

高速公路偏压隧道施工动态监测 与有限元仿真模拟

王祥秋^{1,2}, 杨林德², 高文华³

(1. 佛山科学技术学院 土建系, 广东 佛山 528000; 2. 同济大学 地下系, 上海 200092;
3. 湖南科技大学 土木系, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 对崇遵高速公路龙井隧道进口段施工过程中现场监测数据以及有限元分析结果进行对比研究, 得出了在偏压作用下隧道施工过程中围岩位移的变化规律。阐述了现场动态监测量测与有限元仿真模拟相结合的方法对实现隧道信息化施工的重要性。

关键词: 隧道工程; 偏压隧道; 动态监测; 有限元模拟; 信息化施工

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)02-0284-06

DYNAMIC MONITORING AND FEM SIMULATION ANALYSIS OF AN EXPRESSWAY TUNNEL WITH UNSYMMETRICAL LOADINGS

WANG Xiang-qiu^{1,2}, YANG Lin-de², GAO Wen-hua¹

(1. Department of Civil Engineering, Foshan University of Science and Technology, Foshan 528000, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Department of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: FEM calculation results and the time series of in-situ measures for the entrance of Longjin tunnel on the Chong-Zun expressway are presented. A FEM model is established to simulate the deformation behaviors of the tunnel. The anchors are simulated with the anchorage elements, while the cement lining and the steel-arc shelf are simulated with the straight beam elements. The results show that the deformation behavior of the surrounding rock mass is controlled by unsymmetrical loadings during the process of construction. It is proposed that not only the in-situ dynamic measurements but also the analysis of FEM be important for successful construction of the tunnel.

Key words: tunnel engineering; unsymmetrical loading tunnel; dynamic monitoring; FEM simulation; information-oriented construction

1 引言

崇遵高速公路龙井隧道位于遵义县板桥镇与泗渡镇交界处, 为双幅四车道隧道。左幅为 ZK88+470 ~ ZK89+645, 全长 1 175.0 m; 右幅为 YK88+535 ~ YK89+630, 全长 1 095.0 m。隧道开挖

界限为: 高 8.0 m, 宽 11.0 m。隧道建筑限界为净宽 10.0 m, 净高 5.0 m。隧道区内地层为寒武系中上统娄山关群第一段, 属于碳酸盐台地沉积。根据地质勘察资料, 隧道区内主要地层由上至下分别为: (1) 第四系残、坡积层, 为黄色、褐黄色、稍湿、硬塑状砂质粘土, 含少量风化白云岩; (2) 娄山关群第一段, 为灰色、深灰色中厚层至薄层状白云岩、泥

收稿日期: 2003-06-10; **修回日期:** 2003-07-25

基金项目: 湖南省学科带头人培养基金; 上海市重点建设研究基金资助项目

作者简介: 王祥秋(1968-), 男, 博士, 现任副教授, 主要从事岩土与地下结构工程方面的教学与研究工作。E-mail: tongji_wxq@163.com.

质白云岩夹角砾状白云岩，细晶结构，裂隙发育；
(3) 高台组，为灰色中厚层状白云岩、泥质白云岩，上部夹薄层状黄色泥质粉砂岩，岩体较完整。隧道穿越的围岩条件比较复杂，涵盖 II~V 类围岩。

由于隧道所穿越的围岩类别多、变化大，而勘探工作的密度有限，使隧道所穿越的实际围岩类别与设计所提供的围岩类别有出入。在隧道开挖与围岩支护等环节中，可能会出现各种不可预见的因素，对施工进度与人员安全造成影响。据报道，在我国隧道工程施工过程中因塌方、不良地质灾害等所造成的财产损失与人员伤亡时有发生，其教训是惨痛的。因此，加强隧道施工全过程的监控量测，实现信息化施工，及时掌握围岩与支护动态，确保隧道施工过程中围岩稳定与支护安全；同时为二次衬砌支护合理时间的选择、验证支护结构型式及支护参数，评价支护结构与施工方法的合理性，并为优化设计参数，调整施工工艺提供最直接、最有效的原始数据至关重要。

考虑到一般地段的监测方法与监测成果的分析与文[1~6]所述大同小异，在此不再赘述。本文主要就龙井隧道进口段围岩受偏压作用情况下，隧道断面开挖过程中，围岩监控量测成果与有限元仿真模拟进行对比研究，以此分析隧道受偏压作用下围岩位移的变化规律。

2 现场监控量测

2.1 监测断面的布设

对于隧道监控量测而言，最直接、最具有代表性的项目为拱顶下沉与周边位移收敛量测^[7]。因此，龙井隧道施工监测主要采用这两种方法，其中拱顶下沉量测是在隧道开挖毛洞的拱顶及轴线左右各 2 m 处设置 3 个带挂钩的膨胀螺钉作为测桩；埋设前先用小型钻机在待测部位成孔，然后将膨胀螺钉拧紧即可。对于稳定性较差的围岩，测桩可在锚喷支护后布置，量测时需用一把长度适宜的钢卷尺，尺端连一个自制的挂钩挂在测点上，稳定后用电子水准仪量测。隧道围岩周边位移量测测点的埋设方法与拱顶下沉相同；对于预设点的断面，在隧道开挖爆破之后，沿隧道周边在拱顶、拱腰和边墙部位分别埋设测桩；拱顶部分的测桩可利用拱顶下沉的测桩；采用钢尺式周边收敛计量测周边收敛变形。

监测断面的间距按交通部有关规范^[8]及合同要求确定。龙井隧道观测断面的间距为 20 m。考虑到围岩条件复杂并受偏压作用，在隧道进出口处监测断面间距适当加密，隧道进出口处连续 3 个监测断面的间距为 10 m。为测试方便，将拱顶下沉与周边收敛位移量测点布设在同一断面上(如图 1 所示)。

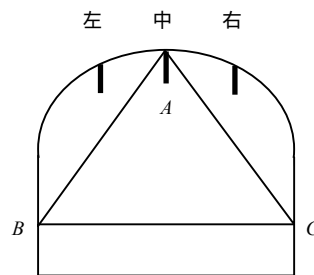


图 1 观测断面测点布置示意图

Fig.1 Distribution of measurement points

2.2 量测数据与分析

通过对龙井隧道左幅进口 ZK88+476 断面进行为期 1 个月的观测，得到拱顶下沉与周边位移收敛数据如表 1, 2 所示，将量测结果绘制成变位曲线如图 2 所示。

由图 2 可知，拱顶下沉曲线与周边收敛位移曲线中均出现两个突变点，即在第 10 d 时拱顶右、中两测点的下沉量与隧道周边 AC 与 BC 两测线的收敛位移量突然增大；此时对应于隧道右侧边墙开挖施工，隧道受偏压作用围岩压力向右侧拱脚转移，导致右侧拱脚围岩产生塑性破坏所致。在第 22 d 时隧

表 1 ZK88+476 断面拱顶下沉监控量测结果
Table 1 Measured settlements at the top of the arch

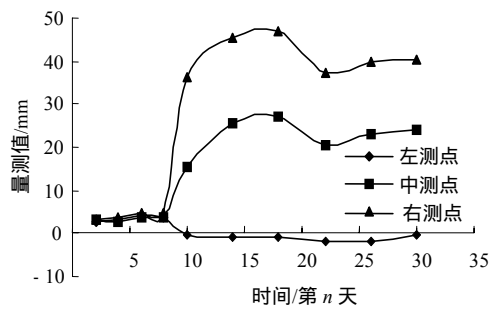
量测时间/第 n 天	开挖步	实测值/mm		
		左	中	右
2	第 1 步	2.8	3.1	3.3
4		3.0	2.6	3.7
6		4.1	3.9	4.8
8	第 2 步	3.8	3.8	4.7
10		- 0.5	15.5	36.4
14		- 1.0	25.5	45.2
18	第 3 步	- 1.1	27.3	47.1
22		- 1.8	20.5	37.2
26		- 2.1	22.8	39.6
30	第 5 步	- 0.4	23.9	40.3

注：围岩类别：III，“-”表示拱顶上升。

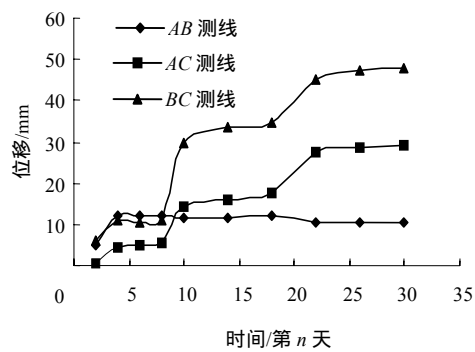
表 2 ZK88+476 周边位移监控量测结果
Table 2 Measured convergence

量测时间/第 n 天	开挖步	实测值/mm		
		AB	AC	BC
2	第 1 步	4.85	0.70	5.88
4		12.19	4.17	10.85
6		12.36	5.18	10.42
8	第 2 步	12.21	5.51	10.82
10		11.45	14.28	29.50
14		11.50	16.20	33.42
18	第 3 步	12.00	17.35	34.56
22		10.36	27.42	45.12
26		10.49	28.45	47.34
30		10.52	29.20	47.80

注：围岩类别：III；测线长度：AB = 7 980 mm，AC = 8 200 mm，BC = 10 430 mm。



(a) 拱顶下沉量测值



(b) 周边收敛位移量测值

图 2 现场监控量测结果

Fig.2 Results of in-situ measurement

道拱顶右、中两测点突然上升，拱顶总下沉量减少；而隧道周边 AC 与 BC 两测线的收敛位移突然增大；原因在于此时正在进行左侧边墙的开挖，破坏了隧道围岩业已形成的稳定平衡，围岩内力发生重分

布。同时由于隧道受偏压作用，围岩压力有向隧道的右侧转移的趋势，但此时隧道右侧边墙已做了喷射混凝土与钢拱架支护，右侧矮墙也已施工完毕，具有一定的支承力；在左右侧压力共同作用下，迫使拱顶上升。值得注意的是在进行左右两侧边墙开挖时，拱顶左测点与 AB 测线的变位受开挖的影响均相对较小，且左侧拱顶始终具有上升的趋势，这都是由于隧道受偏压作用所致。

3 隧道施工的有限元模拟

为了从理论上论证现场监控量测结果的准确性，进一步深入研究隧道受偏压作用时围岩受力与变形规律，以下将根据实际开挖步骤，利用有限元方法对龙井隧道左幅进口段(桩号：ZK88+476 ~ ZK88+486)施工全过程进行动态模拟。

3.1 有限元模型的建立

(1) 基本假设

对有限元分析模型做如下基本假设：将隧道围岩受力与变形视为平面应变问题加以研究；锚杆、钢拱架以及隧道衬砌材料为弹性介质，隧道围岩为弹塑性介质。

(2) 屈服准则

根据隧道围岩的工程地质条件与力学性态，模拟其弹塑性特性时屈服条件宜采用 Drucker-Prager 准则，其表达式为

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (1)$$

式中： I_1 为应力张量的第一不变量； J_2 为应力偏量的第二不变量； α, k 为常数，在平面应变条件下有：

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \\ k &= \frac{\sqrt{3}c \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

采用相关联的流动法则，即塑性势面取为 $g = f$ 。

(3) 隧道衬砌、锚杆与钢拱架的模拟

隧道初次衬砌采用直梁单元、锚杆采用锚杆单元进行模拟^[9, 10]。为简化起见，钢拱架亦采用直梁单元进行模拟。假设局部坐标系下的结点位移为 $\{\bar{\delta}\} = \{\bar{u}_i, \bar{v}_i, \bar{\theta}_i, \bar{u}_j, \bar{v}_j, \bar{\theta}_j\}^T$ ，对应的结点力为 $\{\bar{f}\} = \{\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \bar{M}_i, \bar{X}_j, \bar{Y}_j, \bar{M}_j\}^T$ 。整体坐标系下结

点的位移为 $\{\delta\} = \{u_i, v_i, \theta_i, u_j, v_j, \theta_j\}^T$ ，对应的结点力为 $\{f\} = \{X_i, Y_i, M_i, X_j, Y_j, M_j\}^T$ 。两坐标系的夹角为 β ，直梁单元的长度为 l ，截面面积为 A ，截面惯性矩为 I ，弹性模量为 E 。则有

$$\{\bar{f}\} = [\bar{k}]\{\bar{\delta}\} \quad (3)$$

$$\{f\} = [k]\{\delta\} \quad (4)$$

式中： $[\bar{k}]$ 为局部坐标系下直梁单元的刚度矩阵，则

$[\bar{k}] =$

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$[k]$ 为整体坐标系下直梁单元的刚度矩阵，由坐标变换可得

$$[k] = [T]^T [\bar{k}] [T] \quad (6)$$

式中： $[T]$ 为坐标变换矩阵，且

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将式(5)，(7)代入式(6)得

$$[k] = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_4 & -a_1 & -a_2 & a_4 \\ a_2 & a_3 & a_5 & -a_2 & -a_3 & a_5 \\ a_4 & a_5 & a_6 & -a_4 & -a_5 & \frac{a_6}{2} \\ -a_1 & -a_2 & -a_4 & a_1 & a_2 & -a_4 \\ -a_2 & -a_3 & -a_5 & a_2 & a_3 & -a_5 \\ a_4 & a_5 & \frac{a_6}{2} & -a_4 & -a_5 & a_6 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中，

$$a_1 = \frac{EA}{l} \cos^2 \beta + \frac{12EI}{l^3} \sin^2 \beta$$

$$a_2 = \left(\frac{EA}{l} - \frac{12EI}{l^3} \right) \cos \beta \sin \beta$$

$$a_3 = \frac{EA}{l} \sin^2 \beta + \frac{12EI}{l^2} \cos^2 \beta$$

$$a_4 = -\frac{6EI}{l^2} \sin \beta$$

$$a_5 = \frac{6EI}{l^2} \cos \beta ; a_6 = \frac{4EI}{l}$$

(4) 分析步骤

根据上述有限元模型，对隧道各施工步按如下步骤进行计算：

对每次施加的增量荷载 $\{\Delta F_0\}_i$ 首先按弹性状态进行计算，得出各单元的应力增量 $\{\Delta \sigma\}_i$ 与位移增量 $\{\Delta u\}_i$ 。

将求得的单元应力增量和位移增量与施加增量荷载前单元的应力与位移分别迭加，得

$$\{u\}_i = \{u\}_{i-1} + \{\Delta u\}_i$$

$$\{\sigma\}_i = \{\sigma\}_{i-1} + \{\Delta \sigma\}_i$$

将各单元中的过量塑性应变，通过弹塑性矩阵转换为等效过量应力 $\{\Delta \sigma'_0\}_{i+1}$ ，将其作为附加荷载向量再次进行迭代计算，并对 $\{\sigma\}_i$ 进行调整。

根据 $\{\Delta \sigma'_0\}_{i+1}$ 求出等效节点力 $\{\Delta F_0\}_{i+1}$ ，并在 $\{\Delta F_0\}_{i+1}$ 作用下重复步骤 ~ 直至收敛到所需的精度为止。

3.2 动态施工模拟

利用上述有限元模型，对龙井隧道左幅进口段根据实际施工步骤对其进行有限元动态施工模拟。

(1) 隧道断面施工步骤

整个隧道断面划分为 5 个开挖步进行施工(如图 3 所示)。第 1 步：开挖拱顶部分岩体并对其进行锚喷网加钢拱架支护；第 2 步：开挖下部台阶；第 3 步：开挖右侧边墙岩体和进行边墙锚喷网加钢拱架支护以及矮墙施工；第 4 步：开挖左侧边墙岩体和进行边墙的锚喷网加钢拱架支护以及矮墙施工；第 5 步：开挖仰拱部分岩体并进行仰拱混凝土浇注。

(2) 有限元计算与分析

根据提供的地质资料，龙井隧道进口段围岩从上至下分别为第四系黄色、褐黄色砂质粘土，含少量风化白云岩；深灰色中厚层至薄层状白云岩、泥质白云岩夹角砾状白云岩，灰色中厚层状白云岩、泥质白云岩。计算区域上边界取至地表，左右部及下部边界取为离隧道外缘周边约为 50 m；已知边界

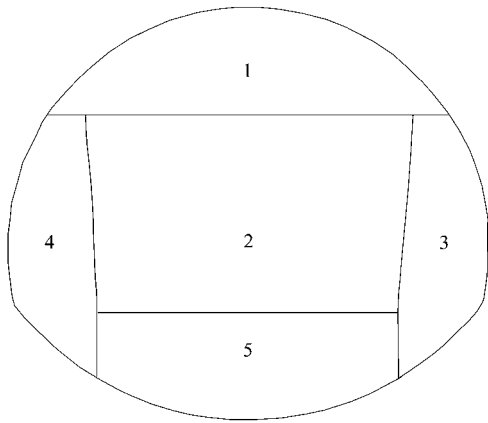


图 3 隧道开挖步骤示意图
Fig.3 The construction steps of tunnel

条件均取为位移约束，其中上部为自由边界，左右为水平位移约束边界，下部为竖直位移约束边界。所划分的有限元计算网格如图 4 所示，围岩及支护材料的力学参数如表 3 所示。各开挖步拱顶测点的位移量如表 4 所示。隧道开挖终了时围岩塑性屈服区分布如图 5 所示，各主要开挖步围岩的变位规律如图 6 所示。

从计算结果可以看出，各开挖步拱顶竖直位移以及隧道围岩的变位规律与监控量测结果相吻合。

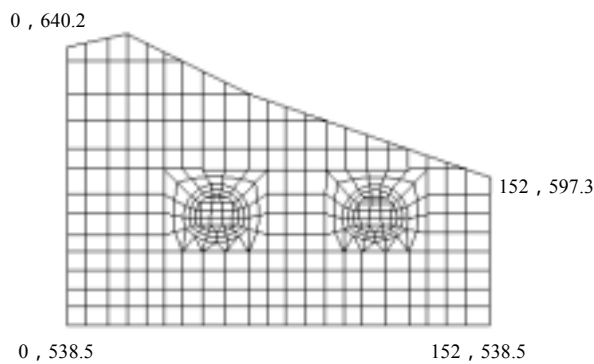


图 4 有限元计算网格
Fig.4 The FEM mesh for calculation

表 3 材料力学参数

Table 3 Mechanical parameters of the materials

材料类型	弹性模量 /MPa	泊松比	容重 /kN · m ⁻³	粘聚力 /MPa	内摩擦角 / (°)	抗拉强度 /MPa
砂质粘土	200	0.31	18.5	0.050	36	0.0
白云岩	2 000	0.42	20.0	2.00	72	0.05
混凝土喷层	25 500	0.20	25.0	2.50	38	1.50
锚杆	210 000	—	78.0	—	—	—
钢拱架	280 000	—	78.0	—	—	—

表 4 拱顶各测点竖向位移计算值

Table 4 Calculation values of vertical displacement of arc points

开挖步	计算值/mm		
	左	中	右
第 1 步	2.80	2.6	3.1
第 2 步	3.60	3.8	4.2
第 3 步	- 1.00	25.3	45.5
第 4 步	- 1.60	20.7	36.6
第 5 步	- 0.35	23.9	36.9

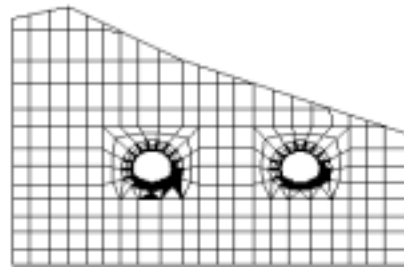
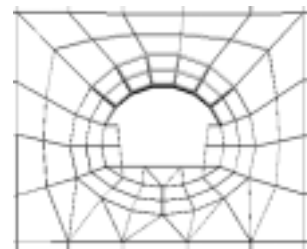
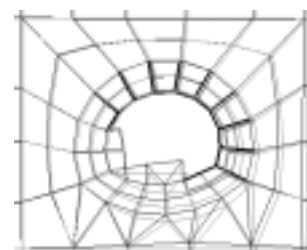


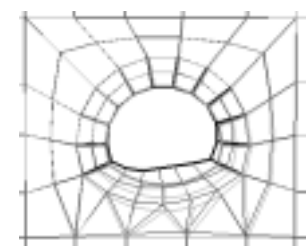
图 5 围岩塑性屈服区分布图
Fig.5 Distributions of plasticity zones in the surrounding rock mass



(a) 第 2 开挖步



(b) 第 3 开挖步



(c) 第 4 开挖步

图 6 各开挖步隧道变位示意图

Fig.6 The deformations of tunnel with construction steps

即当隧道开挖至第3步(右侧边墙开挖),监测工作进行到第10d时拱顶右、中两测点的下沉量与隧道周边AC与BC两测线的收敛位移突然增大;而当开挖至第4步(左侧边墙开挖),监测工作进行到第22d时拱顶右、中两测点突然上升,拱顶总下沉量突然减少,隧道周边AC与BC两测线的收敛位移突然增大;而拱顶左测点与AB测线的变位受开挖步的影响均较小,且左侧拱顶始终具有上升的趋势;同样从有限元分析结果可知第5开挖步(即仰拱开挖)对隧道拱顶下沉与周边收敛位移的影响不大。这些规律与隧道施工过程中围岩表现出来的变位规律完全一致。

值得一提的是在右侧边墙开挖时(开挖工作面距离隧道进口处11.5m),边墙钻孔爆破之后,右侧拱顶24h下沉量为21.4mm,远远超过隧道变形监控量测标准所规定的允许量值,同时在隧道进口处右侧初衬与围岩之间发现宽约15mm的缝隙,并沿隧道初衬由底部向拱顶方向发展。通过对监测数据进行分析,并会同施工、监理各方对施工现场进行综合研究,认为围岩受开挖爆破以及偏压作用等因素的影响,处于急剧变位状态。必须暂停施工,更改施工步骤与爆破方案,否则可能产生塌方事故。由于监控量测工作的细致以及数据分析及时准确,成功的杜绝了一次塌方事故的发生,得到了施工单位与监理单位的认可。

综上所述,充分说明采用现场监控量测工作与有限元仿真模拟相结合的分析方法在指导隧道施工过程中是行之有效的。

4 结 论

(1) 与一般地段相比较,偏压隧道施工过程中围岩变位受开挖步的影响更大。在进行现场监控量测工作时应密切注意各种监控信息的变化,及时进行分析研究找出其内在原因,并及时反馈给施工与监理单位;以便于及时发现问题和解决问题,以免造成重大安全事故。

(2) 采用有限元方法对施工全过程进行仿真模拟,可以预先掌握隧道开挖过程中围岩的变位规律,以便于监控量测工作中有针对性的制订相应的监测方案,对可能发生的不良现象做到心中有数。

参考文献(References):

- [1] 王忠勋. 隧道围岩变形监控量测的实践[J]. 铁道建筑, 2000, (2): 7-10.(Wang Zhongxun. Monitoring practice on the surrounding rock deformation of tunnel[J]. Railway Construction, 2000, (2): 7-10.(in Chinese))
- [2] 朱永全, 景诗庭, 张清. 时间序列分析在隧道施工监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(4): 353-359.(Zhu Yongquan, Jing Shiting, Zhang Qing. Application of time series analysis method to measured displacement in tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(4): 353-359.(in Chinese))
- [3] 王彦武. 太旧高速公路北茹隧道围岩变形监测[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 148-152.(Wang Yanwu. Monitoring the surrounding rock deformation in the Beiru tunnel of Taijiu expressway[J]. Chinese Journal of rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 148-152.(in Chinese))
- [4] 刘文德, 韦国民. 京珠高速公路坪石隧道施工监控量测[J]. 铁道建筑技术, 2000, (4): 22-25.(Liu Wende, Wei Guoming. Construction monitoring on the Pingshi tunnel of Jingzhu expressway[J]. Railway Construction Technology, 2000, (4): 22-25.(in Chinese))
- [5] 周欣, 刘洪洲, 姜德义. 中梁山隧道围岩变形监测与影响因素分析[J]. 公路, 1994, (10): 23-24.(Zhou Xin, Liu Hongzhou, Jiang Deyi. Monitoring and analysis for influence factors of the surrounding rock deformation in the zhong Liangshan tunnel[J]. Highway, 1994, (10): 23-24.(in Chinese))
- [6] 徐林生. 公路隧道围岩变形监测及应用[J]. 公路隧道, 2000, (2): 1-6.(Wu Linsheng. Deformation monitoring and application of highway tunnel[J]. Highway Tunnel, 2000, (2): 1-6.(in Chinese))
- [7] 黄成光. 公路隧道施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.(Huang Chengguang. Construction of Highway Tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.(in Chinese))
- [8] 中华人民共和国行业标准编写组. 《公路隧道施工技术规范》(JTJ042-94)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.(The Professional Standards Compile Group of People's Republic of China. Technical Specifications for Construction of Highway Tunnel(JTJ042-94)[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.(in Chinese))
- [9] 朱合华. 同济曙光软件使用说明书[R]. 上海: 同济大学, 2000. 17-18.(Zhu Hehua. Specifications for the GeoFBA2D of Tongji[R]. Shanghai: Tongji University, 2000. 17-18.(in Chinese))
- [10] 王祥秋, 杨林德, 高文华等. 含软弱夹层层状围岩地下洞室非线性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 729-732.(Wang Xiangqiu, Yang Linde, Gao Wenhua. 2-D nonlinear FEM analysis for underground openings located in the layered rock mass with softening joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 729-732.(in Chinese))