

# 铁路隧道监控量测技术研究

李洛川, 戴飞

(中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610065)

**摘要:** 依托在建的川藏铁路成雅段金鸡关2#隧道, 对铁路隧道的监控量测变形数据进行了分析。选取隧道具有代表性的断面, 对其周边收敛及拱顶沉降监测数据采用对数模型、指数模型、倒数模型、多项式模型等进行回归分析, 以最优的回归分析模型实时反映隧道围岩变形情况, 用以指导现场施工。

**关键词:** 铁路隧道; 监控量测; 技术研究; 川藏铁路成雅段

**中图分类号:** U215.7; U212.2; [U25]

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2017)增2-0064-05

## 1 概述

随着经济发展和技术进步, 特别是西部大开发战略和扩大内需战略的实施, 使我国的铁路隧道建设以前所未有的速度向前发展。现阶段, 国内隧道施工主要采用新奥法, 新奥法注重设计施工和监控量测相结合, 使隧道施工处于动态管理体系之下。但新奥法仅提出了一些合理的原则, 如何将这些原则进行合理应用, 及时、准确地掌握围岩运动信息用以指导施工, 就必须进行监控量测。因此, 监控量测工作在隧道的施工过程中就占据了十分重要的地位。所谓监控量测, 就是在隧道开挖过程中使用各种仪器仪表和量测元件对地表沉降、围岩变形、应力和应变进行量测。著名岩石力学专家缪勒(L. MULLER)指出:“岩土工程特别是在隧道工程中变形量测的重要性尚未被大多数人所认识, 其重要性犹如对钢结构和混凝土结构进行的静力学计算一样”<sup>[1]</sup>。

笔者依托在建的川藏铁路成雅段金鸡关2#隧道, 对铁路隧道的监控量测变形数据进行了分析, 以选择最优的方案, 确保监控量测精确、实时地反映隧道围岩的变形情况。

金鸡关2#隧道位于四川省雅安雨城区, 全长1 739 m, 为双线隧道。隧道区的下伏基岩主要为泥岩, 等级为IV、V级, 根据对沿线试验资料进行的统计, 其残积黏土的自由膨胀率约为35%~50%, 泥岩的自由膨胀率约为20%~32%, 膨胀力约为140~150 kPa, 泥岩以及泥岩的残积黏土层具有弱膨胀性, 遇水易软化、崩解, 失水收缩、开裂。

收稿日期: 2017-06-27

基于隧道区的地质勘察情况, 该隧道监控量测的主要内容包括: 超深炮孔、地质素描、拱顶沉降监测、周边收敛监测、地表沉降监测。笔者选取拱顶沉降及周边收敛监测数据进行了分析。

## 2 金鸡关2#隧道监控量测方案的设计

周边位移和拱顶沉降是隧道监控量测的重要内容, 其量测数据能直观、准确地反映围岩及支护结构的当前状态, 并且对围岩位移有一个量化指标。通过所量测的数据, 能够判断隧道变形量的动态变化, 并依此对施工方法和支护措施的合理性做出评价。

### 2.1 测点布置

在隧道周边的拱顶、拱腰和边墙部位分别埋设测桩, 测点布置情况见图1。采用防爆钻机钻

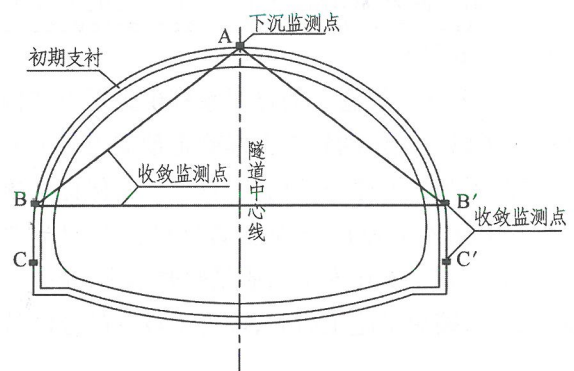


图1 周边收敛及拱顶沉降测点布置图

直径10 mm的小孔, 钉入带挂钩的膨胀螺丝作为测点, 埋设深度应大于10 cm, 在测桩上粘贴反光贴片。量测断面间距一般为10~30 m, 但对于洞口、浅埋地段、特殊地层段其间距可调整为每5~50 m。

表 1 净空位移、拱顶下沉测点间距表

围 岩	条 件			
	洞口附近	埋深小于 2 b	施工进展 200 m 前	施工进展 200 m 后
硬岩地层(断层破碎带除外)	10	10	20	30
软岩地层(不产生很大的塑性地压)	10	10	20	30
软岩(产生很大的塑性地压)	10	10	20	30
土 砂	10	10	10~20	20

注:b为隧道开挖宽度。

2.2 量测内容及方法

采用收敛计量测净空收敛变形。每天基线应重复测 3 次并取其平均值,当 3 次量测数据极差大于 0.05 mm 时,应重新测试。收敛值是指两测点在某一时间内距离的变化量,收敛速率是指单位时间内两测点的距离变化值。设  $T_1$  时的观测值为  $L_1$ ,  $T_2$  时为  $L_2$ ,则收敛值与收敛速度公式为:

$$\Delta L = L_1 - L_2 \quad (1)$$

$$v(t) = \Delta L / \Delta t (\Delta t = T_2 - T_1) \quad (2)$$

量测  $n$  次后得到的收敛总量为:

$$L_n = \sum_{i=1}^n \Delta H_i \quad (3)$$

采用全站仪量测拱顶沉降值,通过测点不同时刻的相对高程,求出量测的差值,即为该点的下沉值。量测 3 次,取平均值。设  $T_1$  时的观测值为  $H_1$ ,  $T_2$  时为  $H_2$ ,则拱顶沉降与沉降速率公式为:

$$\Delta H = H_1 - H_2 \quad (4)$$

$$v(t) = \Delta H / \Delta t (\Delta t = T_1 - T_2) \quad (5)$$

量测  $n$  次后得到的沉降总量为:

$$H_n = \sum_{i=1}^n \Delta H_i \quad (6)$$

2.3 控制基准及管理基准

依据相关标准及金鸡关 2#隧道施工设计图,监测采用的极限相对位移如表 2 所示。

表 2 监测采用的极限相对位移表

围岩级别	净空变化 /%	拱顶下沉 /%
IV	0.1~0.3	0.06~0.1
V	0.2~0.5	0.08~0.16

(1) 依据监测位移的变化速率进行判断,一般开挖后前几天的位移变化速率最大,如果其变化速率连续 3 d 超过 5 mm/d,则其被称之为急剧变化情况,需要持续并加大监测频率;当位移变化速率小于 0.2 mm/d,则表明其趋于稳定。

(2) 依据位移—时间动态图进行判断,正常情况下,位移变化或围岩变化不会长时间急剧

增大,如果出现这种情况,必然是围岩稳定性及支护结构稳定性出现异常,必须采取紧急施工支护措施防止情况的恶化;当位移时间图趋于平缓时,表明围岩与支护结构已达到新的平衡。

(3) 位移控制基准。

根据监控量测结果,按变形管理等级指导施工。位移和工程安全性管理等级分别见表 3、4。

表 3 监测位移控制标准表

项目	距开挖面 1B( $U_{1B}$ )	距开挖面 1B( $U_{2B}$ )	距开挖面 较远
可变化值	65% $U_0$	90% $U_0$	100% $U_0$

注:其中 B 为隧道宽度;  $U_0$  为最大允许相对位移。

表 4 监测位移管理等级表

管理等级	距开挖面 1B	距开挖面 2B
III	$U < U_1 B / 3$	$U < U_2 B / 3$
II	$U_1 B / 3 \leq U \leq 2 U_1 B / 3$	$U_2 B / 3 \leq U \leq 2 U_2 B / 3$
I	$U > 2 U_1 B / 3$	$U > 2 U_2 B / 3$

3 金鸡关 2#隧道监控量测数据分析

3.1 数据采集

以金鸡关 2#隧道 D3K135 + 560 断面监控量测数据为例,原始数据见表 4、5、6,监测时间为 2016 年。

3.2 监控量测数据回归分析模型

在实际工程中,对监控量测数据进行了回归分析,常用的函数有对数函数、指数函数、倒数函数、三次函数,其表达式如下:

对数函数模型:

$$y = a \ln x + b \quad (7)$$

指数函数模型:

$$y = a x^b \quad (8)$$

倒数函数模型:

$$y = a + b / x \quad (9)$$

多项式函数模型:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + \dots + b_m x^m \quad (10)$$

式中  $y$  为变形量,mm;  $a, b_m$  为回归常数( $m = 0,$



表5 D3K135+560断面(上台阶)周边收敛监测数据表

编号	日期	测点间距/cm	净空收敛值/mm	累计收敛值/mm	速率/mm·d <sup>-1</sup>
1	11-13	1 365.994	0	0	0
2	11-14	1 365.634	3.6	3.6	3.6
3	11-15	1 365.217	4.17	7.77	4.17
4	11-16	1 364.759	4.58	12.35	4.58
5	11-17	1 364.632	1.27	13.62	1.27
6	11-18	1 364.575	0.57	14.19	0.57
7	11-19	1 364.427	1.48	15.67	1.48
8	11-20	1 364.362	0.65	16.32	0.65
9	11-21	1 364.236	1.26	17.58	1.26
10	11-22	1 364.172	0.64	18.22	0.64
11	11-23	1 364.143	0.29	18.51	0.29
12	11-24	1 364.102	0.41	18.92	0.41
13	11-25	1 364.087	0.15	19.07	0.15
14	11-26	1 364.093	-0.06	19.01	-0.06
15	11-27	1 364.074	0.19	19.20	0.19
16	11-28	1 364.065	0.09	19.29	0.09
17	11-29	1 364.058	0.07	19.36	0.07
18	11-30	1 364.054	0.04	19.4	0.04
19	12-1	1 364.053	0.01	19.41	0.01
20	12-2	1 364.05	0.03	19.44	0.03

表6 D3K135+560断面拱顶下沉监测数据表

编号	日期	测点高程/m	净空沉降值/mm	累计沉降值/mm	速率/mm·d <sup>-1</sup>
1	11-13	615.054 1	0	0	0
2	11-14	615.048 2	5.9	5.9	5.9
3	11-15	615.044 7	3.5	9.4	3.5
4	11-16	615.041 9	2.8	12.2	2.8
5	11-17	615.040 1	1.8	14	1.8
6	11-18	615.038 8	1.3	15.3	1.3
7	11-19	615.037 1	1.7	17	1.7
8	11-20	615.036 2	0.9	17.9	0.9
9	11-21	615.035 4	0.8	18.7	0.8
10	11-22	615.034 8	0.6	19.3	0.6
11	11-23	615.034 3	0.5	19.8	0.5
12	11-24	615.033 2	1.1	20.9	1.1
13	11-25	615.031 9	1.3	22.2	1.3
14	11-26	615.031 9	0	22.2	0
15	11-27	615.031 8	0.1	22.3	0.1
16	11-28	615.032	-0.2	22.1	-0.2
17	11-29	615.031 9	0.1	22.2	0.1
18	11-30	615.031 8	0.1	22.3	0.1
19	12-1	615.031 7	0.1	22.4	0.1
20	12-2	615.031 7	0	22.4	0

1,2,3...); $x$ 为初读后测点读数时间。

根据拟合曲线的决定系数 $R^2$ 选择最优回归函数。

### 3.3 回归分析及变形预测

#### 3.3.1 周边收敛回归分析及预测

以表5中的基础数据为依据,对其分别进行了对数模型、指数模型、倒数模型、多项式模型等回归分析,得到以下回归方程(表7)。

表7 3D3K135+560断面(上台阶)周边收敛回归方程表

回归函数	回归方程	决定系数 $R^2$
对数函数	$y = 5.3115 \ln x + 5.3671$	0.9472
指数函数	$y = 5.733x^{0.4772}$	0.8404
倒数函数	$y = -18.595/x + 19.837$	0.9211
三次函数	$y = 0.0043x^3 - 0.218x^2 + 3.4602x + 1.8537$	0.9591

将以上四条回归拟合曲线与实测点曲线用MATLAB软件表现在同一坐标轴中(图2)。

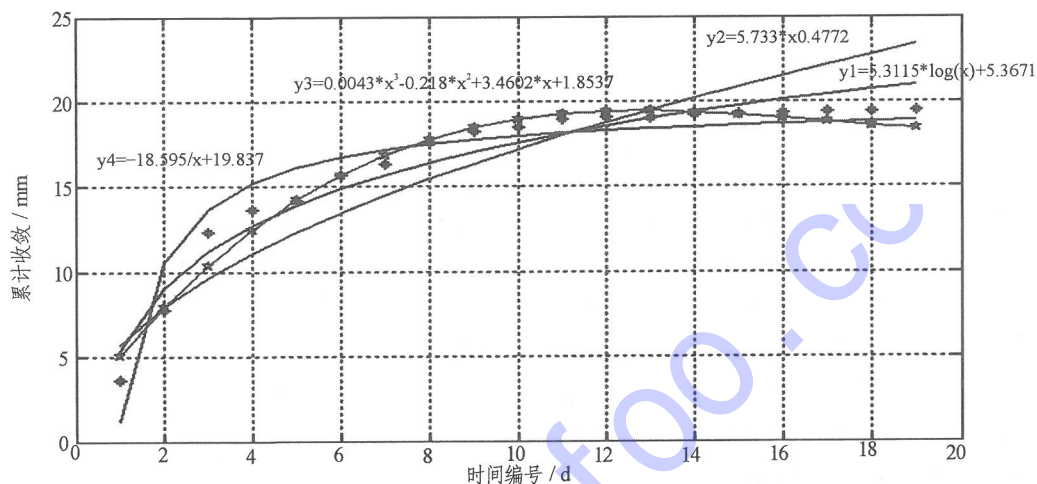


图2 周边收敛回归曲线与实测曲线图

由表7、图2分析可知:按照回归模型选择的标准,三次函数的决定系数最大,拟合曲线与实测值也较为接近,故选择三次函数模型作为回归模型最佳。现利用以上4种拟合曲线对12月3日周边收敛累计值进行预测(即 $x=20$ ),其值分别为:21.2 mm、23.95 mm、18.91 mm、18.26 mm,倒数函数与三次函数的预测值较为接近,总体讲,指数函数的预测值与实际收敛趋势相差较大,因此,短期内选择三次函数对周边收敛进行预测能较好地反映隧道的实际变形。

#### 3.3.2 拱顶沉降回归分析及预测

以表6基础数据为依据,对其分别进行对数模型、指数模型、倒数模型、多项式模型等回归分析,得到回归方程见表8。

表8 4D3K135+560断面拱顶下沉回归方程表

回归函数	回归方程	决定系数 $R^2$
对数函数	$y = 6.0414 \ln x + 5.8333$	0.9839
指数函数	$y = 7.1634x^{0.4303}$	0.9482
倒数函数	$y = -19.703/x + 22.021$	0.8304
三次函数	$y = 0.0036x^3 - 0.181x^2 + 3.1468x + 3.6304$	0.9929

将表8中四条回归拟合曲线与实测点曲线用MATLAB软件表现在同一坐标轴中(图3)。

由表8、图3分析可知:三次函数与对数函数的决定系数 $R^2$ 相差不大,比较难以取舍,拟合曲线与实测值也较为接近,但按照传统回归模型选择的标准,选择三次函数模型作为回归模型较好。现利用以上4种拟合曲线对12月3日拱顶沉降累计值进行预测(即 $x=20$ ),其值分别为:23.93 mm、26 mm、21.04 mm、22.97 mm,对数函数、倒数函数及三次函数的预测值较为接近,指数函数的预测值较大,因此,短期内选择对数函数、指数函数、三次函数均能对周边收敛进行预测,但三次函数最佳。

## 4 结语

笔者对金鸡关2#隧道中具有代表性的断面进行了监控量测数据分析,得到以下主要结论:

(1) 隧道开挖后的前几天隧道呈急剧变形,围岩压力急剧增大,随着施工的进程其变化速率逐渐减小,变形及压力整体上呈逐渐增大、最后趋于稳定。其中前10 d的变形量占总变形量的80%以上,大约15 d后趋于稳定。



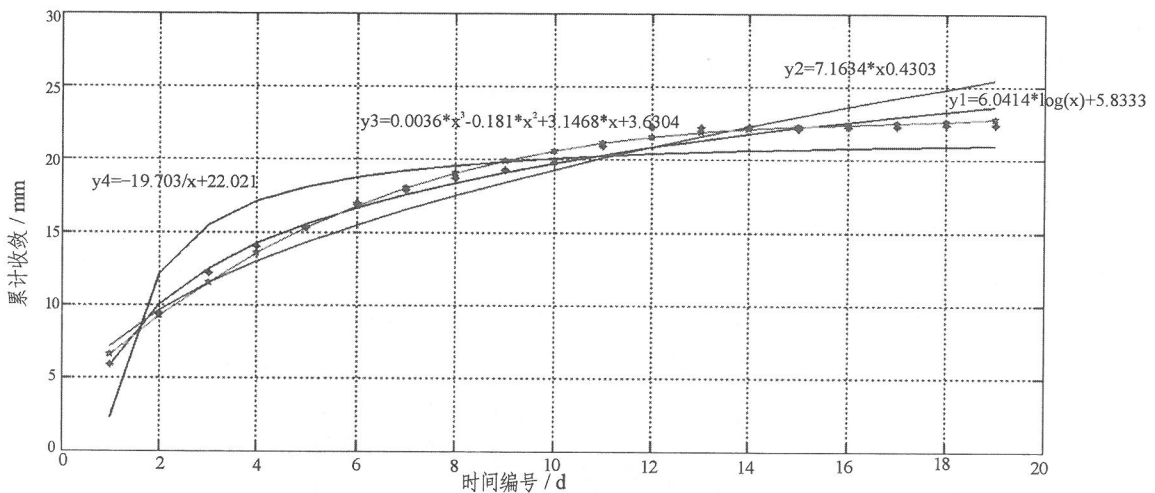


图3 拱顶下沉回归曲线与实测曲线图

(2)采用对数函数、指数函数、倒数函数、多项式函数分别对量测项目所获得的数据进行了回归分析,得出回归方程并得到了各自的决定系数。依据极大值做出判断,获得了监测项目适合的回归方程。对监测项目按照不同的回归模型进行了预测,周边收敛回归和拱顶下沉回归得到的最优预测值与极大值选出的最优模型相符,均为三次函数模型。

参考文献:

[1] L. MULLER. The Analysis of time series[J]. Neural processing Letters. 1999,9(3):292-299.

作者简介:

李洛川(1968-),男,陕西兴平人,助理工程师,从事铁路工程和水电工程施工技术与管理工作;

戴飞(1989-),男,四川广元人,助理工程师,硕士,从事铁路工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

## 2020年将建立绿色小水电标准体系

日前,水利部印发《关于推进绿色小水电发展的指导意见》并提出总体目标,到2020年,建立绿色小水电标准体系和管理制度,初步形成绿色小水电发展的激励政策,创建一批绿色小水电示范电站。到2030年,全行业形成绿色发展格局,小水电规划设计科学合理,建设管理规范有序,调度运行安全高效,综合利用水平明显提高,生态环境保护措施严格落实,绿色发展机制不断完善,河流生态系统稳定、生态系统服务功能良好,绿色小水电理念深入人心。小水电是重要的民生水利基础设施和清洁可再生能源。党中央、国务院历来高度重视小水电工作,大力支持和推动新农村水电电气化县建设、小水电代燃料生态保护工程建设和农村水电增效扩容改造,已建成的小水电在解决无电缺电地区人口用电,促进江河治理、生态改善、环境保护、地方社会经济发展等方面做出了重要贡献。与此同时,一些地区小水电规划、设计、建设、运行和管理等还存在不少薄弱环节,以绿色发展为导向的激励与约束机制有待进一步建立。《意见》要求,新建、改造小水电站必须遵循已批准的区域空间规划、流域综合规划、河流水能资源开发等规划。河流水能资源开发规划要以绿色发展理念为指导,开展规划水资源论证,合理布局小水电项目,与当地水资源承载能力相适应。对国家级自然保护区及其他具有特殊保护价值的地区,原则上禁止开发小水电;在部分生态脆弱地区和重要生态保护区,严格限制新建小水电;原则上限制建设以单一发电为目的的跨流域调水或长距离引水的小水电。组织开展河流水能资源开发规划回顾性评价或后评价,按照河流功能要求,调查评估小水电开发布局、开发规模、开发方式、建设运行等情况,优化调整老旧电站。水电站的设计、建设应当满足河流生态环境保护要求,尽可能减少对水文情势、河流形态和生物生境等的影响。因地制宜建设水利风景区、湿地公园、亲水平台等,实现电站与周边环境和谐统一。按照生态环境保护要求,建设过鱼道、鱼类增殖放流站等设施或使用鱼类友好的水轮机。小水电项目的水土保护及环境保护措施要与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用。对于库容较大的水电站,在其初期蓄水时,应选择合理时机和生态友好的蓄水方案。在推进绿色小水电的基础上继续探索智慧小水电,即通过自主研发、优化设计、新技术运用等形式,消化吸收国内外水电建设新技术、新工艺和新材料。开展绿色小水电关键技术攻关,加快科技创新成果转化,解决绿色小水电发展中的工程技术困难。积极开展成熟适用的绿色小水电技术的示范推广工作,研究探索水光、水风等互补发电技术,按照“互联网+技术服务”的要求建设智慧小水电。此外,水利部强调严格项目准入、依法监督检查、强化政策引导、增强公众参与、加强组织领导等措施来保障意见的实施。