

文章编号:1000-582X(2004)02-0132-04

## 高速公路隧道新奥法施工监控量测\*

代高飞<sup>1,2</sup>, 应松<sup>3</sup>, 夏才初<sup>1</sup>, 毛海和<sup>2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030; 3. 贵州省高速公路开发总公司, 贵阳 550001)

**摘要:**隧道采用新奥法原理施工时, 利用围岩周边变形和拱顶下沉量的观测值可对隧道周边岩体内的应力动态过程及发展趋势、围岩稳定性以及支护的合理性进行监控, 这对安全施工及保证工程质量具有重要作用。通过对崇遵高速公路风梅垭隧道的实时监控, 研究了隧道围岩的稳定状况, 实时确定了合理的二次衬砌施工时间, 成功避免了施工中重大事故的发生, 确保了隧道施工安全和质量, 对隧道施工具有指导意义。

**关键词:**公路隧道; 量测; 监控; 预警值

**中图分类号:**U456

**文献标识码:**A

隧道施工过程中围岩的力学性态不仅受到岩石的生成条件和地质作用的影响, 还受到隧道开挖方法、支护类型、支护时机、支护参数等的影响, 因而寻求正确反映岩体性态的物理力学模型是非常困难的<sup>[1-2]</sup>。而在隧道设计、施工中主要参考工程类比法与数理初步分析法, 通过施工过程对围岩的实时监控, 对监控数据进行分析 and 综合判断, 进一步完善设计并采取相应的施工对策, 其中, 监控工作及监控量测结果分析就成为衡量设计、施工是否合理的一项重要工作<sup>[3]</sup>。贵州省崇(崇溪河)遵(遵义)高速公路是重庆出海大通道的控制性工程, 位于典型的喀斯特地区, 在隧道施工中经常遭遇塌方、涌水等地质灾害, 严重时会造成设备损坏等重大事故, 造成巨大的经济损失。该线路高差起伏大, 隧道穿越围岩类别较多, 且岩性变化频繁。风梅垭隧道位于崇遵高速公路起点, 属分离式路基段, 设置为接近平行的双洞, 隧道单洞长 2 740m, 主要穿越围岩类别为 II、III、IV 类, 主要地质构造为 F3、F5 和 F7 断层及其破碎带。同时, 节理裂隙发育, 地下水丰富, 因此, 实时监控具有重要意义。通过施工监控可进行信息反馈及预测预报, 优化设计, 指导现场施工, 确保隧道施工安全与质量, 提高工程的社会、经济和环境效

益。同时, 施工监控及时提供信息, 为节省工程投资, 提高公路隧道在岩溶地区的修建水平, 提供了科学依据和技术保证。

### 1 隧道施工监控设计

监控量测工作是为了掌握围岩动态和支护结构工作状态, 利用量测结果检验设计的合理性并指导施工, 预见险情及事故, 防患于未然。同时, 为确保隧道安全提供可靠信息, 为相似工程提供参考, 并为进一步进行深入的理论研究提供原始依据。隧道施工监控设计依据中华人民共和国行业标准《公路隧道设计规范》(JTJ026—90)和《公路隧道施工技术规范》(JTJ042—94)。隧道实时监控的主要内容为围岩周边位移量、拱顶下沉量、地质与支护状况观察、锚杆内力及拉拔力、围岩体内位移(洞内设点)量测、围岩压力及两层支护间压力、山体边坡稳定监测、地质超前预报。笔者着重于围岩周边位移量和拱顶下沉量的监控, 同时参考其它监测内容。

#### 1.1 拱顶下沉

拱顶下沉主要用于确认围岩的稳定性。在每个量测断面的拱部等间距埋设三个自制的钢筋预埋件。埋

\* 收稿日期:2003-10-25

基金项目:高等学校重点实验室访问学者基金资助;中国博士后科学基金资助项目

作者简介:代高飞(1974-),男,重庆市人,重庆大学博士,同济大学博士后,主要从事岩土工程的研究。

设前,先用小型钻机在待测部位成孔,然后将预埋件放入,并用混凝土填塞,待混凝土凝固后即可量测。量测时需用一把长度适宜的钢卷尺,尺端连一个自制挂钩,挂在测点上,将尺子铅垂放下,稳定后用水准仪量测<sup>[4]</sup>。拱顶下沉量为:

$$\Delta h = h_{i-1} - h_i$$

第  $n$  天量测的总下沉量为:

$$h_n = \sum_{i=1}^n \Delta h$$

$h_i$  为第  $i$  次量测的拱顶下沉量(mm)。

### 1.2 围岩周边位移量测

位移量测线与拱顶下沉测点布置在同一断面。埋设测点时,先在测点处用凿岩机开挖直径为 40~80 mm,深为 25 mm 的孔,在孔中填满水泥砂浆后插入收敛预埋件,尽量使两预埋件轴线在基线方向上,并使预埋件销孔轴线处于铅垂位置,上好保护帽,待砂浆凝固后即可量测。各测线相邻 2 次测量的收敛值为:

$$\Delta U_i = R_{i-1} - R_i$$

第  $n$  次测量的总收敛值为:

$$U_n = \sum_{i=1}^n \Delta U_i$$

$R_i$  为第  $i$  次量测的位移量(mm)。

### 1.3 监测频率和监测次数

根据《公路隧道施工技术规范》(JTJ042—94),围岩周边位移和拱顶下沉等监测项目的监测频度与监测次数如表 1<sup>[1-2]</sup>。

表 1 监测项目的监测频度与监测次数

频度	1~15 天	16 天~1 个月	1~3 个月	大于 3 个月
次数	1~2 次/天	1 次/2 天	1~2 次/周	1~3 次/月

## 2 风梅垭隧道围岩的工作状态判定

在施工监测过程中,针对风梅垭隧道的工程条件,如围岩地层、埋深、隧道断面、支护、施工方法等,建立一些判断标准来直接根据量测结果判断围岩的稳定性和支护系统的工作状态,可以作为调整支护参数和采取相应的施工技术措施的依据,根据《公路隧道施工技术规范》(JTJ042—94)和《风梅垭隧道勘察设计资料》,建立监测点如图 1,确定隧道围岩监测断面间距如表 2,隧道监控变形速率预警参考值如表 3,隧道周边允许相对收敛参考值如表 4。根据量测数据对围岩稳定性和支护系统的工作条件进行判断的准则为<sup>[3]</sup>:

表 2 监测断面间距 m

围岩类别	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类
监测断面间距	5~10	10~20	20~50	50~100

表 3 隧道监控变形速率预警参考值

变形速率 /mm·d <sup>-1</sup>	测量断面距掌子 面的距离/m	测量频率
>10	(0~1)B	1~2 次/d
10~5	(1~2)B	1 次/d
5~1	(2~5)B	1 次/d
<1	>5B	1 次/d

表 4 隧道周边允许相对收敛参考值 %

围岩类别	上覆岩层厚度/m		
	<50	50~300	300~500
Ⅳ	0.1~0.3	0.2~0.5	0.4~1.2
Ⅲ	0.15~0.5	0.4~1.2	0.8~2.0
Ⅱ	0.2~0.8	0.6~1.6	1.0~3.0

说明:1) B 为隧道开挖宽度;2) 相对收敛参考值指位移实测值与隧道开挖宽度之比;3) 脆性围岩取表中较小值,塑性围岩取表中较大值;4) I、V、VI 类围岩按照工程类比选定允许值范围。

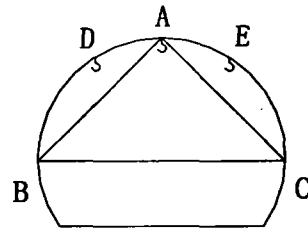


图 1 监控断面测点布置示意图

1) 根据围岩位移量值或预计最终位移值与位移临界值对比来判断,位移临界值的确定需根据具体工程具体确定,风梅垭隧道围岩变形管理措施如表 5。

表 5 隧道围岩变形管理措施

措施等级	变形位移	采取措施
Ⅲ	$U_0 < U_n/3$	可正常施工
Ⅱ	$U_n/3 < U_0 < (2U_n/3)$	可加强支护
Ⅰ	$U_0 > (2U_n/3)$	采取特殊措施

说明: $U_0$  为变形实测值; $U_n$  为允许变形值。

2) 根据位移速率来判断,日本《新奥法设计施工技术指南草案》提出当位移速率大于 20 mm/d 时,就需要特别支护,二次支护时间可以根据位移变化的速率达到某一给定值进行施工(即围岩变形基本稳定)。风梅垭隧道二次支护时间根据围岩周边位移量和拱顶下沉量连续 15 天的变化量及位移-时间曲线判定<sup>[3]</sup>。

### 3) 位移-时间曲线<sup>[2]</sup>

根据现场量测的位移-时间曲线进行如下判断:

①  $\frac{d^2u}{dt^2} < 0$  说明变形速率不断下降,位移趋于

稳定;

- ②  $\frac{d^2u}{dt^2} = 0$  变形速率保持不变, 经发出警告, 及时加强支护系统;
- ③  $\frac{d^2u}{dt^2} > 0$  则表示已进入危险状态, 须立即停工, 采取有效的工程措施进行加固。

图2~5为风梅垭隧道围岩周边位移量和拱顶下沉量的变化速率和总量值曲线。根据图4的各组数据作回归分析, 求得残差平方和最佳拟合曲线, 即时态方

程  $U=f(t)$ , 求其一阶导数得相应的变形速率方程, 如表6所示。因此, 只需代入考察的时间  $t_i$  即可得相应的瞬时变形速率, 但须获得足够的数据后才可能计算分析, 该法适合于中远期预测预报。根据回归方程计算变形速率, 得到  $U < 0$ , 即围岩变形速率在减小, 说明围岩在在逐渐稳定, 因此应该在12月11日及时施工二次衬砌。其他监控断面得到大量围岩稳定的类似结果, 但其最终变形量、变形速率和回归方程不同。

表6 隧道围岩变形速率回归方程及判定

拱顶下沉点	变形速率回归方程	相关系数	变形加速度	加速度判断
A	$U = 5.672 2e^{-0.015 4t}$	0.933 2	$U = -0.087 4e^{-0.015 4t}$	$U < 0$
D	$U = 5.297 7e^{-0.012 5t}$	0.912 4	$U = -0.066 2e^{-0.012 5t}$	$U < 0$
E	$U = 6.216 7e^{-0.013 8t}$	0.943 5	$U = -0.085 8e^{-0.013 8t}$	$U < 0$

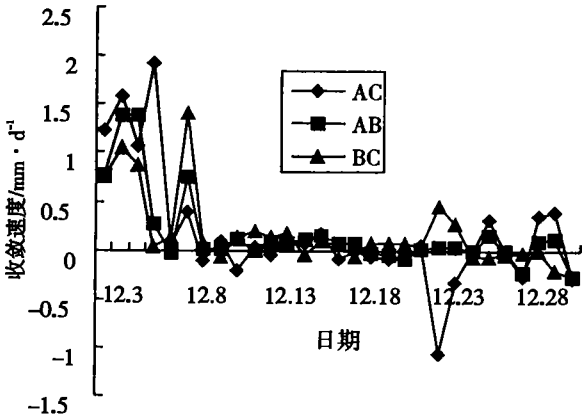


图2 风梅垭隧道右线 K3 + 258 断面收敛速度

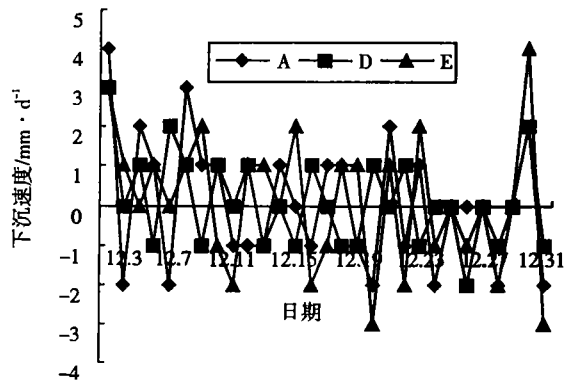


图4 风梅垭隧道右线 K3 + 258 断面下沉速度值

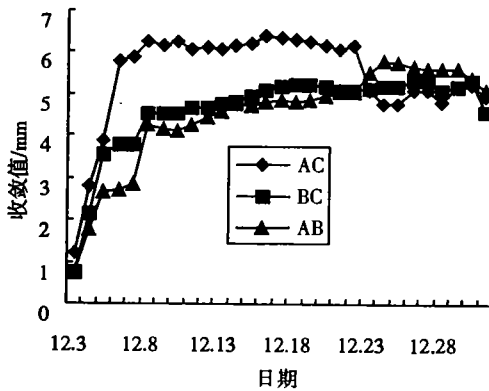


图3 风梅垭隧道右线 K3 + 258 断面累计收敛值

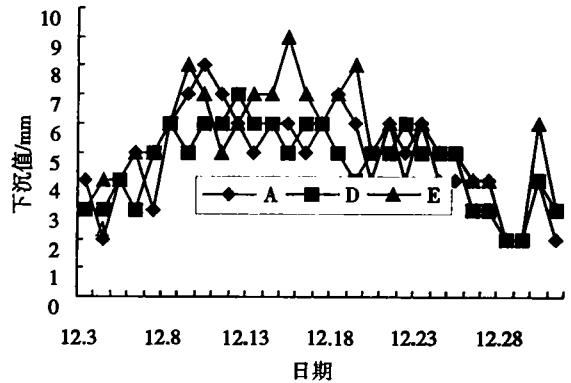


图5 风梅垭隧道右线 K3 + 258 断面下沉累计值

围岩类别不同, 其物理力学性质差异也较大, 围岩的稳定性及变形特征也必然不同。根据实际围岩收敛数据的统计结果可知: 围岩类别越高, 其变形量、最大变形速率和基本稳定时间就越小。这与风梅垭隧道围岩自身性质密切相关, 也与支护结构及施工工艺有关。如II类围岩, 若开挖进度放慢, 且初期支护加强或提早

进行二次衬砌施工, 都会使其量值较通常值偏小。隧道开挖后, 围岩即由一次应力状态变为二次应力状态, 此时围岩的应力、位移视围岩强度不同可能处于弹性、塑性或松弛状态。由于风梅垭隧道处于喀斯特地形区, 假定岩体的内聚力及内摩擦角不变, 据莫尔-库仑准则, 塑性区围岩变形在一定的岩体条件、隧道形态及原岩应力条件下, 主要取决于支护抗力, 其值越大, 位

移就越小。对隧道而言,支护刚度过大或支护时间过早,会使支护承受过大的载荷,而支护强度过低或支护时间过迟会使围岩产生过大位移,造成松动破坏区扩大,降低围岩的自承载能力,同样会使支护受载过大,甚至出现失稳垮落现象。因此,合理的支护抗力应满足:

$$P_{i\max} > P_i > P_{i\min}$$

或围岩位移应满足:

$$U_0 < U < U_1$$

其中:  $P_{i\max}$ ,  $U_1$ —最大支护抗力及对应的变形量;

$P_{i\min}$ ,  $U_0$ —隧道不失稳的最小支护抗力及对应的变形量。

由于典型断面 K3 + 258 位于风梅垭隧道的Ⅲ类围岩地区,风梅垭隧道开挖宽度为 11 m,典型断面 K3 + 258 的围岩周边收敛最大速率为 2 mm/d,且在隧道开挖后两天出现,其后收敛速率迅速趋于平稳,低于门槛值;累计收敛量为 6.5 mm,拱顶下沉最大速率为 4 mm/d,累计下沉量为 9 mm,均小于相应的门槛值,说明隧道围岩运动是平稳的<sup>[4-5]</sup>。结合图 2~5,可将风梅垭隧道围岩变形过程分为显著变形期(12.3~12.9)、缓慢变形期(12.9~12.27)和微小变形期(12.27~)。因此,用新奥法指导施工时,应适当允许并控制围岩周边的变形量,合理选择初期支护结构及刚度,在恰当的时机构筑二次衬砌,才能确保支护构筑物的安全、围岩的完整性及稳定性,使设计与施工更经济合理。为此,在施工期间将观测所得围岩周边变形量与该类围岩允许最大变形量相比较,若接近门槛值,预示围岩有可能出现大的松动破坏或垮塌,应立即对支护补强;若大于门槛值时,围岩一般已发生松动破坏,且支护正承受过大载荷或已发生破坏;对明显小于门槛值的情况则应视具体条件分析,有可能是支护刚度偏大,也可能是因施工方法的原因造成大断面开挖前已释放了相当的位移量,还有可能是因围岩本身是脆性岩石,破坏前变形量本身就小,在一定的支护作用下导致变形量较小。一般认为,小于门槛值时,围岩基本上是稳定的,但不排除例外,如破碎硬岩失稳时的变形值比相应的门槛值小得多<sup>[6]</sup>。风梅垭隧道则属于后者。在正常开挖掘进中,与开挖后总位移相比,工作面初始位移是很小的。

从观测数据分析可知,各类围岩中拱顶下沉值和侧墙收敛值相对较小,证明隧道开挖后拱部和侧墙岩体活动相对较平稳;初期最大变形速率及最终变形量也有类似规律,表明围岩的完整坚固性越好,其变形值就越小,达到完全稳定所需时间就越短。为使量测信息反馈及时,以指导工程,采用近几日相关值及变化趋势预测围岩稳定性及支护安全性。并且及时对测量数

据作回归分析,以预计未来发展及最终变形位置。为检验其可靠性,在现场仍坚持收敛量测和其它相关项目量测,测出最终变形值,并与门槛值比较,以作辅助判断<sup>[5-6]</sup>。

### 3 结论

隧道施工过程中围岩的力学动态是极其复杂的,在设计、施工中参照施工监控所得的信息,进行数据分析和综合判断,从而完善设计并采取相应的施工对策。本文通过对风梅垭隧道的实时监控,从隧道拱顶下沉量和周边收敛 2 个参数出发,研究了隧道围岩的稳定状况,得到以下主要结论:

1) 建立了风梅垭隧道施工监控的隧道监控变形速率预警参考值、隧道周边允许相对收敛参考值、隧道围岩变形管理措施和隧道围岩变形速率判定,对监控指标的判定和施工具有指导作用,同时为相似工作提供了参考。

2) 经实测与研究认为,用拱顶下沉量和周边收敛可实现对隧道内空变形的良好监测,量测数据反映的规律能较合理地代表围岩变形过程及发展趋势。

3) 据围岩变形速率值可将围岩变形过程分为显著变形期、缓慢变形期和微小变形期。

4) 据量测数据计算所得最佳拟合回归方程,可估算围岩最终变形量,并结合量测所得总收敛值与周边允许变形值相比较作辅助判断,借以检验支护工作状态及围岩稳定性。

5) 风梅垭隧道最佳二次衬砌时机应在围岩产生适量变形并在发生松动破坏之前,即尽量在围岩变形过程中的微小变形期。

6) 隧道围岩变形量及变形速率受多种因素的综合影响,量测数据的可靠性及精度取决于仪器结构、量测技术及误差修正技术。

### 参考文献:

- [1] 夏才初,李永盛. 地下工程测试理论与监测技术[M]. 上海:同济大学出版社,1999.
- [2] 夏才初,潘国荣. 土木工程监测技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [3] 王建宇. 隧道工程监测和信息化设计原理[M]. 北京:中国铁道出版社,1990.
- [4] 单奇,边泽强. OPC 技术在隧道监控系统中的应用[J]. 交通科技,2002,(6):63-67.
- [5] 高波,赵玉米. 岩质高边坡偏压隧道洞口段施工现场监控量测与地质灾害预报[J]. 地质灾害与环境保护,2002,13(3):32-36.
- [6] 宋颖华. 高速公路隧道监控系统的方案设计[J]. 东北公路,2000,23(3):80-83.

(下转第 166 页)

- [6] JOHANSEN S. Statistical Analysis of Cointegration Vectors [J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 1988, 12, 231 - 254.
- [7] ORAZIO P, ATTANASIO, LUCIO PICCI, et al. Saving, Growth and Investment: A Macroeconomic Analysis Using A Panel of Countries [J]. *The Review of Economics and Statistics*, 2000, 82(2): 182 - 211.
- [8] PRADEEP AGRAWAL. The Relation between Savings and Growth: Cointegration and Causality Evidence from Asia [J]. *Applied Economics*, 2001, 33: 499 - 513.

## The Analysis of Interrelations Between Regional Economic Growth and Savings

HU Yong-ping, ZHANG Zong-yi

(College of Economic & Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The interrelations between the regional economic growth and savings are analyzed by using Johansen cointegration test and Granger causality test based on error correction model. The results show that the economic growing is one of the main factors that raise the amount of saving but don't increase the saving growth rate in all three regions. Also the increase of saving could result in the eastern and western region's economic growth to some extent, but it doesn't affect the central region's economic growth. Therefore, some actions which drive the economic growth have to be taken in order to raise the saving, and the increase of the saving scale have to be controlled to improve the regional economic growth.

**Key words:** regional savings; regional economic growth; johansen cointegration test; error correction function; Granger causality test

(编辑 刘道芬)

(上接第 135 页)

## The Monitor Measuring of Highway Tunnel in Natm

DAI Gao-fei<sup>1,2</sup>, YING Shong<sup>3</sup>, XIA Cai-chu<sup>1</sup>, MAO Hai-he<sup>1</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. The Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resources & the Environmental Hazards Control Engineering, Under the State Ministry of Education, Chongqing university, Chongqing 400030, China;

3. Guizhou Province Express Development General Corporation, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** It is important that monitor measuring is applied in tunnel in regard to NATM. The monitor measuring of NATM was studied in the Fengmeiya Tunnel in Chongzun Express. Based on the regularity and conditions of the surrounding rock deformation of monitor measuring in site, the optimum time for primary and permanent support are obtained which averting successfully accidents in construction, enhancing the construction qualities and guidance to tunnel construction in Karst areas.

**Key words:** highway tunnel; measuring; monitor; threshold

(编辑 姚 飞)