

隧道系统预测的多因素模型

郝哲¹ 罗敖² 刘斌²

(1. 沈阳大学建筑工程学院, 辽宁沈阳 110044; 2. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110004)

【摘要】 建立了隧道系统预测的多因素分析模型, 弥补了以往单因素时序分析的不足, 并编制了相应的分析程序。结合沈大高速公路韩家岭隧道部分断面的多种实测数据, 对隧道系统的多因素模型及稳定性进行了研究, 对相应预测结果进行了讨论。

【关键词】 隧道系统; 多因素模型; 预测

【中图分类号】 TU 457

Multifactor Forecast Model of Tunnel System

Hao Zhe¹ Luo Ao² Liu Bin²

(1. Department of Construction Engineering, Shenyang University, Liaoning Shenyang 110044;

2. Department of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Liaoning Shenyang 110004 China)

【Abstract】 The multifactor forecast model of tunnel system is built and the related program is edited. It compensates the shortage of ancient single factor time series analysis. Hereby, aiming at various measuring data of Hanjialing highway tunnel engineering, the multifactor forecast model of tunnel system and its stability are studied and the forecasted results are discussed.

【Key Words】 tunnel system, multifactor model, forecast

0 引言

隧道工程系统为一复杂开放系统, 与其环境有着力学的、能量的和信息的传递、交换、耦合作用及相互间复杂的非线性效应^[1]。影响隧道工程稳定性的因素众多, 且各种因素互为影响、互相制约。按照一般的动力学观点, 系统都是建立在模型化的基础上去分析、探讨问题^[2]。隧道系统的复杂性使得其模型化更加困难。近年来人们探索建立了一些模型化的方法, 其中从实测时间序列数据重建复杂系统的动力学方法, 在各种非线性分析和预报中取得了良好的效果。

以往的分析方法, 多为单一变量模型, 主要用收敛位移变化趋势作为稳定性识别的依据, 故难以从中提出更多的信息。要描述整个系统的发展演化, 并对其进行稳定性预报和分析其演化发展的进程, 采用收敛位移一个状态变量是不全面的, 本文利用观测资料的时间序列分析结果运用统计分析建立多变量模型来描述隧道系统的演化发展。

1 隧道系统模型的建立

1.1 状态变量的选取

一般来说, 对隧道系统而言, 状态变量的选取应

体现:

- 1) 是隧道工程稳定的直接表现或主体影响因素;
- 2) 能比较直观地反映隧道系统的演化发展;
- 3) 能直接用作分析隧道变形与稳定性的依据;
- 4) 量测数据是现场开挖引起的真实的工程动态响应;
- 5) 尺度要大, 量测数据应当有较大范围的平均响应;
- 6) 量测的信息量丰富;
- 7) 易于直接量测, 测量设备轻巧, 种类多, 适用于现场;
- 8) 量测数据的离散性相对较小;
- 9) 测试费用较低, 测试设备成本相对低廉。

根据以上原则, 一般选取以下类型变量:

1) 变形系列 变形系列是隧道工程中各种因素综合作用的结果, 是直观地反映隧道动态的变量, 是非线性动态方程中至关重要的变量之一, 包括隧道围岩的收敛位移, 隧道的拱顶下沉及隧道围岩的深部位移等。

2) 应力系列 应力系列是隧道能量的一种表现形式, 是隧道内岩体的荷载、地下水或者地表水及

其它外部环境综合作用下的一种反映。隧道工程失稳的实质是隧道岩体与支护结构之间通过不断调整自身能量,使之达到稳定的过程,应力变化反映了隧道能量的变化,而能量的变化则与失稳的动态密切相关,故应力是动态方程建立中必不可缺少的变量之一,包括隧道支护的各种应力,如围岩与喷层间的应力、钢拱架的应力、喷层内的应力、锚杆轴力等。

3)其他系列 如弹性波的量测,地下水的压力和渗透性的量测等。

作为多因素模型分析的尝试,本文选取前两个系列的状态变量来描述整个系统的发展演化。

1.2 模型描述

设 n 为描述隧道系统动态行为所需的最少状态变量个数,将 n 状态变量记为 y_1, y_2, \dots, y_n , 并设它们随时间演变的规律可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= f_1(y_1, y_2, \dots, y_n) \\ \frac{dy_2}{dt} &= f_2(y_1, y_2, \dots, y_n) \\ &\vdots \\ \frac{dy_n}{dt} &= f_n(y_1, y_2, \dots, y_n) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: f_i 为 y_1, y_2, \dots, y_n 的函数, $i=1, 2, \dots, n$ 。

一般情况下不知道函数的具体形式,但是知道式(1)的一系列特解,即:

$$\left. \begin{aligned} y_1(t_1), y_1(t_2), \dots, y_1(t_m) \\ y_2(t_1), y_2(t_2), \dots, y_2(t_m) \\ \vdots \\ y_n(t_1), y_n(t_2), \dots, y_n(t_m) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, t_j 为实测时刻; $y_i(t_j)$ 为在 t_j 时刻实测值, $i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, m$ 。 m 为实测序列长度。

将式(1)写成差分形式有:

$$\left. \begin{aligned} \frac{y_i(t_{j+1}) - y_i(t_{j-1})}{t_{j+1} - t_{j-1}} &= f_i[y_1(t_j), y_2(t_j), \dots, y_n(t_j)] \\ \left\{ \begin{aligned} i &= 1 \sim n \\ j &= 2 \sim m-1 \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将 $f_i(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 写为:

$$f_i(y_1, y_2, \dots, y_n) = \sum_{i=1}^k P_{ii} q_{ii}(y_1, y_2, \dots, y_n)$$

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

式中: $P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ik}$ 均为与 $f_i(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 相对应的未知参数; $q_{i1}(y_1, y_2, \dots, y_n), q_{i2}(y_1, y_2, \dots, y_n), \dots, q_{ik}(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 为 y_1, y_2, \dots, y_n 的函数。

变量的非线性函数有指数、多项式、对数、双曲线和三角函数等多种形式。由于隧道系统演化发展

的复杂性,由多个状态变量组成的隧道系统的分析模式一般都很难预先确定其服从何种函数的规律,只能先初步假定,然后对其检验,看是否可以接受,若检验未通过,则重新假设,并重新进行检验,直到得到可以接收的模型。

在通常使用的几种非线性函数中,多项式较为直观和简单,本文拟采用此种形式模型先假设状态变量的多项式,并设多项式的次数先取3次,对于更高次数的多项式可类似处理。

对于由两个状态变量描述的隧道系统,有:

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= f_1(y_1, y_2) = \sum_{i=1}^{10} P_{i1} q_{i1}(y_1, y_2) = p_{11} y_1 + \\ & p_{12} y_2 + p_{13} y_1^2 + p_{14} y_2^2 + p_{15} y_1 y_2 + \\ & p_{16} y_1^3 + p_{17} y_2^3 + p_{18} y_1 y_2^2 + p_{19} y_1^2 y_2 + p_{1,10} \\ \frac{dy_2}{dt} &= f_2(y_1, y_2) = \sum_{i=1}^{10} P_{i2} q_{i2}(y_1, y_2) = p_{21} y_1 + \\ & p_{22} y_2 + p_{23} y_1^2 + p_{24} y_2^2 + p_{25} y_1 y_2 + \\ & p_{26} y_1^3 + p_{27} y_2^3 + p_{28} y_1 y_2^2 + p_{29} y_1^2 y_2 + p_{2,10} \end{aligned} \quad (4)$$

该模型中, $q_{i1}(y_1, y_2, \dots, y_n), q_{i2}(y_1, y_2, \dots, y_n), \dots, q_{ik}(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 都不包含未知参数,即可由 y_1, y_2, \dots, y_n 直接计算得到。将式(4)代入式(3),记最少状态变量个数为 n ,可得矩阵表达式:

$$D_i = P_i O_i \quad (5)$$

式中: $D_i = [d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{iM}]^T =$

$$\left[\frac{y_i(t_3) - y_i(t_1)}{t_3 - t_1}, \frac{y_i(t_4) - y_i(t_2)}{t_4 - t_2}, \dots, \frac{y_i(t_m) - y_i(t_{m-2})}{t_m - t_{m-2}} \right]^T \quad (6)$$

$$O_i = \begin{bmatrix} q_{i11} & q_{i21} & \dots & q_{ik1} \\ q_{i12} & q_{i22} & \dots & q_{ik2} \\ \vdots & & & \vdots \\ q_{i1M} & q_{i2M} & \dots & q_{ikM} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$P_i = [P_{i1} \quad P_{i2} \quad \dots \quad P_{ik}]^T \quad (8)$$

$$Q_{ij} = q_{ij}(y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (t = t_j) \quad (9)$$

式(7)中, $M = m - 2$; D_i 为列差分矩阵; O_i 为 $M \times k$ 阶观测资料矩阵; P_i 为列未知参数矩阵。故式(5)为仅含未知参数 P_i 的线性方程组。为了求得 k 个未知参数 $P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ik}$, 方程组的阶数 M 必须不小于 k , 由此构成对观测资料序列长度的要求。式(4)描述的隧道系统模型的未知参数为10个,故所需的时序长度至少为12。若作类似分析可知,对于由三个状态变量描述的隧道系统模型,未知参数为20个,故所需的时序长度至少为22。

1.3 模型参数的确定

用基本反演法确定隧道系统模型参数。

对于式(9)的矩阵,若 M 大于 k 时,式(5)是一个在某一区间上所建立的 k 个方程组,可用最小二乘法求解,对残差平方和 $S_i = (D_i - P_i Q_i)^T (D_i - P_i Q_i)$ 取极小值,即可建立求解参数 P_i 的方程组。按最小二乘法原理,有:

$$Q_i^T Q_i P_i = Q_i^T D_i \Rightarrow P_i = (Q_i^T Q_i)^{-1} Q_i^T D_i \quad (10)$$

1.4 模型的检验

由于多变量之间的非线性函数关系式的复杂性以及隧道系统本身的复杂性,隧道系统模型是否真的反映了隧道系统的演化发展的动态模式,还需要进一步的检验。

可以借用数理统计中假设检验的方法对系统模型进行试验,检验包括两个方面:一方面为隧道系统模型的趋势项检验;另一方面为隧道系统模型的随机项(误差)检验。

1.4.1 趋势项检验

1.4.1.1 隧道系统模型的显著性检验

建立模型无显著性假设:

$$H_0: P_{i1} = P_{i2} = \dots = P_{ik} = 0 \quad (11)$$

若直接运用式(11)假设,将有诸多不便,我们转换角度,假设其母体的方差为某一定值,就可推翻式(11)的假设了。

建立统计量:

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^M \left(\sum_{l=1}^k P_{il} q_{ilj} - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d_{ij} \right)^2}{\sum_{j=1}^M \left(d_{ij} - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d_{ij} \right)^2} \frac{M-k}{k-1} \quad (12)$$

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

根据数理统计理论,可以证明 F_i 服从第一自由度为 $k-1$ 、第二自由度为 $M-k$ 的分布。因此,对于给定的检验水平 α ,查 F 分布表的临界值 $F_\alpha(k-1, M-k)$ 。若:

$$F_i < F_\alpha(k-1, M-k) \quad (13)$$

则否定假设,认为隧道系统动态模式有显著意义,解释能力较好,在可接受的范围内;反之,则接受假设,说明隧道系统动态模式无显著意义,其解释能力较差,不在可接受的范围内。

1.4.1.2 模型参数的显著性检验

建立如下统计量:

$$t_{il} = \frac{P_{il}}{S_{p_{il}}} \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad l = 1, 2, \dots, k \quad (14)$$

式中: $S_{p_{il}} = \sqrt{c_{il} S^2} = \sqrt{c_{il}} \times$

$$\sqrt{\frac{1}{M-k} \sum_{j=1}^M \left(\sum_{l=1}^k P_{il} q_{ilj} - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d_{ij} \right)^2}$$

$i = 1, 2, \dots, n; \quad l = 1, 2, \dots, k; \quad c_{il}$ 是矩阵 $(Q_i Q_i)^{-1}$ 主对角线上的第 l 个元素。

建立各项 $Q_i p_i$ 对系统演变无显著影响的假设:

$$H_0: P_{il} = 0.$$

若 $|t_{il}| > t_\alpha(M-k)$ 成立,则否定假设,说明非线性表达式 $f_i(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 中第 i 项 $q_{ij} p_{ij}$ 对系统演变有显著影响;反之,若假设成立,则说明非线性表达式中第 i 项 $q_{ij} p_{ij}$ 对系统演变没有显著影响。

完成检验后,剔除那些对系统演变没有作用或作用很小的无关项,这样就可得所要反演的方程。

1.4.2 误差检验

随机因素反演的误差 ER_i (随机项)可以写成:

$$ER_i = \begin{bmatrix} \epsilon_{i1} \\ \epsilon_{i2} \\ \vdots \\ \epsilon_{iM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{i1} \\ d_{i2} \\ \vdots \\ d_{iM} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} q_{i11} & q_{i21} & \dots & q_{ik1} \\ q_{i12} & q_{i22} & \dots & q_{ik2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{i1M} & q_{i2M} & \dots & q_{ikM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i1} \\ p_{i2} \\ \vdots \\ p_{ik} \end{bmatrix}$$

概率分布检验 考察随机项是否服从期望值接近 0, 方差接近固定值的正态分布,即:

$$E(\epsilon_{ij}) = 0, \quad D(\epsilon_{ij}) = \sigma^2 = c, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (15)$$

在大样本的情况下,随机项服从正态分布是成立的,因而主要是对其分布的参数进行假设检验。

建立统计量:

$$t_i = \frac{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \epsilon_{ij}}{S_i} \sqrt{M-1} \quad (16)$$

式中: S_i 是随机项 ϵ_{ij} 的样本标准差

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left(\epsilon_{ij} - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \epsilon_{ij} \right)^2}$$

建立期望值为 0 的假设: $H_0: E(\epsilon_{ij}) = 0.$

在显著水平下,若: $|t_{il}| > t_\alpha(M-k)$ 成立,则否定假设,说明随机项的期望值不为 0;反之,则肯定假设,随机项的期望值为 0。

上面所提出的对隧道系统模型的检验,即对其

解释隧道系统行为演化发展的能力考证,可以看出,若其中一项内容得不到检验,就没有必要对另一项内容进行检验了。

1.4.3 检验不通过时模型的改进方法

当上述模型检验不能通过时,就说明这种模式有这样或那样的问题,分析改进方法有以下几种:

1) 剔除不重要的影响因素

最直接的方法是从参数项中不断地剔除某些有可能不太重要的项,使得剩余项之间改变原有的关系或者在原有关系上产生新的变化,并重新建立隧道系统动态模型而继续进行计算分析。但这样有可能导致对参数真值估计的严重偏误,因此采用这种方法时,需要权衡利弊,谨慎使用。

2) 用同断面相关数据进行替换

在隧道系统模型的反演过程中,采用的变量是时间序列分析数据,往往这些数据比较单一。为此,可收集某项的同一断面不同部位的数据(如隧道左帮收敛和右帮收敛、同一点不同深度的深部位移值),把它们结合起来计算分析其模型的各项参数,采用这种方法后即可能取得较为可靠的模型。

3) 利用已知信息

根据已经了解和掌握的某种先验信息,确定出某些项之间的关系,然后代入动态模型的表达式以提高模式的说服力,并使计算部分简化。

4) 增加样本容量

若增加样本的容量,在一定程度上会抵消因样本容量小产生的误差的影响,也即相对提高了参数的精确性。

5) 采用新的样本数据

当上述多种方法均失效的时候,可对同一组变量重新抽取一部分或全部样本数据,重新建立新的模型,那么采用新的样本数据来处理就可能得到比较精确的结论。

6) 选取其他数学模型

隧道系统演化动态模式的数学模型选择不当,如隧道系统动力学是高度非线性,而选用的模型是低度非线性,其随机项的相互独立假设必然难以成立,此时可以考虑其他形式的数学模型。

1.5 模型的预报

将隧道系统的动态模型表达式(1)写成下面的通式形式:

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = f_i(y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

式中:函数 $f_i(y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))$ 的具体形式可参考式(4),并能依据状态变量的实测资料反演得到; n 为状态变量的个数。

式(17)实际上是一组常微分方程,只要有一个初始条件,如 $y(t_0) = (y_1(t_0), y_2(t_0), \dots, y_n(t_0))^T$, 可以根据变步长的四阶龙格-库塔法^[3]进行反演或预报,但式(17)含有多个初始条件,即不止一天的实测资料。因此,不能仅仅根据第一天的实测数据去反演和预报状态变量在后期的演化发展,也不能仅仅根据其后任何一天的实测数据去预报后期的各个状态变量的演化发展。其原因在于,隧道系统的演化反展呈现出的复杂性,其动态行为只能在短期内做出较为精确的预报,随着时间的延长,误差就会越来越大;按照不同的初始条件,反演和预报得到的结果都不一样,误差也不相同;所以我们要充分利用实测数据,尽可能地利用信息,更加全面、准确地反演和预报状态变量的演化发展。

2 韩家岭隧道的多因素模型分析

2.1 现场简介

2003年5月贯通,位于大连市金州区北部约6.5 km处,原沈大高速公路西侧的韩家岭隧道,为单向四车道公路隧道,是制约整个沈大建设的关键工程。韩家岭隧道是目前我国乃至亚洲最大跨度的公路隧道,有“亚洲第一隧”之称。隧道断面近椭圆形,开挖最大宽度近23 m,轴线处开挖高度15.50 m,属大跨、低扁平率(60%左右)公路隧道。隧道起迄桩号为K344+670~K345+156,全长486 m。隧道施工采用新奥法^[4],做到“短进尺、弱爆破、勤测量、早封闭”,用进口全站仪和激光断面界限仪对施工现场进行全方位的“动态控制”,保证了工程质量和进度,达到了优质高效的施工要求。

为指导设计与施工、保证工程质量,东北大学韩家岭隧道科研课题组完成了对隧道的监测工作。据现场监测结果发现,现场围岩稳定性良好,短期内即达到稳定,且无明显的流变现象出现。

2.2 模型建立

利用隧道K344+986断面实测数据的时序分析结果^[5,6](略)来进行计算和分析。现以隧道围岩的拱顶下沉量和喷层与围岩间应力的时序分析值作为状态变量(见图1和图2)。依据2002年11月24日至12月8日前15天的实测资料的分析结果建立系统的模型。

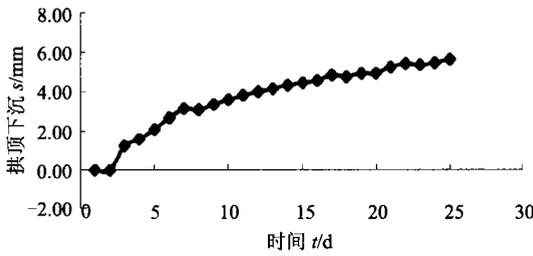


图1 拱顶下沉的 $s-t$ 曲线

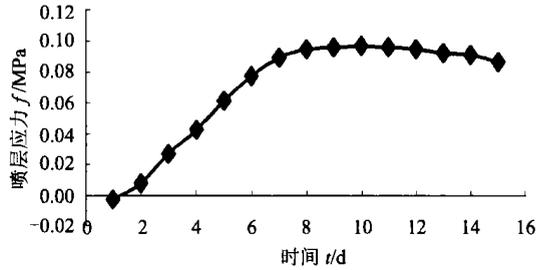


图2 喷层应力的 $f-t$ 曲线

由于所选取的两个状态变量的量纲不一致,将使方程中的系数之间产生较大的差异,影响最后求解精度,因此采用量纲一的量模型以避免误差,而且从最后得到的标准系数的大小可以观察各变量对目标变量关系的密切程度。作量纲一的处理,确定两个相应的系统状态变量,有:

$$y_1(t_i) = \frac{s(t_i)}{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} s(t_i)}, \quad y_2(t_i) = \frac{f(t_i)}{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} f(t_i)}$$

设隧道系统的模型在这两个状态变量上所表现的形式如式(4),按照 2.3 中的基本反演法编制程序,反演结果为:

$$\text{拱顶下沉: } \frac{dy_1}{dt} = 5.870 0 y_1 - 4.095 2 y_2 - 12.761 5 y_1^2 + 1.630 6 y_2^2 + 7.828 0 y_1 y_2 + 52.378 7 y_1^3 - 38.947 2 y_2^3 + 122.455 9 y_1 y_2^2 - 134.440 5 y_1^2 y_2 + 0.118 8$$

$$\text{喷层应力: } \frac{dy_2}{dt} = 2.383 1 y_1 - 1.797 5 y_2 + 16.305 8 y_1^2 + 15.269 9 y_2^2 - 31.927 8 y_1 y_2 - 20.521 9 y_1^3 + 0.628 5 y_2^3 - 19.350 1 y_1 y_2^2 + 39.084 9 y_1^2 y_2 + 0.203 4$$

2.3 模型检验

1) 模型的显著性检验

建立的统计量与检验临界值(检验水平为

根据检验要求,则认为模型的表达式是显著的,其解释程度在可接受的范围内。

2) 模型参数的显著性检验

动态模式参数的显著性检验的内容和过程在前面已经介绍,具体的检验情况见表 1(检验水平 0.02, $t_{\alpha/2}(3) = 4.540 7$)。

0.10) 关系如下:

$$F_1 = 4.094 < F_{\alpha}(9, 3) = 5.24;$$

$$F_2 = 4.351 < F_{\alpha}(9, 3) = 5.24。$$

表 1 参数显著性检验结果

参数	参数值	统计量值 t	检验结果	参数	参数值	统计量值 t	检验结果
P ₁₁	5.870 0	3.323 7	不接受	P ₂₁	2.383 1	1.135 6	不接受
P ₁₂	-4.095 2	-2.211 9	不接受	P ₂₂	-1.797 5	-0.817 1	不接受
P ₁₃	-12.761 5	-6.206 9	接受	P ₂₃	16.305 8	6.674 4	接受
P ₁₄	1.630 6	0.273 7	不接受	P ₂₄	15.269 9	2.157 1	不接受
P ₁₅	7.828 0	1.383 5	不接受	P ₂₅	-31.927 8	-4.749 1	接受
P ₁₆	52.378 7	7.698 4	接受	P ₂₆	-20.521 9	-2.538 4	不接受
P ₁₇	-38.947 2	-5.004 0	接受	P ₂₇	0.628 5	0.068 0	不接受
P ₁₈	122.455 9	16.532 1	接受	P ₂₈	-19.350 1	-2.198 5	不接受
P ₁₉	-134.440 5	-18.982 3	接受	P ₂₉	39.084 9	4.644 3	接受
P _{1,10}	0.118 8	0.024 7	不接受	P _{2,10}	0.203 4	0.035 6	不接受

从表 1 中看出,有部分项的检验值在选定的检验水平下,不能满足假设,即检验没有通过,该项不能被接收,对隧道系统模型无显著性影响,可以剔除。由此,得到隧道系统模型的反演结果如下:

$$\text{喷层应力: } \frac{dy_2}{dt} = 16.305 8 y_1^2 - 31.927 8 y_1 y_2 + 39.084 9 y_1^2 y_2。$$

3) 误差检验

建立的统计量与检验临界值(检验水平 0.05)的关系如下:

$$\text{拱顶下沉: } \frac{dy_1}{dt} = -12.761 5 y_1^2 + 52.378 7 y_1^3 - 38.947 2 y_2^3 + 122.455 9 y_1 y_2^2 - 134.440 5 y_1^2 y_2,$$

$$t_1 = -1.155 92 < t_{\alpha/2}(3) = 3.182 4;$$

$$t_2 = 1.20387 < t_{\alpha/2}(3) = 3.1824。$$

按前面所述的方法可知,检验结果是接受假设的,即随机误差项服从期望值为0,方差接近固定值的正态分布。

2.4 隧道系统行为的预测

隧道模型检验通过之后,说明该模式对系统的演化发展具有解释能力^[7]。利用已有的实测数据,通过模型对状态变量发展演化进行预测。因为各监测序列值进行了标准化处理,所以计算结果需要经过量纲还原处理。根据预测结果绘出其后的10 d的拱顶下沉和应力曲线(见图3和图4)。

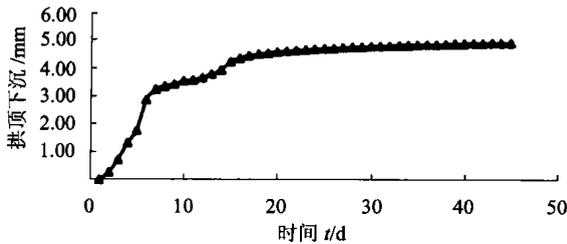


图3 基于预测值的拱顶下沉曲线

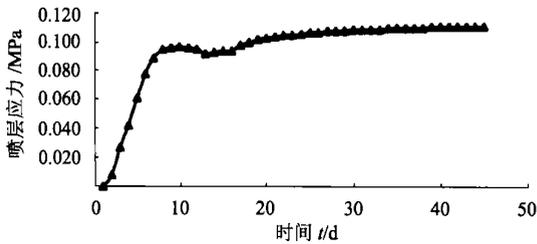


图4 基于预测值的喷层应力曲线

从预测曲线我们可以看出:位移和应力在30 d以后已经基本趋于稳定,35 d左右的时候已经基本无变化,可以认为围岩趋于稳定了。在13~16 d的时候曲线出现波动是因为第二台阶开挖的扰动作用引起的,经过第二台阶的开挖后,扰动慢慢地消除,曲线重新呈现稳定的趋势,说明伴随着掌子面的远离,此断面的围岩趋于稳定。

3 结论

在考虑隧道工程特点的基础上,建立了隧道系统预测的多因素分析模型,弥补了以往单因素时序分析的不足。结合沈大高速分路的韩家岭隧道部分断面的多种实测数据,对隧道系统的多因素模型及稳定性进行了研究,并编制了相应的分析程序。

1)在新奥法施工隧道工程的分析中,必须紧紧依靠现场实测数据;实测数据不但要求精度高而且数量必须大。因为对于隧道如此一个复杂的系统而

言,不依靠大量数据的分析是不能够比较准确的反映隧道的状态的,如果没有足够的数据,本文的工作根本无法做起。

2)提出了隧道系统多因素分析预测模型,把传统的采用单一因素(收敛位移)分析隧道的模型提高到多因素综合研究,使应力和深部位移等量测数据量不在新奥法的监测中处于辅助位置。

3)剖析了影响隧道系统的各种状态变量,选取经时间序列分析所得出的变形系列和应力系列来描述系统的发展演化。

4)建立了隧道系统多因素预测的理论模型。包括:模型描述、模型参数确定、模型检验(包括模型检验和模型参数检验)、检验不通过时的改进及模型预报的方法等。

5)编制了Fortran分析程序,通过简单的使用操作,可以快速得出检验结论。

6)针对韩家岭隧道进行了多因素模型分析和预测,对围岩的稳定特征进行了评价。

7)在隧道系统多因素分析模型的预测中,涉及到求解常微分方程组的情况。而多数常微分方程组是无解的,因此可能会出现没有结果的情况,这不能说模型是错误的,只是现有数学手段不能解决。要改变这种情况,需通过调整(增加或减少)输入参数的值而得到新的数学模型,才有可能解出常微分方程组。这就要求实测数据必须要有一定的数量,需要对隧道围岩进行长期的监测。

参 考 文 献

- 1 李世辉.隧道围岩稳定系统分析.北京:中国铁道出版社,1991.131~132
- 2 曾晓清,张一弼.系统工程方法在隧道围岩稳定性分析中的应用.地下空间,1995,15(2):106~110
- 3 孙庆新.数值分析.沈阳:东北工学院出版社,1990.215~217
- 4 李晓红.隧道新奥法及其量测技术.北京:科学出版社,2002.2~3
- 5 郝 哲.公路隧道岩体分级、位移预测及其反分析方法研究:[东北大学博士后研究报告].沈阳:东北大学,2003.81~82
- 6 罗 敖.韩家岭隧道新奥法量测数据的时序分析方法研究:[学位论文].沈阳:东北大学,2003.56~57
- 7 谢全敏,夏元友,程 康.岩体变形监测时序分析与动态建模.工程地质学报,2001,9(3):308~311

收稿日期:2004-03-25