

# 基于现场监控量测的隧道围岩稳定性分析

姚杨

(凤凰县交通建设质量安全监督管理所, 湖南 凤凰 416200)

**摘要:** 结合湖南凤凰凤木公路南华山隧道工程, 介绍了隧道监控量测的方法及监测数据的处理分析方法; 以该隧道 K5+300 断面为例, 通过对周边位移量测数据的处理、回归建模, 得出了围岩变形的时间效应, 为评价和预测隧道围岩稳定性及二次衬砌施工时机提供指导。

**关键词:** 隧道; 监控量测; 围岩稳定性; 周边位移; 回归分析

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0191-03

新奥法是隧道施工中运用最广泛的方法, 其利用锚杆和喷射砼等形成的喷锚支护体系作为主要初期支护控制围岩的变形, 使围岩应力得到释放, 在围岩变形和初期支护的共同作用下使围岩应力重新分布, 进而达到新的平衡, 使围岩成为支护体系的组成部分, 以最大限度地保持围岩的固有强度和利用其自承能力。监控量测是隧道新奥法施工的重要环节, 通过监控量测, 可及时掌握各施工阶段围岩的力学形态变化, 从而判断围岩的稳定性及支护、衬砌结构的可靠性, 用以指导现场施工并进行信息化反馈优化设计, 为修改施工方法、围岩级别变更、初期支护和二次衬砌参数调整提供依据, 同时可预见事故和险情, 以便及时采取措施, 防患于未然。

## 1 工程概况

南华山隧道位于凤凰县沱江镇土桥村南华山地质公园地界内, 起讫里程为 K4+725—K5+560, 全长 835 m。隧道区主要属于构造侵蚀剥蚀低山—丘陵地貌, 地形起伏较大, 相对高差达 140 m。隧道位于新华夏系第三隆起带雪峰山二级隆起带西侧、武陵山及雪峰山弧形褶皱带之间、湘西断褶皱构造盆地内, 主要构造形迹有褶皱、断裂。其中 K5+300 断面处于Ⅲ级围岩段, 该段围岩多为中风化冰碛含砾砂岩夹少量板岩、板岩, 整体为软质岩, 遇水易软化崩解, 岩体较完整、较破碎, 节理裂隙多为较发育、局部不发育, 岩层产状较陡, 层间接合一般, 围岩稳定性一般。

## 2 监控量测方法

### 2.1 测点布设

监控量测内容根据隧道设计文件、地质状况、支

护类型及参数、围岩类别(级别)、开挖方法等确定。对南华山隧道主要进行洞内外观察、拱顶下沉与周边位移、地表沉降等必测项目的量测。按照 JTG F60—2009《公路隧道施工技术规范》, 必测项目的量测间距一般为 20~50 m, 浅埋地段、特别软弱地段不大于 20 m, 监测断面间距按表 1 确定。

表 1 监控断面的纵向间距

围岩级别	断面纵向间距/m	围岩级别	断面纵向间距/m
V 级	5~10	Ⅲ级	20~30
Ⅳ级	10~20	Ⅱ级	30~50

周边位移量测测线布置根据施工方法确定, 采用全断面开挖法时布置 1 条水平测线; 采用台阶法时, 根据围岩情况, 一般地段每台阶布置 1 条水平测线, 特殊地段在拱腰和边墙部位各设 1 条水平测线、2 条斜测线。拱顶下沉测点原则上设置在拱顶轴线附近并与周边位移测点布置在同一断面上, 当隧道跨度较大时, 可根据施工情况合理布置, 适当在拱部增设测点。该隧道净空收敛、地表沉降测点布设见图 1。测点在喷锚支护施工完成 3 h 内且尽可能在距离开挖面 2 m 范围内埋设, 并采集初始数据, 测点的初始读数一般在开挖后 12 h 内、下一循环开挖前完成。

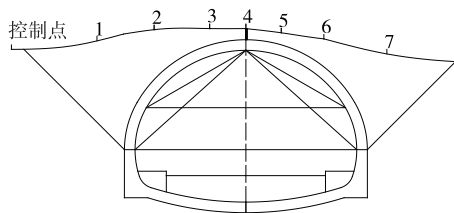


图 1 净空收敛和地表沉降测点布置

浅埋地段地表沉降观测点和洞内测点布置在同一里程断面且在隧道开挖前完成,地表下沉测点的布置范围根据隧道埋置深度和开挖宽度而定,地表下沉量测断面间距按表2确定。

表2 地表沉降量测断面间距布置标准

隧道埋深 $H$	量测断面的间距/m
$H > 2B$	20~50
$B < H < 2B$	10~20
$H < B$	5~10

注:  $B$  为隧道开挖宽度。

## 2.2 量测频率

各项量的量测频率根据测点与开挖面的距离及位移速度确定,取两者中的大值作为实施的量测频率。在初期支护阶段或地质条件较差或位移下沉量及速度较大时,宜适当增大监控量测频率。该隧道净空收敛量测频率见表3。

表3 隧道净空收敛量测频率

位移速度/ (mm · d <sup>-1</sup> )	测量断面与掌 子面的距离	测量频率
≥5	(0~1) $B$	2次/d
1~5	(1~2) $B$	1次/d
0.2~1	(2~5) $B$	1次/(3 d)
<0.2	>5 $B$	1次/(7 d)

## 3 回归分析

根据测量数据的时态曲线可掌握围岩和支护结构的受力及变形特性,并初步判断围岩变形是否稳定。受多种因素的影响,现场测得的原始数据不可避免地存在一定的离散性和波动性,变化曲线不规则,难以判断,必须对所测数据进行必要的数学处理及分析。

目前量测数据分析处理主要采用回归分析法,使用指数函数、对数函数、双曲函数中最合适的一种来模拟围岩的变形情况,以此预测隧道施工中围岩变形的最终值和各阶段的变化速率。指数函数的表达式如下:

$$u = ae^{-b/t} \quad (1)$$

对数函数的表达式如下:

$$u = a + \frac{b}{\ln(1+t)} \quad (2)$$

双曲函数的表达式如下:

$$u = \frac{t}{a+bt} \quad (3)$$

式中:  $u$  为位移值(mm);  $a$ 、 $b$  为回归常数;  $t$  为初读数后的时间。

对式(1)两边同时取对数,得:

$$\ln u = \ln a - \frac{b}{t} \quad (4)$$

令  $Y = \ln u$ ,  $A = \ln a$ ,  $B = b$ ,  $X = -1/t$ , 代入式(4),将指数函数转换为如下线性方程:

$$Y = A + BX \quad (5)$$

式(5)中系数  $A$ 、 $B$  可用最小二乘法计算得到:

$$A = \bar{Y} - B\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n Y - B \sum_{i=1}^n X}{n} \quad (6)$$

$$B = \frac{\overline{XY} - \bar{X}\bar{Y}}{\overline{X^2} - \bar{X}^2} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n XY - \sum_{i=1}^n X \sum_{i=1}^n Y}{n \cdot \sum_{i=1}^n X^2 - (\sum_{i=1}^n X)^2} \quad (7)$$

从而得到  $a = e^A$ ,  $b = B$ ,  $u = e^{A-B/t}$ 。

用同样的方法可得到对数函数  $u = A + B/\ln(1+t)$ , 双曲函数  $u = t/(B+At)$ 。

对现场量测数据进行回归计算分析,可得到曲线方程的相关系数  $r$ ,通过对比,选用3个函数中回归精度(拟合程度)最高的函数推算最终位移,所选曲线函数的相关系数  $r$  的绝对值应大于0.9。 $r$  按式(8)确定。

$$r = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n XY - \sum_{i=1}^n X \sum_{i=1}^n Y}{\sqrt{[n \cdot \sum_{i=1}^n X^2 - (\sum_{i=1}^n X)^2][n \cdot \sum_{i=1}^n Y^2 - (\sum_{i=1}^n Y)^2]}} \quad (8)$$

## 4 数据分析及应用

### 4.1 现场实测数据分析

该隧道的净空收敛量测数据较多,仅选其中较为典型的 K5+300 断面的监测数据(见表4)进行回归分析。

根据表4所示实测数据,得到 K5+300 监测断面的净空收敛累计变化曲线(见图2)。从图2可看出: K5+300 断面的净空收敛变形主要经历了3个阶段,即前7 d 的快速增长阶段、由缓增到趋稳的阶段、变形趋于稳定的阶段,说明围岩变形已趋于稳定,可进行二次衬砌施工。

表 4 K5+300 断面的净空收敛累计值

时间/d	累计收敛值/mm	时间/d	累计收敛值/mm
1	1.82	11	3.88
2	2.60	12	3.91
3	3.18	13	3.91
4	3.45	14	3.91
5	3.50	15	3.94
6	3.58	16	3.98
7	3.71	17	4.00
8	3.75	18	4.05
9	3.80	19	4.16
10	3.94	20	4.20

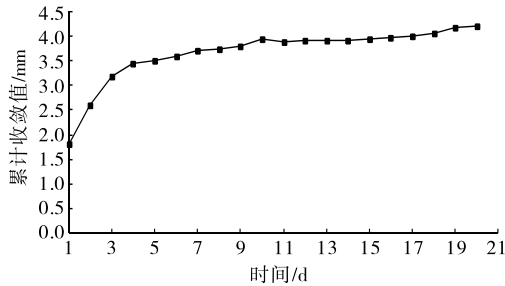


图 2 K5+300 监测断面的净空收敛实测曲线

4.2 数据回归分析

根据现场所测数据绘制时态曲线,当该时态曲线由缓慢增加变为平稳时,对数据进行数学处理和回归分析,以掌握位移随时间的变化规律并推算最终位移。

对表 4 所示实测数据进行回归分析,数据拟合根据上述公式采用最小二乘法进行,即数据的最佳函数匹配通过最小化误差的平方和来实现,通过软件计算得到回归方程及相关系数(见表 5)。

表 5 净空收敛回归分析结果

函数类型	回归方程	相关系数 $r$
指数函数	$u = e^{1.44 - 0.86/t}$	0.994 7
对数函数	$u = 4.737 - \frac{2.107}{\ln(1+t)}$	0.992 0
双曲函数	$u = \frac{t}{0.313\ 2 + 0.226\ 3t}$	0.995 6

3 个方程中相关系数最大的为双曲函数,说明其回归精度最高,故选用双曲函数作为回归函数模

型进行拟合,结果见图 3。

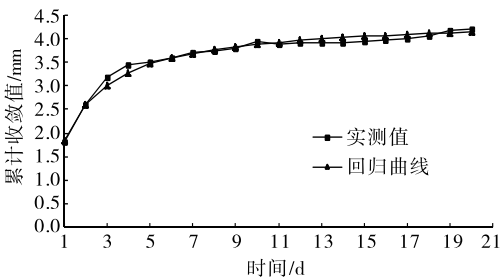


图 3 净空收敛实测曲线与回归曲线对比

4.3 拟合结果分析

依据 JTG F60—2009《公路隧道施工技术规范》,满足以下条件时即可进行二次衬砌施工:1) 各量测项目的位移速率明显收敛;2) 产生的各项变形已达到预计总变形量的 80%~90%;3) 周边位移速率小于 0.1~0.2 mm/d 或拱顶下沉速率小于 0.07~0.15 mm/d。

对双曲函数的回归方程求极限,得到 K5+300 断面净空收敛的最终位移值为:

$$u_{\max} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t}{0.313\ 2 + 0.226\ 3t} = 4.42\ \text{mm}$$

K5+300 断面 20 d 时周边位移收敛度为 4.2/4.42=95%,且收敛速度已小于 0.2 mm/d,判断支护参数选取较为合理,围岩变形已基本稳定,可进行二次衬砌施工。

5 结语

该文结合工程实例,利用最小二乘法对量测数据进行回归分析,根据回归曲线判断围岩的稳定性并预测围岩变形。该工程 K5+300 断面回归分析结果表明,周边位移在刚开挖时变化显著,然后缓增到趋稳阶段,最后趋于稳定,初步判定围岩变形已基本稳定。对回归方程求极限以预测围岩的最大变形值,在第 20 d 时周边位移总量已达 90% 以上,满足进行二次衬砌施工的要求。

隧道监测结果是判断围岩稳定性的重要依据,通过对实测结果与数值模拟结果的对比分析可判断围岩的稳定状态,据此进行相应处理,为隧道施工提供安全保障,并大大提高施工效率。

参考文献:

[1] 密士文,龚书林.隧道监控量测的数据处理及分析[J].中国西部科技,2010(1).

分别增加 1 745、1 182、237、110 元左右;限界宽度每增加 0.75 m, V、IV、III、II 级围岩段平均每延米造价分别增加 2 349、1 412、291、168 元左右;限界宽度每增加 1 m, V、IV、III、II 级围岩段平均每延米造价分别增加 3 039、1 835、440、217 元左右。隧道暗洞工程每延米造价随着断面尺寸的增加而增加,在两车道隧道建筑限界高度、支护参数等均不改变的情况下,限界宽度每增加 1 m,每延米造价(仅包含暗洞开挖、初期支护及二次衬砌)增加 1.32%~5.14%, V、IV、III、II 级围岩段平均分别增加约 5.14%、4.19%、2.51%、1.32%。

上述研究结论能为高速公路投资决策提供参考依据。但该文关于断面变化对高速公路隧道工程造价的影响分析还存在一定不足,主要表现在数据样本偏小,只能局部反映样本断面变化对高速公路隧道工程造价的影响,不能代表整个高速公路隧道工程的实际情况,还需在更加完备、多样化的样本环境中进一步验证。

#### 参考文献:

- [1] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S].
- [2] JTG/T B06—02—2007,公路工程预算定额[S].
- [3] JTG B06—2007,公路工程基本建设项目概算预算编制办法[S].
- [4] 李鹏飞.围岩级别分类对高速公路隧道造价的影响[J].黑龙江交通科技,2012(11).
- [5] 邹颖,武志涛.不同断面下电缆隧道造价及影响因素分析[J].电网技术,2011(11).
- [6] 白伟,姚红志,胡小勇.地形偏压隧道判定方法及设计施工措施[J].筑路机械与施工机械化,2016(3).
- [7] 袁淑香,张言华.隧道施工涌水处理方案及技术经济分析[J].铁路工程造价管理,2013(1).
- [8] 陈文辉,秦峰,陈贵华.小净距隧道、连拱隧道、普通分离式隧道造价对比分析[J].公路交通技术,2005(6).
- [9] 谢琪.隧道横断面设计及其标准化问题的思考[J].福建建筑,2006(1).

收稿日期:2016—10—12

\*\*\*\*\*

(上接第 143 页)

部截面一定距离之后全部受压。

(2) 距离承压中心竖向一定距离内,纵向上的正应力表现为先受拉后受压,并且存在一个压应力最大的点。

(3) 上下缘正应力最终都会达到稳定值,达到稳定值的起始点距离承压端不止 1 倍梁高,即局部承压对构件的应力影响远不只是一般所认为的 1 倍梁高范围内。

#### 参考文献:

- [1] 徐芝纶.弹性力学简明教程[M].第三版.北京:高等教育出版社,2011.

- [2] 刘鸿文.材料力学[M].第四版.北京:高等教育出版社,2004.
- [3] 叶见曙,李国平.结构设计原理[M].第二版.北京:人民交通出版社,2005.
- [4] 郝文化.ANSYS 土木工程应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [5] 梁杰.大跨度预应力混凝土连续箱梁桥设计的应力计算方法的研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [6] 王新敏.ANSYS 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [7] 袁国勇.ANSYS 网格划分方法的分析[J].现代机械,2009(6).

收稿日期:2016—06—22

\*\*\*\*\*

(上接第 193 页)

- [2] JTG F60—2009,公路隧道施工技术规范[S].
- [3] 李晓红.隧道新奥法及其量测技术[M].北京:科学出版社,2002.
- [4] 乔志超,周建春.隧道围岩变形监测及分析[J].施工技术,2012,41(8).
- [5] 肖涛.高速公路隧道施工监控量测技术研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [6] 贡永峰,唐格.隧道围岩收敛变形监测及稳定性研究[J].中外公路,2015,35(3).

- [7] 李品钰.隧道现场施工监控量测数据分析中回归模型的选择与优化[D].长沙:长沙理工大学,2012.
- [8] 陈凯江.隧道施工监控量测及数据反分析技术研究[D].北京:北京工业大学,2013.
- [9] 万利.高速公路隧道施工监测技术研究[D].西安:长安大学,2006.
- [10] 王岚.高等级公路隧道施工及监控技术研究[D].长沙:湖南大学,2003.

收稿日期:2016—08—29