

# 四联拱浅埋暗挖隧道施工监测与数值分析

霍润科<sup>1,2</sup>, 周 锋<sup>1</sup>, 伦培元<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘 要:**以哈尔滨地铁四联拱隧道为依托, 采用有限元数值模拟和现场监测数据分析相结合的方法, 对地铁隧道围岩及支护结构的稳定性进行研究, 发现隧道拱底、临时支护拱墙和拱脚处应力较为集中, 且拱脚处的应力变化最大; 竖向位移在拱顶和拱底部位变化较大, 其最大值在掌子面附近; 地表沉降最大值位于上下行线中心位置, 向两边呈逐渐递减分布, 且下行线地表沉降大于上行线; 拱顶沉降和地表沉降符合一般沉降规律, 并对其实测值与计算值的变化规律进行了对比分析。

**关键词:**四联拱隧道; 数值模拟; 监测数据; 地表沉降

**中图分类号:**U 451

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7930(2013)03-0330-06

城市地铁不仅可以缓解交通压力, 而且可以充分利用地下空间资源, 减少环境污染。目前大断面浅埋暗挖法施工技术应用日趋广泛, 这对隧道设计理论、施工技术和施工材料等提出了更高的要求, 如何控制隧道变形是目前研究的主要课题, 为此国内外诸多学者从不同角度对隧道施工技术进行了研究, 并取得了一些重要成果。王应富等<sup>[1]</sup>采用模型试验法对隧道动态施工力学过程进行研究; 孟伶俐等<sup>[2]</sup>采用有限元软件对大断面隧道开挖进行了三维模拟; 万利<sup>[3]</sup>对高速公路隧道施工监测方法进行了较为系统分析, 并提出了施工建议; 张顶立等<sup>[4]</sup>采用理论分析、数值模拟和现场实测等方法, 分析了在不同开挖方法与支护方式条件下围岩的变形和隧道的稳定性; 王梦恕<sup>[5]</sup>对浅埋暗挖隧道的地面变形进行了系统地模拟和分析; 霍润科等<sup>[6]</sup>对黄土隧道初期支护性能进行了分析; 刘彤<sup>[7]</sup>采用有限元软件对双连拱隧道相互影响规律进行了研究, 文献[8-10]主要对隧道施工方法、地表沉降规律即过程控制技术进行了研究。但对于黄土地区大断面浅埋暗挖隧道的研究目前可供借鉴的成果却不多, 相关的理论研究和施工经验尚未成熟, 为此本文利用有限元软件分析了四联拱浅埋暗挖隧道施工对围岩应力和位移的影响, 结合现场监测数据, 得到了地表沉降和拱顶沉降的变化规律。

## 1 工程概况

哈尔滨在建地铁属于哈尔滨市轨道交通一号线一期工程, 四联拱隧道施工里程 K1+374~K1+456.89, 总长 82.89 m, 开挖断面形式分为 H 和 G 两种。断面最大开挖宽度 27.53 m, 高度 8.36 m, 开挖面积超过 100 m<sup>2</sup>, 四联拱隧道最小埋深约为 8.8 m, 与隧道开挖高度基本相当, 地层从上到下依次为: 杂填土、粉质粘土、粉质粘土、粉质粘土、粉质粘土、粉质粘土、粉砂, 四联拱隧道主要穿越粉质粘土层, 底部主要位于此层, 基底承载力满足设计要求, 该段属于 V 类围岩。

## 2 施工方案

大断面浅埋暗挖隧道的施工方法有台阶法、中隔墙法和眼镜法, 根据四联拱隧道实际情况, 采用的施工方法是双侧壁+中导坑法施工, 双侧壁导坑法适用于 V~VI 级围岩双线隧道或多线隧道掘进, 开挖方式、步骤及测点布置见图 1。

四联拱隧道跨度较大、埋深较浅, 且地质条件较复杂, 故需要采用超前小导管和格栅钢架作超前支

收稿日期: 2012-11-01 修改稿日期: 2013-05-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172237); 陕西省教育厅专项基金(11JK0947)

作者简介: 霍润科(1963-), 男, 陕西岐山人, 博士, 教授, 从事隧道及岩土力学教学及科研工作。

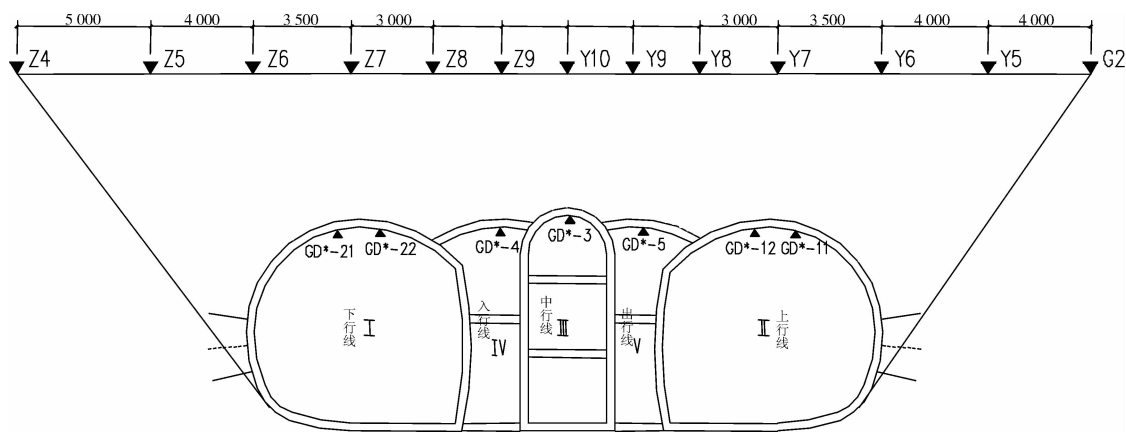


图 1 隧道分部开挖方法及监测点布置示意图(单位:mm)  
Fig. 1 Tunnel partial excavation methods and layout of measurement points(unit: mm)

护.超前小导管用 $\varphi 42$  mm,长 3 m 钢管,环向间距 300 mm,纵向间距 1.5 mm,格栅钢架纵向间距 0.5 m,格栅钢架与初喷混凝土之间铺设双层 $\varphi 6.5$  钢筋网,纵横间距为 150 mm $\times$ 150 mm.

3 数值分析

3.1 模型的建立

3.1.1 基本假定

由于四联拱隧道实际施工过程比较复杂,分析过程中围岩采用 D-P 屈服准则,为此做如下假设:(1)围岩为均匀、连续、各向同性材料;(2)初始应力仅考虑土体自重应力影响;(3)超前小导管和锚杆按加固土模型进行等效,不考虑自身结构作用.

3.1.2 计算模型及边界条件

四联拱隧道模型左右两侧各取 38 m,隧道断面跨度为 24 m,模型总宽为 100 m;模型顶部取至地面,高程为 14.5 m,底部大于断面高度 3 倍,高程为-43.5 m,模型总高为 58 m.模型左右、前后两侧施加水平方向约束,底部为竖直方向约束,上部为自由边界,模型为八节点六面体单元,共有 10 076 个节点,8 960 个单元,划分后的网格如图 2 所示.土体和二次衬砌采用 solid45 单元,初期支护和临时支护采用 shell63 单元.

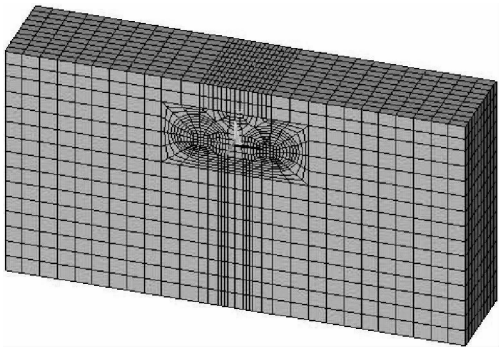


图 2 三维计算模型示意图  
Fig. 2 Three-dimensional calculation model

3.2 材料参数的确定

初期支护采用 C20 钢筋混凝土,厚度为 0.3 m,临时支护采用工字钢支撑,二次衬砌采用 C30 钢筋混凝土,厚度为 0.5 m,格栅钢架和超前小导管采用等效法,各土层及结构的物理力学参数如表 1 所示.

格栅钢架和超前小导管的弹性模量( $E$ )和密度( $\rho$ )采用等效法进行计算,计算公式为:

$$E=E_c+(A_s\times E_s)/A_c \tag{1}$$

$$\rho=\rho_c+(A_s\times \rho_s)/A_c \tag{2}$$

式中: $E$  为等效混凝土弹性模量, $E_c$  为素混凝土弹性模量, $E_s$  为钢材弹性模量, $\rho$  为等效混凝土密度, $\rho_c$  为素混凝土密度, $\rho_s$  为钢材密度, $A_s$  为钢材截面积, $A_c$  为混凝土截面积.

3.3 计算结果分析

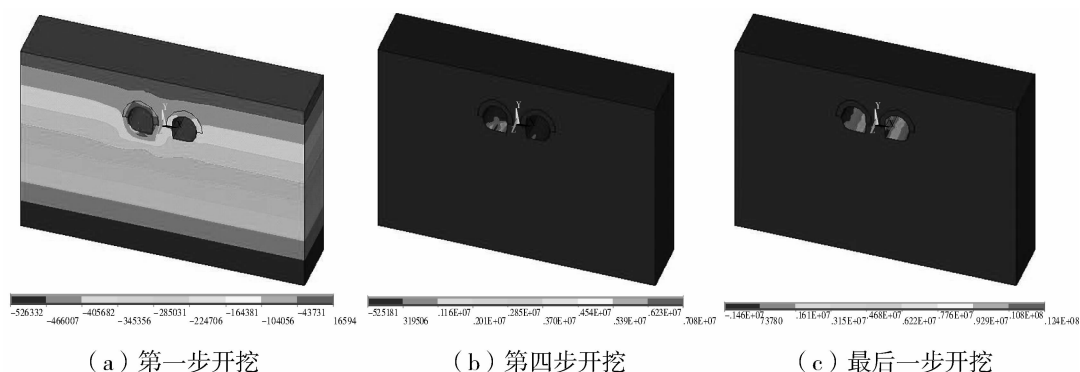
3.3.1 应力分析

隧道开挖引起的围岩和支护结构的大主应力 $\sigma_1$ 如图 3 所示.

表 1 土体与支护结构物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil and supporting structure

土体及结构	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /kg $\cdot$ m <sup>-3</sup>	粘聚力 kPa	内摩擦角 /°
土体	25	0.33	1 903	50	12.75
土体加固区	775	0.30	1 904	60	17.6
初期支护	30 800	0.20	2 660		
临时支护	200 000	0.30	7 850		

图3 大主应力  $\sigma_1$  等值线图Fig. 3 Contour map of the large principal stress  $\sigma_1$ 

由图3可知,隧洞内拱底、临时支护拱墙和拱脚出现应力集中,由于临时支护与拱底交接处呈直角连接,所以该处拱脚应力变化最为明显,第一步开挖后产生的最大应力为0.29 MPa,第四开挖后为0.53 MPa,最后一步开挖后产生的最大应力达到1.46 MPa,随着开挖的推进,应力最大值位置始终在下行线右侧拱脚处,且逐渐向洞内扩展,并紧跟掌子面,由于上下行线的相互影响,上行线拱脚应力变化值略小下行线,变化趋势基本一致.拱墙和拱底的应力变化也相对较大,变化趋势与拱脚相似,从整体上看上下行线应力图呈现一定的对称性.

### 3.3.2 位移分析

隧道开挖引起的围岩竖向位移如图4所示.

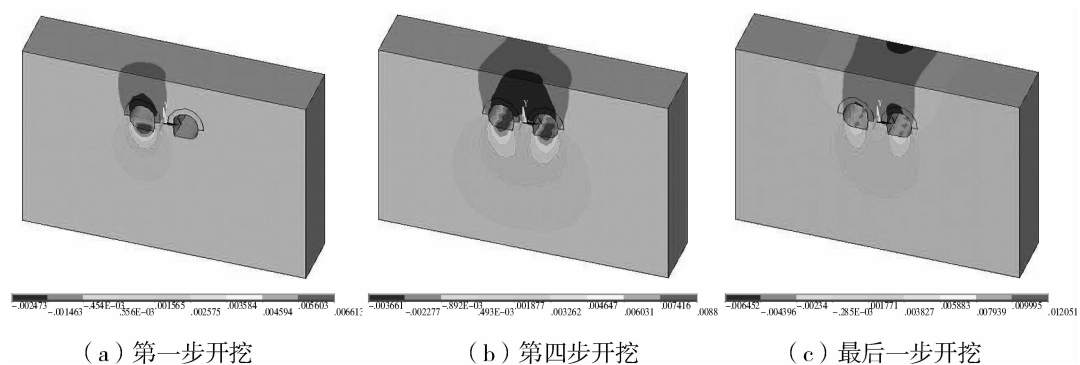


图4 围岩竖直方向位移图

Fig. 4 Vertical displacement of surrounding rock

由图4可知,下行线隧道开挖后,形成了以下行线拱顶中心为最大值的沉降槽,沉降值为2.5 mm,上下行线隧道同时开挖后,上下行线拱顶沉降范围逐渐扩大,并向洞内和中间靠拢,此时沉降最大值位于下行线拱顶中心线部位,其沉降值为3.7 mm,当开挖进行到最后一步后,上下行线拱顶沉降范围贯穿整个隧洞,由于上下行线的相互影响,开挖掌子面附近拱顶沉降呈向中间发展变化明显的趋势,远离掌子面后拱顶沉降有所减弱,此时拱顶沉降最大值位于上行线掌子面中心线位置,其沉降值为6.5 mm.下行线隧道开挖后,洞口出现以拱底为中心的环状隆起槽,隆起最大值为6.6 mm,随着上下行线隧道同时开挖后,拱底沉降范围逐渐向洞内扩展,此时最大隆起值位于下行线且逐渐向拱底中心部位发展,隆起值为8.9 mm,当开挖最后一步时,上下行线拱底隆起范围贯穿整个隧洞,两隧洞在掌子面附近形成了共同的环形隆起槽,此时拱底隆起最大值位于下行线掌子面附近的拱底中心部位,其隆起值为12.1 mm,沉降最大值随掌子面的推进而变化,沉降变化呈现了较强的对称性.

### 3.3.3 初期支护位移分析

隧道开挖引起的支护结构竖向位移如图5所示.

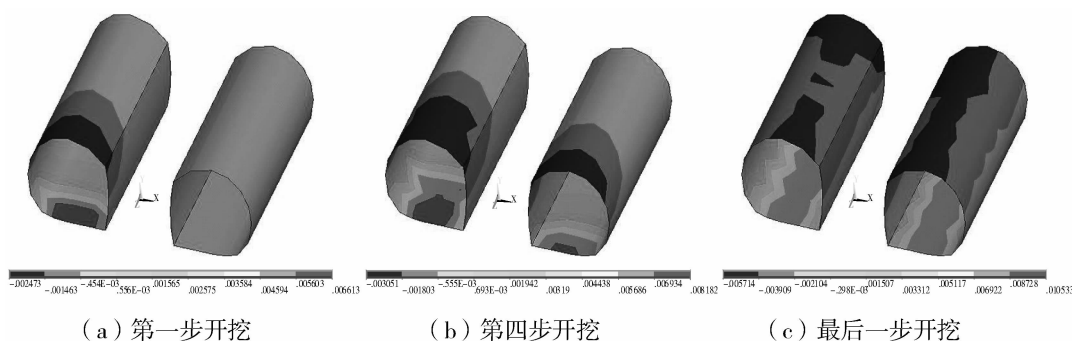


图5 初期支护结构竖直方向位移图

Fig. 5 Vertical displacement of primary supporting structure

由图5可知,随着下行线和上下行线隧道同时开挖,初期支护施作后拱顶沉降和拱底隆起变化与图4变化规律相似,在开挖完成后位移图也呈现较强的对称性,由于支护及时,第一步、第四步和最后开挖完成后,拱顶沉降最大值有所减小,其沉降值分别为2.5 mm、3.1 mm和5.7 mm,拱底隆起最大值也有所减小,其隆起值分别为6.6 mm、8.2 mm和10.5 mm,由此可见尽快封闭全断面或及时施作仰拱可以有效地控制拱顶沉降和拱底隆起。

## 4 监测数据分析

### 4.1 地表沉降分析

根据实测数据,四联拱隧道断面(K1+380)地表各测点沉降变化规律如图6所示,由图可知:(1)四个导洞同时开挖,地层受到扰动较大,形成了以上、下行线中心为沉降最大值的不对称沉降槽;由于上下行线之间相互作用及其影响,下行线地表各测点沉降较上行线略有增大,且上下行线地表沉降出现了较明显的对称性。(2)该断面地表沉降最大点位于下行线中心地表点1380-Z7,其沉降值达到-41.3 mm,其次是上行线中心地表点1380-Y7,其沉降值也达到-38.6 mm。施工期间,由于四联拱隧道出现渗水问题,上下行线中心地表点沉降普遍较大,超过了警戒值(21 mm)。(3)隧道地表沉降呈现规律性变化,在开挖面距掌子面在3倍洞径范围内,开挖时间在一个月以上,地表点沉降量已经完成总沉降量的80%~90%,随后沉降逐渐趋于稳定。

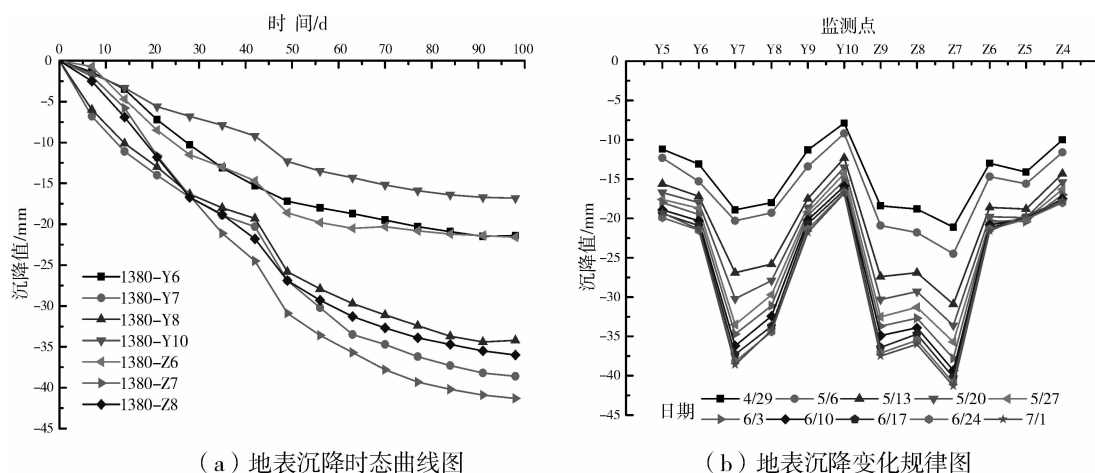


图6 地表沉降变化图

Fig. 6 Variation of surface subsidence

### 4.2 拱顶沉降分析

拱顶沉降变化曲线图如图7所示,由图可知:(1)下行线四个导洞开挖时,左上导洞拱顶沉降偏大,因为左上导洞是最先开挖,会受到地层多次扰动的影响,右上导洞拱顶沉降变化比较稳定。(2)上行线四

个导洞开挖时,右上导洞拱顶沉降偏大,左上导洞拱顶沉降变化相对稳定,由于下行线支护已经施作完成,下行线拱顶受到上行线扰动影响较小。(3)该断面拱顶沉降最大点 GD1380-21,位于下行线左上导洞,沉降量达到 $-17.9$  mm,与此相邻的右上导洞沉降变化也较大,上行线右上导洞拱顶点 GD1380-11 的沉降量达到 $-11.7$  mm,由于下行线隧洞渗水比上行线严重,下行线拱顶沉降大于上行线。(4)拱顶沉降也呈现一定的规律性变化,当开挖离测点有 1 倍洞径范围内时沉降量较大,大于 3 倍洞径之后沉降量明显减小。

## 5 计算值与实测值的对比分析

### 5.1 地表沉降

地表沉降实测值和计算值的数值对比见表 2。

由表 2 可知,实测与计算的地表沉降最大值都位于上下行线中心地表点,但两者差异较大,分析原因可能是四联拱隧道施工期间拱顶上方地层中给排水管道破裂,致使部分水涌出,渗水会对土层性质产生影响,导致地表沉降过大,多数沉降点超过

报警值,后经施工方修复管道,对土层进行注浆后,沉降值逐渐趋于稳定。而有限元计算时,采用土层物理力学参数是按室内自然条件下的试验值取得,会对计算结果产生影响,同时也说明有限元法在计算模型参数选取等方面的研究与实际工程应用之间仍然存在着一定的差距。虽然地表沉降实测值与计算值大小不同,但其变化规律基本趋于一致。

### 5.2 拱顶沉降

拱顶沉降实测值和计算值的数值对比见表 3。

由表 3 可知,下行线 GD\*-21 点实测值最大,与计算值相差较大,GD\*-22 点实测值与计算值相差较小;上行线 GD\*-11 点实测值与计算值相差较大, GD\*-12 点实测值与计算值相差较小,下行线拱顶沉降实测值比上行线偏大,可见下行线渗漏水比上行线严重,拱顶沉降变化趋势与地表沉降基本吻合。

## 6 结 论

(1)通过数值分析表明,大主应力  $\sigma_1$  主要集中在隧洞拱底和临时支护拱墙、拱脚处,且在拱脚部位出现了较大的应力集中,其值在  $0.29 \sim 1.46$  MPa 之间变化。拱墙应力变化值略小于拱脚,变化趋势与拱脚相似,这也是施工过程中需要重点监测的部位。竖向位移在隧道拱顶和拱底表现最为显著,拱顶沉降最大值在  $2.5 \sim 6.5$  mm 之间,拱底隆起最大值在  $6.6 \sim 12.1$  mm 之间,两者随着掌子面推进而变化,由于上下行线的相互影响,隆起最大值始终在下行线隧道内变化。

(2)通过监测 K1+380 断面地表沉降发现,四联拱隧道地表沉降在上下行线中心正上方沉降值最大,距中心线越远沉降值越小,且在隧道开挖两周左右沉降速率较大,二周之后沉降速率变慢,一个月之后沉降基本稳定,由于上下行线地表沉降相互影响,下行线地表沉降量略大于上行线,最大值位于下行线中心地表点,其沉降值分别为 $-41.3$  mm 和 $-38.6$  mm,且上下行线地表沉降槽符合一般沉降规律。

(3)拱顶沉降也呈现一定的规律性变化,当开挖离测点在 1 倍洞径范围内时沉降较大,大于 3 倍洞径后沉降明显减小,当地表沉降过大时,拱顶沉降也有增大的趋势,且拱顶沉降与地表沉降变化规律具有一致性。

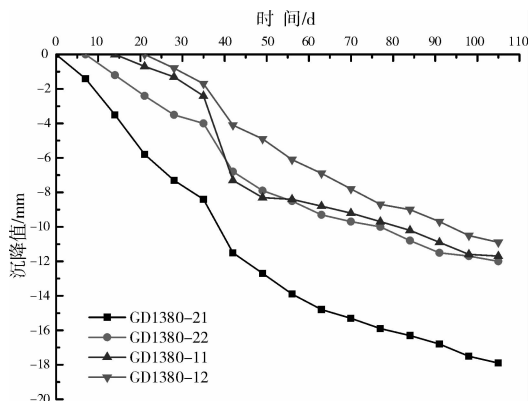


图 7 拱顶沉降变化曲线图

Fig. 7 The curve of vault subsidence

表 2 地表沉降值对比(单位:mm)

Tab. 2 Surface subsidence value comparison mm

点号	-Z6	-Z7	-Z8	-Z9	-Y10	-Y9	-Y8	-Y7	-Y6
实测值	21.6	41.3	36.0	37.5	16.8	21.8	34.2	38.6	21.4
计算值	7.2	13.5	13.0	12.1	11.3	12.0	12.5	13.2	7.9

表 3 拱顶沉降值对比(单位:mm)

Tab. 3 Vault settlement value comparison mm

点号	GD*-21	GD*-22	GD*-12	GD*-11
实测值	17.9	12.0	10.9	11.7
计算值	6.0	6.5	6.1	5.7

## 参考文献 References

- [1] 王应富,蒋树屏,张永兴. 四车道隧道动态施工力学研究[J]. 公路交通科技, 2005(6):134-137.  
WANG Ying-fu,JIANG Shu-ping,ZHANG Yong-xing. Study on the Mechanical Properties of Four-lanes Tunnel During the Construction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2005(6):134-137.
- [2] 孟伶俐,孙 宾,邓 凡. 地铁大断面隧道开挖方法选取三维模拟计算分析[J]. 西部探矿工程, 2006(1):152-153.  
MENG Ling-li,SUN Bin,DENG Fan. Three-dimensional simulation analysis of the large section tunnel excavation methods selection[J]. West-China Exploration Engineering,2006(1):152-153.
- [3] 万 利. 高速公路隧道施工监测技术研究[D]. 西安:长安大学,2005.  
WAN Li. Study on highway tunnel construction monitoring technology[D]. Xi'an:Chang'an University,2005.
- [4] 张顶立,王梦恕,高 军,等. 复杂围岩条件下大跨隧道修建技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(2):290-296.  
ZHANG Ding-li,WANG Meng-shu,GAO Jun,et al. Construction technique of large-span tunnel under condition of complicated surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(2):290-296.
- [5] 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. The general theory of shallow excavation technique of underground engineering [M]. Hefei: Anhui Education Press,2004.
- [6] 霍润科,王艳波,宋战平,等. 黄土隧道初期支护性能分析[J]. 岩土力学,2009,30(2):289-292.  
HUO Rui-ke,WANG Yan-bo,SONG Zhan-ping,et al. Analysis of initial support properties for loess tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(2):289-292.
- [7] 刘 彤. 双连拱隧道施工过程有限元分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2003.  
LIU Tong. Finite element analysis of the double-arch tunnel construction process [D]. Xi'an:Xi'an Univ. of Arch. & Tech. ,2003.
- [8] 张照亮. 隧道施工方法数值模拟分析[J]. 铁道建筑技术,2010,5(2):22-28.  
ZHANG Zhao-liang. Numerical simulation analysis of tunnel construction methods[J]. Railway Construction Technology,2010,5(2):22-28.
- [9] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground, State of the Art Report [A]. Proceeding of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]// Mexico city,1969,37(14):225-290.
- [10] 徐恒国. 大断面隧道浅埋暗挖法施工地层变形规律及过程控制技术[D]. 北京:北京交通大学,2007.  
XU Heng-guo. Stratum deformation and process control of large cross-section tunnel with shallow tunnels construction method[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2007.

## Numerical analysis and construction monitoring of four arch tunnel with shallow-buried excavation

HUO Run-ke<sup>1,2</sup>, ZHOU Feng<sup>1</sup>, LUN Pei-yuan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech. ;2. Key Laboratory  
of Structural Engineering and Earthquake Resistance. Ministry of Education, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Based on the four arch tunnel of Harbin metro, and combining the methods of finite element numerical simulation and field monitoring data analysis, the paper has done some research on the stability of the tunnel surrounding rock and supporting structure, indicating that the stress of arch bottom, temporary support arch wall and arch feet is more concentrated and the greatest change of stress appears in the arch feet and the vertical displacement in the vault and arch bottom changes greatly and its maximum value is in the vicinity of the tunnel face. The maximum of surface subsidence is located on the center of the uplink and downlink and gradually decreasing distribution to both sides, and the surface subsidence of the downlink is greater than the uplink. However, the subsidence of vault and surface comply with the general law of settlement and their variation of the measured and calculated values were compared.

**Key words:** four arch tunnel; numerical simulation; monitoring data; surface subsidence

**Biography:** HUO Run-ke, Professor, Ph. D. , Xi'an 710055, P. R. China, Tel:0086-13609192086, E-mail:huorkdq@xauat.edu.cn