

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.02.018

# 公路隧道围岩变形监测及灰色预测

魏伟琼<sup>1</sup>, 李映<sup>2</sup>, 叶明亮<sup>2</sup>

(1. 贵州大学喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550003;

2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:**以大浏高速公路道吾山隧道为研究背景,结合现场实测资料,对道吾山隧道围岩稳定状态进行分析研究,利用围岩变形监控数据建立并优化灰色预测模型GM(1,1),采用该模型对围岩位移变形进行预测,并将预测结果与现场监测结果进行对比分析,误差较小。应用灰色预测确定支护的最佳工作状态和支护结构工艺参数,并以此判别围岩的稳定性具有重要意义。

**关键词:**现代公路隧道;监控量测;灰色预测模型;支护

**中图分类号:** U456.3+1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672—1144(2014)02—0084—04

## Deformation Monitoring and Grey Prediction for Surrounding Rock of Highway Tunnel

WEI Wei-qiong<sup>1</sup>, LI Ying<sup>2</sup>, YE Ming-liang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Karst Environment and Geological Disaster Prevention, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003, China;

2. College of Resources and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** Taking Daowushan tunnel of Daliu Freeway as a research background, the steady state of the wall rock of the tunnel is analyzed here combining with the empirical testing data, and the grey prediction model [GM(1,1)] is built and optimized with the monitored data about surrounding rock deformation, then the surrounding rock displacement is predicted, and the predicted result are analyzed and compared with field monitoring results, it is found that both the numerical values are approximative. It has a great significance that this model is used to figure out the best working condition and technological parameters of shoring, and then make a judgment to the stability of surrounding rock.

**Keywords:** contemporary highway tunnel; monitoring and measurement; grey prediction model; shoring

近些年来我国交通事业飞速发展,公路隧道的建设越来越多,而且正朝特长、大跨度方向发展,隧道内部结构的复杂性,岩性参数的难以确定性,使得隧道施工可靠性问题越来越突出。现代公路的隧道施工以新奥法开挖为主流施工方法,利用水准仪、收敛仪、塔尺等对隧道围岩的变形进行监控量测,并利用测量数据结合模型进行预测,并以此来指导施工,及时采取合理的支护方法,使得隧道开挖能够安全、经济、顺利的进行。

## 1 工程地质概况

大浏高速道吾山隧道位于浏阳市关口镇、蕉溪

乡境内,大围山端处于关口杨溪村,有多乡公路约10 km与省道S309相接;浏阳端处于蕉溪乡上云村,也有乡间公路约8 km同G106国道相连。隧道设置为接近平行的双洞,左洞长2 948 m,右洞长2 960 m,主要穿越Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类围岩。地形标高196 m~616 m,相对高差180 m~310 m,最大420 m,一般260 m;隧道最大埋深约389 m(YK68+760 m)。大围山端洞口位于多处沟谷汇集部位的山谷半坡间,其前方为杨溪皂水库;浏阳端洞口处于山间主干沟谷的半腰间,洞门正对主干沟谷排泄方向(见图1)。隧洞围岩裂隙发育。隧道场地岩层为元古界冷家溪群寒武系中下统(Pt1n)板岩,泥盆系中统跳马涧组含

泥质(D2t)砂岩,石英砂岩;隧洞体岩层多变,岩性复杂,但都遭受过弱变质作用,岩石工程性能相应增强,岩石总体为较软-较硬岩,进出口端为软-极软岩,岩体破碎-较破碎,进出口端为极破碎。隧道中轴线与岩层走向以小锐角相交,与岩层面以大锐角相切,较好地利用和保持了岩体自承载能力,因此场地岩层,岩性适宜建造隧道构筑物。



图1 道吾山隧道洞口施工现场

## 2 灰色优化系统预测模型

### 2.1 灰色系统理论简介

灰色系统理论研究指的是“部分信息已知,部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统<sup>[1]</sup>。灰色系统的基本原理包括:① 差异信息原理:“差异”是信息,凡信息必有差异;② 解的非唯一性原理:信息不完全,确定的解是非唯一的;③ 最少信息原理:灰色系统理论的特点是充分开发利用已占有的“最少信息”;④ 认知根据原理:信息是认知的根据;⑤ 新信息优先原理:新信息对认知的作用大于旧信息;⑥ 灰色不灭原理:“信息不完全”是绝对的。正是基于灰色系统的这些原理,通过对灰色系统进行分析,才能建立灰色系统模型(Grey Model)。灰色系统的模型可以根据建模目的分为预测模型、决策模型和控制模型。按照灰色系统建模的灰微分方程不同,灰色系统预测模型可以分为不同的格式。比较常用的模型有GM(1,1)模型、DGM(2,1)模型、Verhulst模型等<sup>[1-2]</sup>。目前,对隧道围岩位移预测的方法很多,有线性-非线性回归预测、时间序列预测、灰色系统预测、神经网络模型预测等<sup>[3]</sup>,各种方法各有其特点,又有一定的局限性<sup>[4]</sup>。与其它预测方法相比,灰色系统预测具有准确性较高、要求原始数据较少、处理数据较为灵活和方便计算机处理的特点<sup>[5]</sup>。

### 2.2 灰色预测模型<sup>[6]</sup>

在灰色模拟预测中,应用最为广泛的是灰色

GM(1,1)模型<sup>[7]</sup>。在GM( $n, h$ )模型中,当 $n = 1$ 和 $h = 1$ 时,即为等时距GM(1,1)模型,该模型是对施工监测周期相等的观测结果进行预测。对隧道变形监测数据分析,设有等时间间隔数据序列:

$$X^{(0)} = [(X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), X^{(0)}(4))] \quad (1)$$

对 $X^{(0)}$ 进行一次累加生成:

$$X^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(0)}(i), i = 1, 2, \dots, n$$

则其微分方程为:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + \alpha X^{(1)} = \beta \quad (2)$$

即得到等时距GM(1,1)模型,其中 $t$ 为时间, $\alpha, \beta$ 为灰参数,其值可用最小二乘法求得,若 $\bar{\alpha} = (\alpha, \beta)^T = (B^T B)^{-1} B^T y_N$ 为参数数列,且

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(N-1) + x^{(1)}(N)] & 1 \end{bmatrix}$$

$$y_N = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(N) \end{bmatrix}$$

把 $\frac{1}{2}(x^{(1)}(n) + x^{(1)}(n-1))$ 为定义对 $x^{(1)}$ 作紧邻均值求出 $\bar{\alpha}$ 后,把 $\hat{\alpha}\hat{\beta}$ 的值代入式(1),解出微分方程:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{\beta}{\alpha})e^{-\alpha k} + \frac{\beta}{\alpha} \quad (3)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

其中 $\hat{x}^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$ 。

### 2.3 灰色优化预测模型

一般的统计预测模型都是在事物发展规律的基础上进行预测分析的,一些突发性的外界因素会对预测分析造成非常明显的影响。灰色预测也是如此,GM(1,1)模型主要适用于单一的指数增长模型,对序列数据出现异常的情况很难加以考虑<sup>[8-9]</sup>。基于大量隧道围岩变形数据分析,在隧道施工初期,即开挖面与量测断面距离很近时,一方面,岩石爆破后,围岩应力突然释放,变形非常显著;另一方面,施工的影响因素较多,比如支护措施,施工速度,岩石的爆破扰动等对预测模型分析结果均影响较大<sup>[9]</sup>。大量施工监测数据表明,这些因素综合起来使得围

岩在稳定状态下,围岩变形速度在初期阶段较大,以后随时间增加而逐渐减小<sup>[10-12]</sup>,如果运用前面变形速度快的数据预测后期发展,预测结果会有所偏高<sup>[9]</sup>,因此有必要对 GM(1,1)模型进行优化。

对 4 维原始数据列(1)中的原始数据施加政策因子  $Z$ ,改进后的原始数据为:

$$x^{(0)} = X^{(0)}Z = (X^{(0)}(1)Z, X^{(0)}(2)Z, X^{(0)}(3)Z, X^{(0)}(4)Z) \quad (4)$$

$$X^{(0)}(i)Z = \frac{1}{n-i+1}(X^{(0)}(i) + X^{(0)}(i+1) + \dots + X^{(0)}(n)) \quad (5)$$

对 4 维原始数据作一次累加,生成数列

$$x^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), x^{(1)}(4)] \quad (6)$$

其中  $x^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i x^{(0)}(k)$ ,且  $x^{(1)}(i)$  服从方程白化形式的微分方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + \alpha x^{(1)} = \beta \quad (7)$$

式中: $t$  为时间, $\alpha, \beta$  为灰参数。

### 3 道吾山隧道围岩位移的监控量测和灰色预测对比分析

#### 3.1 道吾山隧道施工监控方案<sup>[13]</sup>

隧道实时监测的主要内容为围岩周边位移量、拱顶下沉量、地质与支护工况观察、锚杆轴力、围岩压力及两层支护间压力、二衬应力应变、地质超前预报等。

#### 3.2 拱顶下沉

由于道吾山隧道断面变化较大,围岩稳定性较低,总体埋深较浅,隧道的周边位移和拱顶下沉监控量测断面采取了适当加密的原则,结合隧道的围岩情况,埋设测点时,先在测点处用小型电钻开挖孔径为 20 mm~30 mm、深为 30 mm 的孔。在孔中填满水泥砂浆后再埋膨胀螺丝,待砂浆凝固后即用水准仪或收敛计进行量测,埋设测桩应满足下列要求:

- (1) 各测点埋设同一垂直平面内。
- (2) 3 号和 4 号测点分别在同一水平面上,5 号测点埋设在拱顶中央。
- (3) 6 号和 7 号测点应埋设在起拱线附近。

如图 2 所示。

拱顶下沉主要用于确认围岩的稳定性。测量时需用一把长度适宜的钢杆,杆端连一个自制挂钩,挂在测点上,量测时需将精密水准仪的配套塔尺端连一个自制挂钩,挂在测点或钢杆上(当塔尺长度不够时用钢杆),将塔尺铅垂放下,稳定后用水准仪量

测。地表下沉亦采用精密水准仪和塔尺配合进行量测。

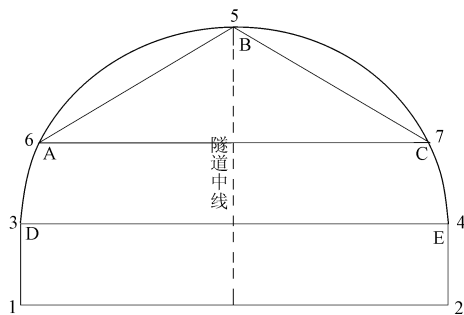


图 2 测桩及测线布置形式

$$\text{测量点高程 } \Delta H_i = H_i - H_{\text{基}}$$

$$\text{拱顶下沉量 } \Delta H = H_{i-1} - H_i$$

第  $n$  天量测的总下沉量为:

$$H_n = \sum_{i=1}^n \Delta H$$

式中: $H_{\text{基}}$  为基准点高程(mm); $H_i$  为第  $i$  次量测的拱顶高程。

#### 3.3 围岩周边位移量测

位移量测线与拱顶下沉点布置在同一断面。埋设测点时,一般在墙角 1 m 高的位置选择,先在测点处用小型钻机成孔,然后埋入膨胀螺丝钩,最后用混凝土埋塞,尽量使两个预埋件轴线在基线方向上,待混凝土凝固后即可测量。各测线相邻两次测量的收敛值为:

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

第  $n$  次测量的总收敛值为:

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

式中: $R_i$  为第  $i$  次量测的位移量(mm)。

#### 3.4 监测值和灰色优化模型预测值比较分析<sup>[12]</sup>

通过对道吾山隧道 ZK68+813 断面为期 56 d 的监测,其监测值及利用 GM(1,1)模型预测值对比如表 1 和图 3,其中第一天监测值即为模型初始值。

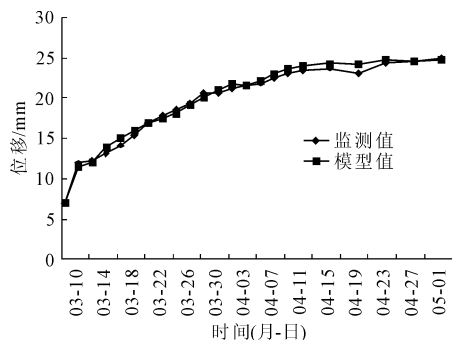


图 3 实测值与预测值比较图

表 1 灰色优化模型围岩位移灰色预测结果

单位:mm

时间(年-月-日)	监测值	模型值	误差	相对误差/%	精确度/%
2012-03-10	7.13	7.13	0	0	—
2012-03-12	11.98	11.46	0.52	4.34	95.66
2012-03-14	12.22	12.13	0.09	0.74	99.26
2012-03-16	13.11	13.87	-0.76	-5.80	94.20
2012-03-18	14.22	14.95	-0.73	-5.13	94.87
2012-03-20	15.32	15.94	-0.62	-4.05	95.95
2012-03-22	16.89	17.01	-0.12	-0.71	99.29
2012-03-24	17.76	17.45	0.31	1.75	98.25
2012-03-26	18.57	18.11	0.46	2.48	97.52
2012-03-28	19.43	19.21	0.22	1.13	98.87
2012-03-30	20.69	20.15	0.54	2.61	97.39
2012-04-01	20.71	21.02	-0.31	-1.50	98.50
2012-04-03	21.17	21.88	-0.71	-3.35	96.65
2012-04-05	21.56	21.58	-0.02	-0.09	99.91
2012-04-07	21.88	22.21	-0.33	-1.51	98.49
2012-04-09	22.41	22.98	-0.57	-2.54	97.46
2012-04-11	23.03	23.67	-0.64	-2.78	97.22
2012-04-13	23.45	24.02	-0.57	-2.43	97.57
2012-04-17	23.69	24.25	-0.56	-2.36	97.64
2012-04-21	22.98	24.23	-1.25	-5.44	94.56
2012-04-25	24.26	24.75	-0.49	-2.02	97.98
2012-04-29	24.69	24.64	0.05	0.20	99.80
2012-05-03	24.87	24.77	0.1	0.40	99.60

从表 1 和图 3 可以看出,运用灰色系统对隧道围岩现场监测数据进行预测,得到的结果较为准确,灰色系统避开了公路隧道复杂的地质因素、结构特征和围岩力学性状等难以量化的因素,将其模糊化,通过对已知的现场信息进行其发展趋势预测,是一门实践性很强的隧道现场施工技术。利用围岩位移的变形监测信息指导施工是现代公路隧道新奥法施工的重要原则。现场监控量测技术在我国已正式列入技术标准和规范中,信息化施工逐渐在隧道施工中被广泛采用。由于隧道的围岩自身属性和受力状况非常复杂,初始选定的支护参数往往带有一定的盲目性,难以适应地质和施工情况的变化,通过对施工开挖和支护过程中围岩变形量测信息作反演分析,以监控围岩及其支护结构的动态变化及其稳定和安全,根据及时采集的信息进一步修改和完善,并指导下一步施工,以降低工程成本和减少隧道失稳塌方等事故<sup>[1,14]</sup>。根据隧道工程的特点,选择灰色系统对现场监测数据进行预测,无论是进行稳定情况下位移预测或失稳时间预测,都取得了较为满意的结果<sup>[1,14]</sup>,是一个比较可行的公路隧道监控预测方法。

## 4 结 论

近 20 年来我国交通运输事业迅猛发展,越来越多特长、大跨度的隧道正在或有待建设,复杂的隧道内部结构,难以确定的围岩参数,使得隧道施工可靠性问题越来越突出。在工程实践中,如何避免隧道的失稳和坍塌,如何以较低的支护成本,达到安全经济支护的目标,从监控测量的数据分析围岩的稳定性和可靠性是本文研究的价值和目的。本文主要研究成果:

(1) 研究了现行新奥法信息施工的监控量测方法,通过量测数据得到的位移-时间图来判别隧道围岩稳定与否,并对量测数据进行回归分析。

(2) 引用灰色理论 GM(1,1)模型对量测位移信息建立预测分析模型,这对评价围岩和支护系统工作状态、合理选择支护参数与支护时机具有重要的应用价值。

(3) 公路隧道围岩稳定性和可靠性研究是一项前景广阔但又很具挑战性的科学课题,目前这方面的相关理论和应用仍需得到进一步完善。

(下转第 94 页)