑地下水的影响.

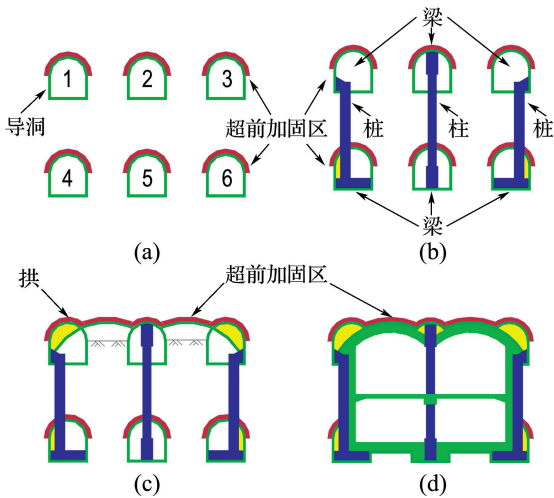


图 2 施工开挖顺序

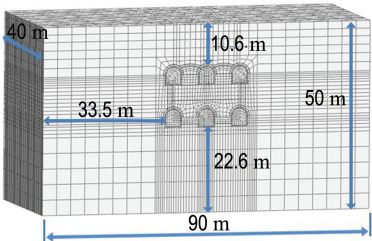
Fig.2 Excavation sequence of construction

工程实践证明,指定统一的沉降控制基准是不妥的,应按照不同地区、不同建筑类别区别对

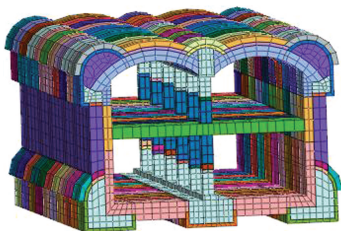
待,以确定经济、合理的控制标准<sup>[8]</sup>. 从以往统计资料来看,大多数暗挖车站地表沉降值的变动范围为 40~120 mm;地表沉降值小于 40 mm 和大于 120 mm 发生的频率均不超过 10%<sup>[9]</sup>. 王梦恕<sup>[8]</sup>在广泛研究国内外地铁项目的基础上,提出地铁隧道暗挖法施工区间地面沉降控制基准为 30 mm,车站地面沉降控制基准为 60 mm. 姚宣德等<sup>[9]</sup>在综合运用模糊聚类分析方法对实地调研数据进行统计分析的基础上,提出车站地面沉降在 80 mm 以下、区间地面沉降在 35 mm 以下,不会对地表建筑物(浅基础)和地下管线产生较大的影响. 故在此选取 60 mm 作为地铁车站暗挖法施工的地表沉降控制基准.

2 计算模型

使用有限元软件 MIDAS-GTS 建立车站结构-地层三维计算模型,尺寸为横向×竖向×纵向=90 m×50 m×40 m(图 3). 洞周地层假定为均质连续弹塑性体,采用摩尔-库仑本构模型. 初期支护、二次衬砌、钢管混凝土柱及导洞内回填均采用线弹性模型. 计算过程共计 84 个施工步.



(a) 整体模型



(b) 车站主体

图 3 计算模型网格划分

Fig.3 Numerical model mesh

计算模型采用位移边界条件,模型底部限制竖向位移,4 个侧面约束法向位移,上表面为自由面.

以《大连市地铁 1 号线工程松江路站岩土工

程勘探报告》为基础,把土体划分为3层不同材料性质的土层,确定模型中材料的计算参数,见表1.

表1 材料的物理力学参数

| Tab. 1 Physico-mechanical parameters of materials |          |                              |              |      |              |             |
|---------------------------------------------------|----------|------------------------------|--------------|------|--------------|-------------|
| 土性                                                | 厚度/<br>m | 容重/<br>(kN·m <sup>-3</sup> ) | 弹性模量/<br>MPa | 泊松比  | 内摩擦<br>角/(°) | 黏聚力/<br>kPa |
| 素填土                                               | 4        | 16.4                         | 13.2         | 0.30 | 10           | 5.0         |
| 黏土                                                | 15       | 19.0                         | 38.8         | 0.28 | 18           | 32.0        |
| 卵石                                                | 31       | 21.5                         | 75.0         | 0.22 | 45           | 0.5         |

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 地表沉降历程分析

土体开挖后,围岩应力重分布,引发地表沉降.选取中导洞对应地表中心点作为监测点,研究洞桩法施工过程中地表沉降的变化规律.图4为地表监测点随施工过程的沉降曲线.

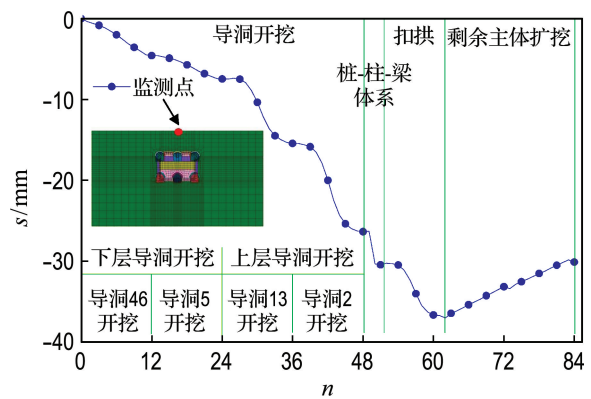


图4 地表沉降随施工步曲线

Fig. 4 Surface settlement curve with construction step

由图4可以看出,地表沉降趋势依据施工阶段分为4个部分.

(1)导洞开挖阶段.在整个导洞开挖过程中,地表监测点一直处于下沉趋势,地表总沉降值达到26.4 mm.下层导洞开挖导致地表下沉7.46 mm,占导洞开挖阶段地表沉降量的28.3%,变形趋势相对平缓,沉降量较小.上层导洞开挖导致地表继续下沉18.94 mm,占导洞开挖阶段地表沉降量的71.7%,并且地表监测点出现两次较大的沉降,下沉趋势陡急,沉降量较大.说明在施工过程中,上层导洞的开挖对地表沉降的影响大于下层导洞.其原因有二:①上层导洞相对下层导洞埋深较浅,开挖造成的应力重分布对地表影响较大;

②下层导洞优先施工,开挖造成的围岩扰动一定程度上影响了上层导洞周边围岩的稳定性,使得上层导洞开挖造成更大的地表变形.

(2)桩-柱-梁体系形成阶段.导洞开挖完成后,在下层导洞边洞(导洞46)内施作桩底纵梁,人工挖孔施作结构围护边桩及桩顶纵梁;施作下层导洞中洞(导洞5)内纵梁,人工挖孔,自下而上施作中柱,最后施作顶纵梁.此阶段地表沉降量达到30.4 mm,增加4 mm,沉降较小.这部分沉降主要是由于人工挖孔施作边桩及中柱过程中对地层的扰动引起的.

(3)扣拱阶段.此阶段的沉降主要是中洞处土体开挖,在开挖面上方形成松动圈,从而造成地表下沉.扣拱施工完毕后,地表沉降为37.1 mm,增加6.7 mm.扣拱阶段开挖断面大,但引起的地表沉降明显小于导洞阶段的地表沉降,究其原因是松动圈通过扣拱初支将力传递至上层边洞内初支及上层中洞初支,多个初支共同构成支撑拱,拱压力作用于顶部纵梁,顶部纵梁通过边桩及中柱将力传递至底部纵梁,整个桩-柱-梁体系对上部土体起到支撑作用,有效抑制了地层的进一步下沉,使得地表沉降受到约束.故地表没有因为拱部土体开挖而产生过大沉降(图5).

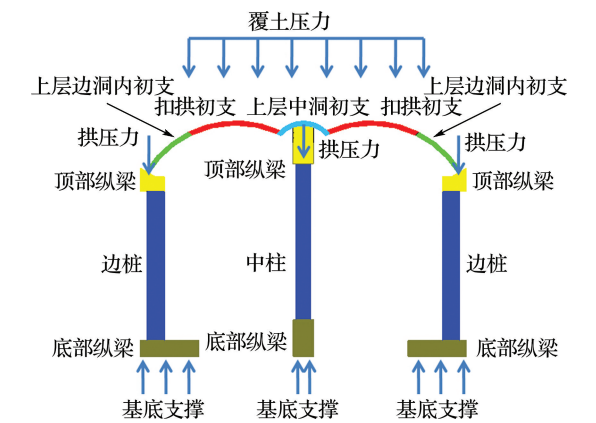


图5 桩-柱-梁体系承压示意

Fig. 5 Sketch of pile-column-beam bearing system

(4)剩余主体扩挖阶段.车站主体施工完毕,地表最终沉降为30.2 mm,减少6.9 mm,地表沉降出现了明显的回弹现象.在扣拱施工完毕后,车站结构形成了边桩-纵梁-中柱-扣拱共同支撑的框架体系,约束内部土体,承受内外土压差,与内部

土体形成结构-内部土体共同体系. 随着车站主体进一步扩挖, 内部土体减少, 体系自重减轻, 车站结构发生上浮, 使得地表沉降反弹(图 6).

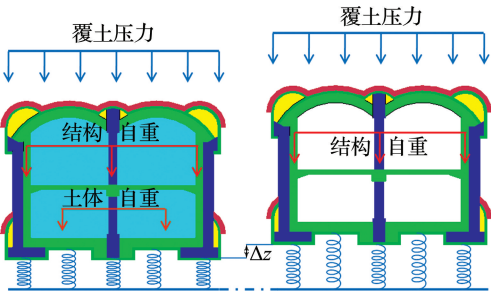


图 6 已建成车站结构上浮示意

Fig. 6 Uplift trend of the station after construction

3.2 地表沉降槽分析

选取地表纵向 20 m 处的所有节点, 施作地表沉降曲线(图 7).

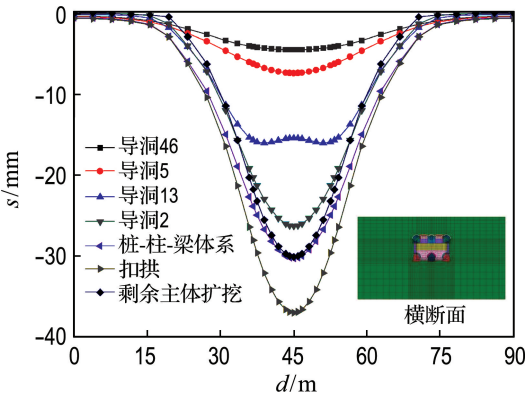


图 7 地表沉降曲线

Fig. 7 Surface settlement curve

由图 7 可以看出, 地表沉降槽具有明显阶段性:

(1)导洞开挖阶段. 导洞 46 开挖完成后, 地表沉降槽浅而宽且满足高斯公式拟合. 地铁平行双隧道施工往往由于其近接性产生相互扰动, 地表沉降相互叠加而产生双凹槽形态的地表沉降曲线<sup>[10]</sup>. 然而导洞 46 开挖完成后并未出现预料中的双凹槽形, 这是由于两导洞间距较小, 彼此之间扰动明显, 且导洞埋深较深, 对地表影响较小, 故两导洞的沉降槽叠合后在地表呈现出单凹槽形式, 说明埋深于此阶段对地表沉降槽形状影响大于施工方式影响. 导洞 5 开挖后, 由于地层扰动, 地表进一步下沉, 又因为其埋深较深, 地表沉降槽

依旧保持浅而宽的形式. 导洞 13 开挖后, 地表沉降增加明显, 且地表沉降槽由单凹槽变为双凹槽. 导洞 13 属于上层边洞, 埋深较浅, 导洞开挖造成的地表沉降槽深而窄, 对地表沉降槽形式影响较大. 又上层中洞未开挖, 其余导洞施工对上层中洞处土体扰动有限, 车站中心线处地表未发生较大沉降. 中洞处地表与边洞处地表沉降差值较大, 故地表凹槽形式发生改变. 这说明施工方式于此阶段对地表沉降槽的影响大于埋深. 导洞 2 属于上层中洞, 埋深浅且最后开挖, 受其余导洞开挖造成的地层扰动影响, 开挖后地表出现较大下沉, 地表沉降槽恢复单凹槽形式.

(2)桩-柱-梁体系形成阶段. 人工挖孔做桩对地层有一定扰动作用, 地表出现小幅下沉, 凹槽形式未改变.

(3)扣拱阶段. 由于开挖面积大且开挖部分埋深较浅, 地表出现较大沉降, 又上部土体开挖过程等同单孔隧道施工, 故地表沉降槽仍保持单凹槽形式.

(4)剩余主体扩挖阶段. 车站结构带动周边地层发生上浮, 地表沉降减小, 地表沉降槽宽度收窄, 地表最终沉降及沉降槽宽度均小于扣拱阶段.

从以上过程可以看出, 地表沉降槽的分布形式, 不仅与施工方式有关, 而且与结构的埋深联系密切. 导洞开挖阶段受群洞效应影响明显, 导洞 46 的施工因群洞效应相互扰动, 直接影响到沉降槽形态. 而导洞 13 及导洞 2 由于后期开挖, 其所处地层受先行洞开挖的影响而松弛, 致使导洞 13 及导洞 5 开挖时地表均有较大沉降, 地表沉降槽下降幅度较大.

3.3 地层塑性区

图 8 为各个阶段围岩塑性区情况.

由图 8 可以看出, 导洞开挖阶段, 下导洞处的塑性区较小且未贯通. 这是因为下导洞开挖时, 地层扰动较弱, 塑性区发展不明显. 而上导洞开挖阶段, 塑性区较大且相互贯通, 是因为下导洞开挖引起的地层扰动对上导洞造成了较大影响. 桩-柱-梁形成阶段, 施工对地层扰动较小, 塑性区变化不明显. 扣拱阶段, 拱部超前支护以及桩-柱-梁支撑体系的存在有效地控制了塑性区的发展, 扣拱上方及边桩外侧塑性区很小. 剩余主体扩挖阶段, 车

站主体已经形成了桩、梁、拱支撑框架体系,结构稳定.但扣拱承受上部土压力,使得拱座处产生水平推力(图 9),又拱座处仅有导洞初支而无其他

支护措施,拱座抗推力不足,故拱座区域出现局部塑性区发展.所以在施工过程中,拱座区域需要加强支护措施,例如加强注浆等.

4 结 论

(1)地表沉降呈现明显的阶段性.整个施工过程中,地表最大沉降为 37.1 mm,地表最终沉降为 30.2 mm,地表最大沉降及最终沉降均符合地铁车站地表沉降控制基准.故洞桩法施工控制地表沉降是有效的.导洞施工完毕后地表沉降为 26.4 mm,占地表最终沉降的 87.4%,是控制地表位移的关键阶段.剩余主体扩挖后,由于车站主体自重减轻,地表沉降发生回弹.

(2)地表沉降槽发展受群洞效应影响明显,且与结构埋深及施工方式有紧密关系.在导洞开挖阶段,受导洞开挖顺序影响,地表沉降槽曾出现双凹槽形态.

(3)整个施工过程中,塑性区呈现出上部大、下部小的特点,导洞开挖顺序对其影响显著.桩-柱-梁体系形成后,有效地控制了塑性区的发展.由于拱座处存在推力,在剩余主体扩挖阶段拱座位置存在局部塑性区,施工过程中需针对此位置加强支护措施.

参考文献：

[1] 张志勇. 地铁车站 PBA 工法导洞近接施工影响与分析[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(4):94-100.  
ZHANG Zhi-yong. Analysis of impact on existing tunnel during construction of pilot tunnel in metro station with PBA method [J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2010, 47(4):94-100. (in Chinese)

[2] 申家国. 浅埋暗挖地铁车站洞桩支承法施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2001, 1(2):10-12.  
SHEN Jia-guo. Construction of shallow subsurface excavated subway station using the method of piling in pilot tunnel [J]. **Railway Construction Technology**, 2001, 1(2):10-12. (in Chinese)

[3] 袁 扬,刘维宁,丁德云,等. 洞桩法施工地铁车站导洞开挖方案优化分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(z2):1692-1696.  
YUAN Yang, LIU Wei-ning, DING De-yun, et al. Analysis on heading excavation optimization in metro station constructed by drift-PBA method [J].

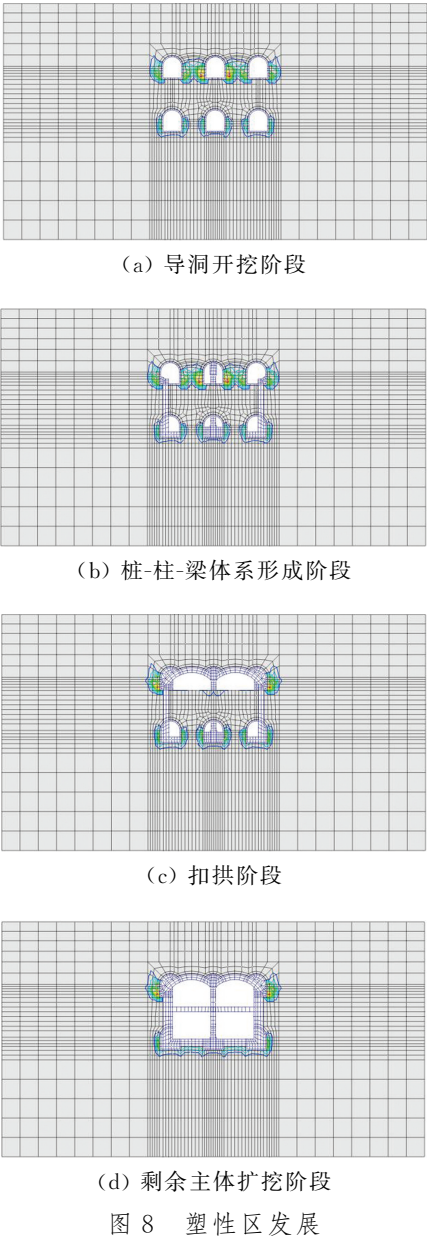


图 8 塑性区发展

Fig. 8 Development of plastic zone

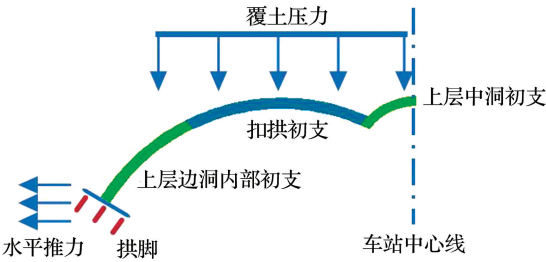


图 9 拱座推力

Fig. 9 Arch abutment thrust

- Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2011, **7**(z2):1692-1696. (in Chinese)
- [4] 高成雷,朱永全. 浅埋暗挖洞桩法参数敏感性分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(S1):536-539, 544.  
GAO Cheng-lei, ZHU Yong-quan. Sensitivity analysis of parameters of cavern-pile method for shallow buried underground excavated tunnels [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, **28**(S1):536-539, 544. (in Chinese)
- [5] 王 霆,罗富荣,刘维宁,等. 地铁车站洞桩法施工引起的地表沉降和邻近柔性接头管道变形研究[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(2):155-161.  
WANG Ting, LUO Fu-rong, LIU Wei-ning, *et al.* Study of surface settlement and flexible joint pipeline deformation induced by metro station construction with PBA method [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, **45**(2):155-161. (in Chinese)
- [6] LIU Jun, WANG Fang, HE Shao-hui, *et al.* Enlarging a large-diameter shield tunnel using the pile-beam-arch method to create a metro station [J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2015, **49**:130-143.
- [7] 张文锦. 北京地铁七号线达官营站洞桩法开挖数值模拟研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2014, **27**(2):55-60.  
ZHANG Wen-jin. Simulation investigation on numerical value of hole-stake excavation in Daguanying station of Beijing subway line 7 [J]. **Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science)**, 2014, **27**(2):55-60. (in Chinese)
- [8] 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.  
WANG Meng-shu. **General Theory of Shallow Mining Excavation Technique for Underground Works** [M]. Hefei: Anhui Education Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [9] 姚宣德,王梦恕. 地铁浅埋暗挖法施工引起的地表沉降控制标准的统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(10):2030-2035.  
YAO Xuan-de, WANG Meng-shu. Statistic analysis of guideposts for ground settlement induced by shallow tunnel construction [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, **25**(10):2030-2035. (in Chinese)
- [10] 刘 波,陶龙光,丁城刚,等. 地铁双隧道施工诱发地表沉降预测研究与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2006, **35**(3):356-361.  
LIU Bo, TAO Long-guang, DING Cheng-gang, *et al.* Prediction for ground subsidence induced by subway double tube tunneling [J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2006, **35**(3):356-361. (in Chinese)

## Research on ground settlement of metro station construction by PBA method

WANG Zheng-zheng\*, GUO Xiang-yu

( School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** Combined with engineering conditions of Songjiang Road metro station in Dalian, a three-dimensional model of underground station was built using finite element software MIDAS-GTS, and the development tendencies of surface settlement, settlement trough and plastic zone were analyzed. The analytical results show that the surface settlement has obvious stages and the construction of pilot tunnel is the key phase to control surface settlement. Furthermore, the maximum surface settlement and the final surface settlement both meet the control criterion 60 mm, so PBA (pile-beam-arch) method is effective to control surface settlement. And the mode and depth of the settlement trough are affected not only by multi-tunnel effect, but also by burial depth and construction mode. Finally, plastic zone generates at pilot tunnel phase, PBA method could control the development of plastic zone effectively.

**Key words:** metro station; PBA (pile-beam-arch) method; ground settlement; settlement trough; multi-tunnel effect