

浅埋大跨洞桩隧道变形监测与控制分析

瞿万波¹, 刘新荣¹, 黄瑞金², 刘明忠²

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 中铁二局集团有限公司, 四川 成都 610032)

摘要: 针对采用洞桩法施工的北京地铁 10 号线工体北路站, 介绍了浅埋大跨洞桩隧道的变形监测与控制措施。根据监测数据, 对洞桩法隧道导洞开挖, 主体扣拱的拱顶沉降与洞周收敛以及地表和上部立交桥基础的沉降变形规律进行了分析研究。结果表明: 1) 采用洞桩施工方法能有效控制浅埋大跨隧道地表沉降和地层变形; 2) 隧道埋深和跨度、导洞开挖对浅埋大跨洞桩隧道变形影响显著; 3) 设置超前小导管注浆, 及时施作初期支护和二衬, 可以有效的控制变形的发展。

关键词: 洞桩法; 浅埋大跨隧道; 变形监测; 变形控制; 地铁车站

中图分类号: U456.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2009)01-0038-06

Deformation Monitoring and Its Control in a Shallow-buried Large-span Tunnel Constructed Using the Pile-Beam-Arch Method

QU Wan-bo¹, LIU Xin-rong¹, HUANG Rui-jin², LIU Ming-zhong²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. China Railway Erju Co., Ltd., Chengdu 610032, P. R. China)

Abstract: Deformation monitoring and control measures of a shallow-buried large-span tunnel constructed using the pile-beam-arch (PBA) method are described, taking the North Gongti Road Station of Beijing Metro line 10 as an example. Based on the monitoring datum, the crown settlement, convergence, ground settlement of the tunnel and the bridge foundation settlement are analyzed. The results show that (1) the PBA tunneling method can restrain the ground settlement and deformation of a shallow-buried large-span tunnel; (2) the depth, tunnel span and pilot tunnel construction may influence the deformation of a shallow-buried large-section tunnel significantly; and, (3) advanced conduit grouting, timely preliminary support and permanent lining construction can reduce the deformation effectively.

Key words: pile-beam-arch tunneling method; shallow-buried large-span tunnel; deformation monitoring; deformation control; metro station.

洞桩法是我国工程师在北京地铁建设实践中创立的一种隧道施工方法^[1], 与传统施工方法相比, 洞桩法不仅具有施工安全, 用材节省, 施工速度快等优点, 而且圻工废弃量小, 断面利用率高, 不受跨度、层数的限制, 成本也相对较低, 特别适合软土地层中的隧道修建, 因此在北京地铁建设中得到广泛应

用^[2-6], 众多学者也进行了一定的研究^[7-11]。由于洞桩法隧道施工步序较多, 地层应力和位移变化因开挖与支护的不断转换而变得异常复杂, 因此施工必须严格遵循“管超前, 严注浆, 短开挖, 强支护, 早成环, 勤量测”的原则^[12], 准确把握隧道洞内衬砌、围岩和地面变形的动态变化, 对监控数据进行正确分

收稿日期: 2008-08-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50334060); 重庆市高校优秀中青年骨干教师资助计划(渝教人 2003-2 号)

作者简介: 瞿万波(1974-), 男, 高级工程师, 重庆大学博士研究生, 主要从事隧道与岩土方面的研究, (E-mail) aniu_1973@163.com。

刘新荣(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail) liuxrong@126.com。

析和综合判断,及时依据监测数据修正设计支护参数,采取有效的施工控制措施,才能保证隧道施工的安全,减小对周围环境的破坏,这也符合隧道新奥法施工的基本要求^[13-15]。

目前浅埋大跨洞桩法隧道在国内的应用尚处于起步与探索阶段,本文结合北京地铁十号线工体北路站洞桩法隧道的现场监测成果,对城市复杂条件下浅埋洞桩隧道施工过程中围岩和支护体系的力学特征及变形控制措施进行分析研究。

1 工程背景

北京地铁 10 号线工体北路站位于工体北路与东三环交叉口,呈南北走向,为全埋地下车站,全长 187 m。由于受三环路长虹立交的限制,车站采用分离岛式暗挖结构形式,左右线分别位于长虹桥两侧的辅路下,线间距 45.5 m,左右线两结构之间设联络通道、迂回风道各两条。车站结构断面为单拱单跨断面,净空 10 m。车站主体结构中除南端联络通道采用台阶法施工以外,其余部分均采用洞桩法施工。结构底板标高约 14.30 m,基底埋深约 24.00 m,设计轨顶标高约 16.67~17.09 m,结构顶板

标高约 30.00 m,覆土厚度约 6.5~9.7 m。隧道设计断面主要尺寸及主要施工步骤如图 1 所示。

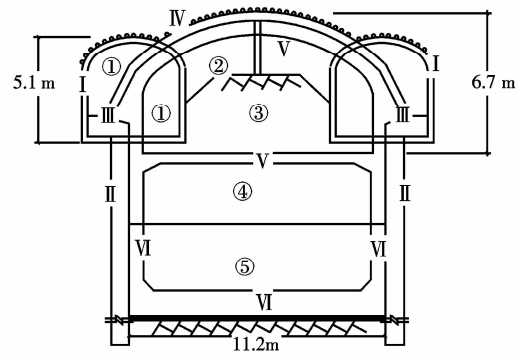


图 1 隧道断面及主要施工步骤

车站范围主要地层由上至下依次为:人工杂填土和粉土填土层、粉土层和粉质粘土层、粉细砂层和中粗砂层、圆砾卵石层、粉质粘土和粘土及粉土层、中粗砂层、卵石圆砾层。车站顶部位于粉细砂层中,底部结构位于卵石圆砾层中。施工范围内存在上层滞水、潜水、承压水,顶板位于潜水位以下 0.4 m,底板位于承压水位以下 6 m。车站左线纵剖面如图 2 所示。

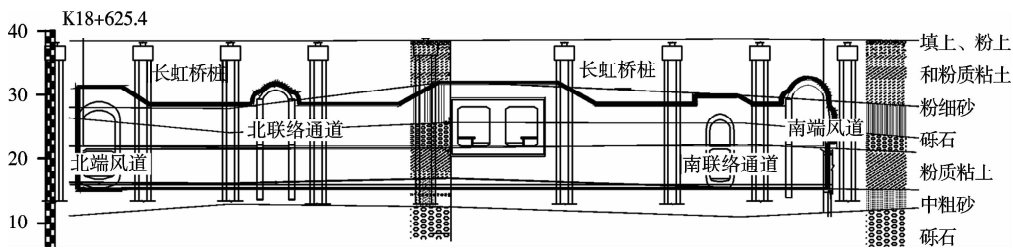


图 2 工体北路站左线隧道纵断面图

由于周边环境复杂,地下管线多,因此对地层变形控制要求非常严格,为控制地面沉降变形,确保长虹桥及周边高层建筑物和地下管线的安全稳定,通过对多个方案的比选,车站最终采用了对地层和周边环境影响均较小的洞桩法施工。

2 隧道监测方案

由于隧道埋深浅,跨度大,地质条件比较差,开挖与支护的步序多,直接影响着隧道围岩和衬砌结构的稳定,特别是初期支护扣拱阶段,受力更为复杂,而目前国内可供借鉴的工程经验不多,设计和施工方法都还不太成熟;地面的长虹桥和地下管线等复杂的环境条件对地面沉降控制提出了非常高的要求。根据工程结构型式、施工工艺和周围环境特点,主要从地表沉降、拱顶沉降和洞周收敛和桥桩保护几方面加以监测与控制。监测项目和典型测点布置断面如表 1 和图 3 所示。

表 1 隧道变形监测项目

监测项目	测点布置部位
拱顶沉降	沿初期支护拱顶每 5~10 m 布置一个断面
洞周收敛	沿初期支护拱顶每 10 m 布置一个断面
地表变形	沿主体、联络通道、风道地表每 10 m 布置一个断面
桥桩沉降	长虹桥除 1 轴外每个桥桩都布置测点

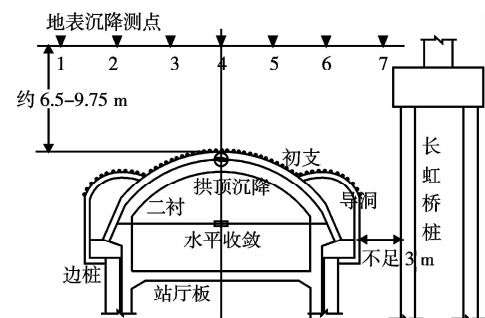


图 3 典型断面测点布置图

3 监测结果分析

监测成果包括南北风道、联络通道、隧道主线和桥桩等,本文重点对典型部位的变形监测成果进行了分析研究。

3.1 导洞拱顶沉降

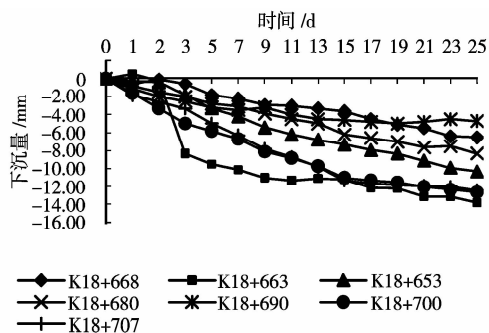


图 4 左线导洞初支拱顶沉降时程曲线图

图 4 所示为左线导洞初支结构施作后拱顶沉降量随时间的变化曲线,其中 K18+668 和 K18+680 为主体导洞与北联络通道导洞相交处的拱顶下沉时程曲线。从图 4 可以看出:

1) 由于导洞跨度不大,因此,导洞拱顶沉降量也都不大,左线两个导洞衬砌拱顶的沉降均不超过 15 mm。

2) 导洞远离交叉口部位的支护结构沉降量比交叉口处支护结构变形量稍大。这是因为联络通道导洞比较高,上覆土层厚度比主体导洞薄,作用于联络通道导洞衬砌的地层压力比主体导洞衬砌所受的压力小;同时,主体导洞和联络通道导洞之间存在相互影响,因此,位于交叉口附近的 K18+668 和 K18+680 两个断面的拱顶沉降都比其它测点小。

3) 支护结构在开挖初期的变形量占有较大比例。各曲线初期沉降在总沉降中所占的比重都比较大,其中 K18+690 处拱顶未能及时布设沉降监测点,因此所量测的累计沉降值比相同情况的其他部位小,可见开挖初期支护结构的变形量在总变形中占的比例是相当可观的。

3.2 主体初期支护变形分析

图 5 为左线主体初期支护扣拱后部分里程拱顶沉降随时间的变化关系曲线。表 2 统计了主体左右线部分断面的收敛值。

表 2 部分断面初期支护收敛统计

部位	左线 K18+719	左线 K18+729	右线 K18+656	右线 K18+645
收敛值/mm	4.93	1.99	3.0	2.43

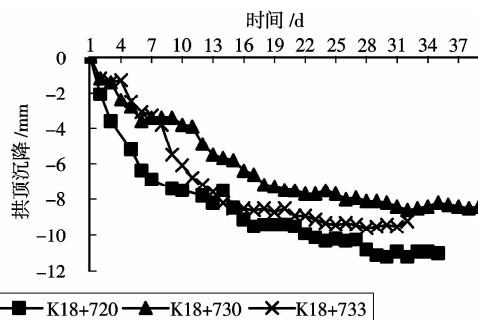


图 5 左线主体拱顶沉降时程曲线

从表 2 和图 5 可以看出:

1) 在拱顶沉降变形随时间的变化规律上,扣拱后的 15~20 d 是拱顶沉降变形发展最快的阶段, K18+720, K18+730, K18+733 3 个断面前 3 周的拱顶沉降分别达到了总沉降量的 82%, 86%, 88%, 此后沉降变形量非常小。

2) 洞桩法施工的隧道初期支护拱顶总沉降量都不太大,测得完整数据的 3 个断面均不超过 12 mm, 可见,采用洞桩施工方法对于控制隧道衬砌拱顶沉降具有非常好的效果。

3) 初期支护的收敛值都比较小,表明浅埋洞桩隧道引起的地层水平变位并不大,再加上站厅层二衬的及时施作,对控制地层变形是合理有效的。

3.3 地表沉降分析

根据隧道特点和地面长虹桥基础位置情况,地表每隔 10 m 左右即布设了一个沉降监测断面,绝大部分测点都量测了地表的累计沉降数据。隧道主体左、右线部分断面累计沉降见图 6、7,从中可以得出隧道采用洞桩法施工时地表沉降的规律。

3.3.1 地表累计沉降量与拱顶埋深的关系 隧道主体与远期规划的 M16 线相交的部位采用了加高断面,其里程为 K18+730、K18+740、K18+750。标准断面拱顶埋深约 9.75 m,而加高断面比标准断面高度增加了 3.25 m,因此,其埋深仅 6.5 m。从图 6、7 所示的主体左右线部分断面累计沉降曲线图可以看出:

1) 在隧道标准断面部位埋深越大的区域,地表沉降量越小,而在隧道加高断面埋深越小的区域,地表沉降量反而越大,表明在浅埋条件下,隧道埋深对隧道上方地层变形量的有重要的影响。

2) 一般情况下,地表沉降在越靠近隧道中线(测点 4)部位,沉降量越较大,越远离中线的区域,沉降量越小,但浅埋的工体北路地铁站洞桩施工隧道的这一特征不明显,仅主体左线标准断面靠近隧道中

线部位显示出下凹的沉降槽形状,在隧道的加高区段和右线的隧道断面范围内,地表沉降槽基本接近直线,表面浅埋洞桩隧道地面沉降槽形状与一般情况下隧道地面沉降槽形状是有所不同的。

3.3.2 跨度对地表累计沉降量的影响 图 8 为左线主体标准断面和联络通道标准断面地表累计沉降曲线,由图 8 可以发现,跨度对地表总沉降量具有一定影响。主体标准断面初期支护跨度为 11.2 m,而联络通道跨度为 7.6 m,二者跨度相差 3.6 m,而两个区域地表的总沉降量也显示出明显差异,二者的总沉降相差了 10 ~ 30 mm 左右。

3.3.3 地表沉降随施工过程的动态变化

图 9-12 为北联络通道与北端风道之间左线主体部位三个断面测点 4 地表沉降随施工过程的动态变化关系。根据图 9-12 可以发现:

1)导洞对地表沉降影响非常重要。虽然导洞跨度只有 4.6 m,但两个导洞之间的净距不大,因此,导洞对地表沉降的影响是非常大的,到主体侧向开口前,3 个断面因导洞开挖引起的地表累计沉降均已达到 20 mm 以上,接近总沉降的一半。

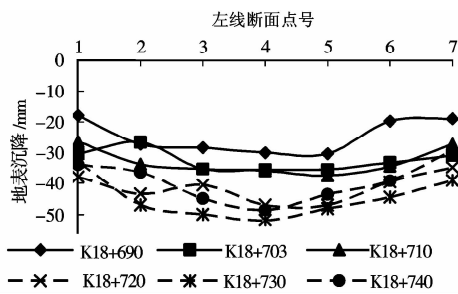


图 6 左线主体部分断面地表累计沉降曲线

2)交叉口主体侧向开口施工也是该段隧道沉降变形量比较大的一个阶段,到主体扣拱前,各断面的总沉降量都达到 40~50 mm。

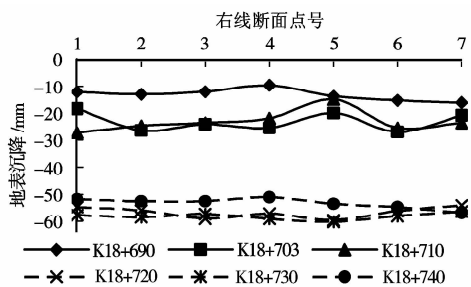


图 7 主体右线部分断面地表累计沉降曲线

3)主体扣拱阶段也要引起地表沉降,但沉降速率比较慢,总沉降量也比较小,位于交叉口位置的 K18+645 和 K18+665 断面尤其明显。

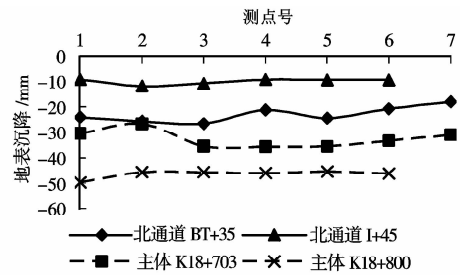


图 8 主体和联络通道部分断面地表累计沉降曲线

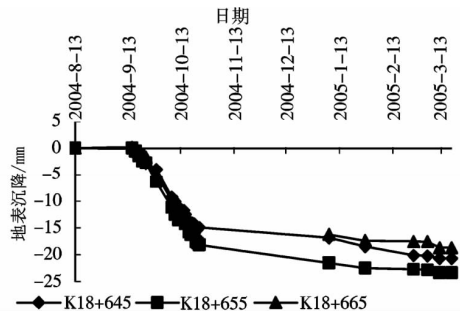


图 9 典型断面地表沉降时程曲线:导洞开挖

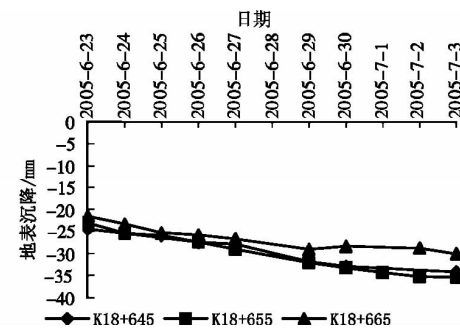


图 10 典型断面地表沉降时程曲线:交叉口侧向开口

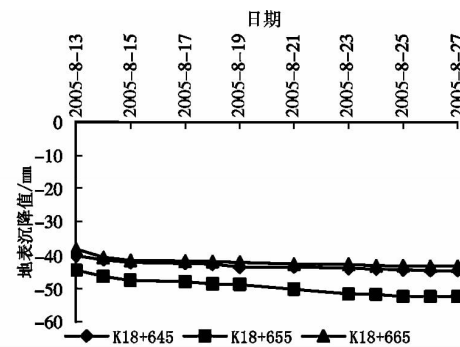


图 11 典型断面地表沉降时程曲线:主体扣拱

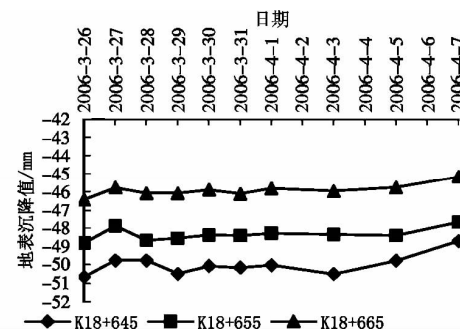


图 12 典型断面地表沉降时程曲线:主体下部开挖

4)主体下部开挖阶段地表基本不产生沉降变形,3个断面变形曲线走势都很平缓,在后期甚至都呈现出使地表上升的趋势。

3.4 桥基沉降分析

从表3中对长虹立交桥基础沉降监测数据的统计可以看出,长虹桥基础的沉降量总体上都不大,较

大沉降发生在左线的2、3轴部位,其沉降值超过了10 mm。从位置上看,2、3轴的基础靠近采用台阶法施工的南联络通道。而其它采用洞桩法施工的部位沉降值均不超过10 mm,其中5、6、7轴沉降尤其不明显,可见隧道采用洞桩施工方法对控制地面建、构筑物变形的确具有较好的效果。

表3 长虹桥基础沉降统计值

部位	2轴	3轴	4轴	5轴	6轴	7轴	8轴	9轴	10轴
左线桥基沉降/mm	-13.3	-15.4	-5.0	1.1	1.4	-0.1	-8.8	-7.6	-4.7
右线桥基沉降/mm	-8.4	-14.3	-5.4	-1.8	1.0	-3.1	-9.1	-4.4	-4.2

4 施工控制与桥桩保护措施

为了确保地下管线及周边环境的安全,控制隧道开挖引起的地表沉降,施工中采取了以下控制措施:

1)采用合理的开挖顺序,先施作近桥桩侧导洞,适当增大两个导洞开挖面的距离,减小两个导洞的群洞效应,及时根据监测信息调整支护参数。

2)针对其稳定性很差的情况,在拱部工作面前方打设超前小导管,对松散地层进行注浆加固,从而改善支护结构受力情况,达到加固土体和止水的目的。

3)因钻孔桩间距较小,仅1.2~1.5 m,施工中采用跳孔施工,防止对邻近桩孔的扰动,并减弱了对桥桩周围土体的不利影响。

4)严格控制进尺长度,开挖后立即施作初期支护,将上部地层压力传到边桩上,并进一步通过桩传到深部地层中,保证围岩的稳定。

5)及时施工后期的站厅层二衬,与初期支护、冠梁、边桩共同形成封闭环,改善了结构受力,有效控制了沉降变形的发展。监测资料表明,二衬施工后主体下部开挖过程中,地表基本没有产生沉降,得到了有效控制。

6)由于隧道交叉口结构受力复杂,在交叉口采用了组合拱梁结构型式,在后来的监控中仍发现有裂缝产生,因此在初期支护完成后,立即在主体与联络通道相交的初衬内侧施作了一个1 m×2 m的二衬加强环,用来承担联络通道初衬传来的压力,有效的保证了交叉口的安全。

7)导洞内施工边桩时,加大边桩跳做的间隔,减少对土体的扰动;靠桥桩一侧的边墙打设侧向超前导管,加大外插角度为45°左右,通过注浆加固桥桩周围地层,减小隧道开挖引起的桥桩侧向变形;同时根据量测结果,采取跟踪注浆措施及时补强,减小土体损失的后期变形;在立交桥上采取对需抬高

的支座及时抬高,对产生滑移的支座及时恢复原位。

隧道虽然属于软土浅埋隧道,且跨度也比较大,但由于施工过程中结合监测资料反馈信息及时采取了有效的工程措施来控制变形,因此整个隧道施工过程中,除交叉口处主体初期支护出现过开裂现象外,导洞和二衬均未发生过大变形,对地面立交桥的保护也达到了预期的效果。

5 结语

通过对条件复杂的北京地铁十号线工体北路站浅埋大跨洞桩隧道现场监测成果的分析研究,得出了如下结论:

1)城市地铁隧道上部建、构筑物和管线较多,对隧道施工沉降变形提出了较高的要求,工体北路站的监测成果表明,洞桩施工方法能有效控制地表沉降和地层变形,从而保证隧道施工和周围环境的安全。

2)浅埋大跨洞桩隧道施工变形受隧道拱顶埋置深度和跨度的影响比较大,较小跨度区段的沉降变形显著小于跨度稍大的部位,但埋深较浅的部位地表沉降变形反而比埋深较深的部位大。

3)从地表沉降监测结果看,采用洞桩法施工的城市浅埋大跨隧道地表沉降受导洞开挖影响比较显著,导洞开挖所引起的地表沉降在总沉降中占了相当大的比例,而后期主体下部开挖对地表沉降无明显影响。因此,施工中应尽可能缩短导洞开挖和扣拱的时间间隔。

4)二衬施作以后,地表沉降很快趋于稳定。因此,为了保证工程的安全,有效控制沉降变形的发展,应及时施作二衬。

参考文献:

- [1] 高成雷. 浅埋暗挖洞桩法应用理论研究[D]. 成都:西南交通大学, 2002.
- [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(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(2):10-12.
- [3] LIU W, LUO F, MEI J. A new construction method for a metro station in Beijing [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000(15):409-413.
- [4] 李昊勇,程鹏举,任敬东. 北京地铁苏州街车站暗挖施工技术[J]. 铁道标准设计,2004(11):43-45.
- LI HAO-YONG, CHENG PENG-JU, REN JING-DONG. Construction technology of Suzhou street station in Beijing metro[J]. Railway Standard Design, 2004(11):43-45.
- [5] 朱泽民. 地铁暗挖车站洞桩法(PBA)施工技术[J]. 隧道建设,2006(5):63-65,100.
- ZHU ZE-MIN. Pile-Beam-Arch (PBA) construction technology for mined metro stations [J]. Tunnel Construction, 2006(5):63-65,100.
- [6] 吕波. 北京地铁光华路车站过桥桩施工技术[J]. 施工技术,2007(1):24-26.
- LV BO. Construction technology of Guanghua road station passing under the bridge pile foundation in Beijing metro[J]. Construction Technology, 2007(1):24-26.
- [7] 王树才,黄治平,安玉波. 北京地铁十号线呼家楼车站主体施工方案比选[J]. 铁道建筑,2006(3):44-46.
- WANG SHU-CAI, HUANG ZHI-PING, AN YU-BO. Construction scheme selection for Hujialou station in Beijing metro line 10 [J]. Railway Engineering, 2006(3):44-46.
- [8] 杨慧林. 北京地铁十号线国贸站桥桩保护设计[J]. 现代隧道技术,2004(S0):415-422.
- YANG HUI-LIN. Bridge pile protection design for Guomao station in Beijing metro line 10 [J]. Modern Tunnel Technology (Supplement), 2004(S0):415-422.
- [9] 宋月光,杨慧林,李涛. 地铁洞桩法施工阶段地下洞室的受力分析[J]. 铁道标准设计,2005(7):97-99.
- SONG YUE-GUANG, YANG HUI-LIN, LI TAO. Structural mechanics analysis metro tunnel constructed with PBA method [J]. Railway Standard Design, 2005(7):97-99.
- [10] 白明洲,许兆义,时静,等. 复杂地质条件下浅埋暗挖地铁车站施工期地面沉降量 FLAC3D 分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S2):4254-4260.
- BAI MING-ZHOU, XU ZHAO-YI, SHI JING, et al. Analysis of ground settlement of a subway station undercut with shallow overburden during construction with FLAC3D under complex geological conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(S2):4254-4260.
- [11] 关金龙,萧潇. 洞桩法施工车站地表沉降的有限差分法分析[J]. 山西建筑,2007,33(5):274-275.
- GUAN JIN-LONG, XIAO XIAO. Finite-difference analysis appliance to shallow buried underground excavated tunnels with the cavern-pile method [J]. Shanxi Architecture, 2007,33(5):274-275.
- [12] 王梦恕. 隧道工程浅埋暗挖法施工要点[J]. 隧道建设,2006,26(5):1-4.
- WANG MENG-SHU. Outline of tunnel construction by means of method of undercutting with shallow overburden [J]. Tunnel Construction, 2006,26(5):1-4.
- [13] 刘新荣,孙辉,陈晓江,等. 黄土连拱隧道二次衬砌的结构分析与监测研究[J]. 岩土工程学报,2005(6):695-697.
- LIU XIN-RONG, SUN HUI, CHEN XIAO-JIANG, et al. Structural analysis and monitoring for secondary lining of doubled arch tunnel in loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005(6):695-697.
- [14] 李日东. 浅埋暗挖地铁车站施工监测技术[J]. 铁道标准设计,2006(7):64-66.
- LI RI-DONG. Monitoring technology for shallow-buried metro station [J]. Railway Standard Design, 2006(7):64-67.
- [15] 李二兵,王镛,王源,等. 城市复杂条件下浅埋大跨双连拱隧道施工变形监测与控制[J]. 岩石力学与工程学报,2007(4):833-839.
- LI ER-BING, WANG DI, WANG YUAN, et al. Monitoring and control of construction deformation of urban shallow-buried large-span double-arch tunnel under complex condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(4):833-839.

(编辑 陈蓉)