

基于双曲线模型的采空区路基变形监测预警系统的建立

康晋明 景兆骥

(中建交通建设集团有限公司,北京 100073)

【摘要】 通过采空区域高速公路路基地表沉降变形的现场监测,建立了路基沉降变化观测值数据库,基于实测数据,建立了地表沉降变形预测模型,研发了路基沉降变形监测预警系统,并进行了公路路基工后沉降变形的预测分析,最终生成沉降预警报告。

【关键词】 采空区;监测;双曲线模型^[1];预警系统

【中图分类号】 TU 478

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2012.05.002

The Establishment of the Deformation Monitoring Forecast System on the Expressway Through Goaf Based the Hyperbolic Model

Kang Jinming Jing Zhaoji

(China Construction Communications Engineering Group Corporation Limited, Beijing 100073, China)

【Abstract】 Through the deformation monitoring of the mined-out area highway subgrade subsidence, established the embankment settlement database. and based on the survey datas, The author established the deformation forecast model of surface subsidence, research and developed the subgrade deformation monitoring forecast system, analysed the settlement remaining of highway subgrade deformation and created the settlement prewarning report.

【Key words】 goaf; monitoring; hyperbolic model; forecast system

0 引言

我国是煤炭生产大国,多年大量地开采,致使我国多地形成了规模不一形状连片的地下采空区,这对高速公路网络建设和运营产生着极大的安全隐患。采空区对高速公路安全的影响主要表现在工后沉降引起的高速公路路基发生位移变形,从测量角度讲,在地表施工和建成运营中,对高速公路穿越采空区域进行路基沉降变形监测,并建立采空区域路基变形监测预警系统,在保障高速公路顺利建设和安全运营方面具有积极的现实意义^[2]。在山西某地高速公路穿越下伏采空区的工程建设中,通过建立双曲线预测模型,研发了“高速公路下伏采空区路基变形预测分析系统”,并在工程实践中得到了良好的验证效果。本文将从该系统研发思路、系统结构和功能、监测数据处理^[3]、变形预测方法选择和模型建立等方面做一些介绍和论述,对实际工程和相关研究是有意义的。

1 系统研发思想

在高速公路路基沉降变形监测预警系统研发中,首先要对路基沉降变形现场监测数据进行处理,获得进行变形预测分析所需要的数据,然后选择适合的变形预测模型,对路基地表工后沉降做出可视化(线图、数表)的变形预测分析和判断^[4],按照相关规范和设计要求,对预期沉降变形预警,以保障工程施工和运营期的安全。系统功能结构见图 1。

系统具备下述主要的功能:

1)在采空区域进行注浆处治后,需要对公路路基地表沉降变形进行监测,建立路基沉降变形观测数据库。数据库应具有录入和编辑(添加、修改、删除等)功能。数据库是实测数据库也是预测图形曲线的基础数据库。

2)基于现场实测数据,建立地表沉降变形预测模型,能够自动生成预测曲线。

3)根据相关规范和设计要求,设定允许工后沉降值,对公路路基工后沉降变形作出预测预警研判分析。

作者简介:康晋明,1968年生,男,山西兴县人,硕士,高级工程师,注册测绘师,主要从事精密工程测量及施工监测等工作。

E-mail:kjm68@163.com

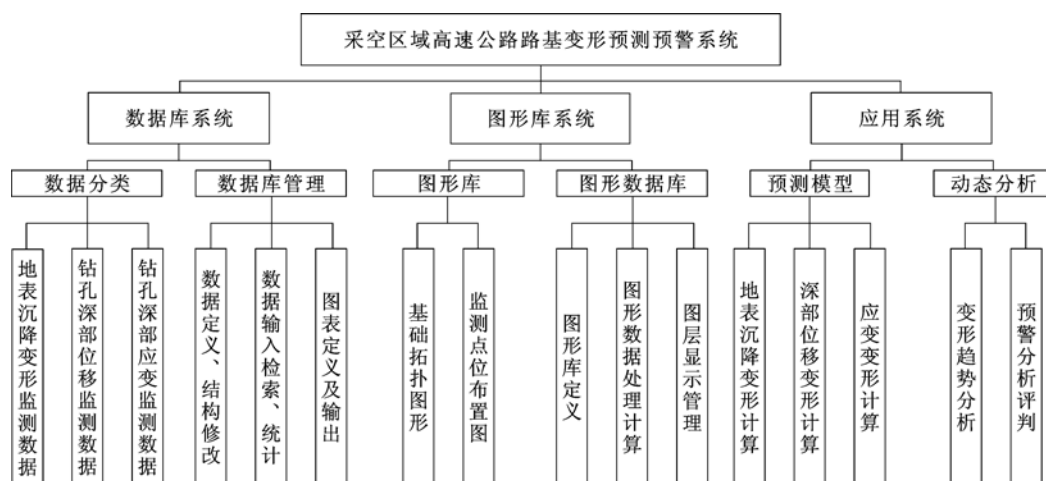


图1 沉降变形预警系统功能结构图

2 相关数据处理与分析

公路路基沉降变形监测预警系统的数据处理主要分为两部分:一是监测数据的前期处理,要完成沉降量、沉降速率和最终沉降量的计算;二是沉降变形预测曲线的拟合和分析。

2.1 监测数据的前期处理

主要讨论高速公路穿越采空区域地表沉降监测数据,编制数据库,对监测数据进行转换处理,用于后续地表工后沉降变形预测分析。

不同监测周期内各点的高程值之差,即为该点处地表沉降量,为了区分地表的沉降和隆起,设定向下沉降时符号为正,向上隆起时为负,则累积沉降量表达成公式为:

$$s_n = -(h_n - h_1) \quad (1)$$

式中: s_n ——从 T_1 时刻(第 1 期)开始到 T_n (第 n 期)的累积沉降量, m;

h_n ——第 n 期的实测高程, m;

h_1 ——实测的原始高程, m。

本期沉降量可表达为:

$$\Delta s_n = -(h_n - h_{n-1}) \quad (2)$$

式中: Δs_n ——第 n 期内的沉降量, m;

h_{n-1} ——第 $n-1$ 期的实测高程, m。

在沉降变形预测分析中,时间是一个很重要的因素,时间量可表达为:

$$t_n = T_n - T_1 \quad (3)$$

式中: t_n ——从第 1 期到第 n 期的累计时间, d;

T_n ——第 n 期的日期, d;

T_1 ——初始监测日期, d。

地表沉降速率可用下式解算:

$$\Delta v_n = \frac{\Delta s_n}{\Delta t_n} \quad (4)$$

上述各式中, $n=2, 3, 4, \dots$ 。

山西某高速公路采空区地表沉降监测数据及数据处理结果见表 1。

表1 采空区路基地表沉降监测数据

测点	各期次测点高程值			沉降量及沉降速率			
	首次 高程 h/m	第 23 天 高程 h_{n-1}/m	第 30 天 高程 h_n/m	本次下沉 /mm	累计下沉 /mm	本期沉降速率 mm/d	累计沉降速率 mm/d
1	952.780 0	952.779 5	952.779 0	0.5	1.0	0.022	0.033
2	953.035 4	953.035 1	953.034 5	0.3	0.9	0.013	0.030
3	952.064 0	952.063 8	952.063 4	0.2	0.6	0.009	0.020
4	949.815 9	949.815 4	949.815 0	0.5	0.9	0.022	0.030
5	958.024 3	958.024 1	958.023 9	0.2	0.4	0.009	0.013
6	958.899 7	958.899 5	958.899 2	0.2	0.5	0.009	0.017
7	959.495 2	959.494 8	959.494 4	0.4	0.8	0.017	0.027
8	960.740 9	960.740 4	960.739 9	0.5	1.0	0.022	0.033
9	960.921 8	960.921 6	960.921 6	0.2	0.2	0.009	0.007
10	960.950 9	960.950 7	960.950 6	0.2	0.3	0.009	0.010
11	942.439 4	942.439 2	942.439 1	0.2	0.3	0.009	0.010

2.2 双曲线法地表沉降模型的建立

在公路路基沉降预测中,常采用曲线拟合法,即采用与沉降曲线相似的曲线对沉降过程进行拟合,然后外延推求最终沉降量。曲线拟合方法一般有双曲线法、指数曲线法(三点法)、泊松曲线法^[5]等。双曲线法待定参数少且易于确定,预测的沉降变形发展规律与许多实际工程相符合,因而,被广泛应用于铁路与公路软基沉降预测中^[6-9]。

在系统中,双曲线法主要是通过采空区公路路基地表监测获得的沉降量,绘制路基沉降量 s -时间 t 的变形过程曲线图。在该方法中,假定沉降量 s 与时间 t 按“沉降平均速度呈双曲线递减”的规律变化,其表达式有两种:

$$s_t = s_0 + (s_\infty - s_0) \frac{t - t_0}{\alpha + t - t_0} \quad (5)$$

$$s_t = s_0 + \frac{t - t_0}{\alpha + \beta(t - t_0)} \quad (6)$$

式中: s_0 ——时间 T_0 时的沉降量,mm;

s_t ——从 T_0 时刻到 T 时刻的累计沉降量,mm;

s_∞ ——从开始监测到最后 T 时刻的最终沉降量,mm;

t_0 ——从开始监测(或参照时刻)到 T_0 时刻的监测时间,d;

t ——从开始监测(或参照时刻)到 T 时刻的监测时间,d;

α, β ——待求参数。

可将式(6)改写为:

$$\frac{t_i - t_0}{s_i - s_0} = \alpha + \beta(t_i - t_0) \quad (7)$$

设 $x_i = t_i - t_0, y_i = \frac{t_i - t_0}{s_i - s_0}$, 则式(7)化简为:

$$y_i = \alpha + \beta x_i \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha &= \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_1)^2 \sum_{i=1}^n \frac{t_i - t_1}{h_i - h_1} - \sum_{i=1}^n (t_i - t_1) \sum_{i=1}^n (t_i - t_1) \frac{t_i - t_1}{h_i - h_1}}{n \sum_{i=1}^n (t_i - t_1)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (t_i - t_1)\right)^2} \\ \beta &= \frac{n \sum_{i=1}^n (t_i - t_1) \frac{t_i - t_1}{h_i - h_1} - \sum_{i=1}^n (t_i - t_1) \sum_{i=1}^n \frac{t_i - t_1}{h_i - h_1}}{n \sum_{i=1}^n (t_i - t_1)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (t_i - t_1)\right)^2} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

2.3 预警标准的判定

参照《公路路基设计规范》(JTG D30—2004),并结合工程实际,设定相应的容许工后沉降(见表2)。当工后累积沉降超过该设定值,系统将给出预警提示。

当假设有 n 组监测数据时,可以得到以 α, β 为未知量的方程组。可表示为:

$$M_{n \times 2} X_{2 \times 1} = N_{n \times 1} \quad (9)$$

$$\text{其中: } M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_i & \cdots & x_n \end{bmatrix}^T, X =$$

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}, N = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_i \ \cdots \ y_n]^T (i=1, 2, \dots, n)$$

用最小二乘法求解线性回归后的 α, β 值。对式(9)两边各左乘 M^T ,化简后,可得:

$$\begin{bmatrix} n \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

从而解得:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \\ \beta &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

将求得的 α, β 和 t_0, s_0 代入式(6)中,即可获得任意时刻 t 的预估累计沉降量 $s(t)$,并绘制出相应的预测沉降曲线。其最终沉降量为:

$$s_\infty = s_0 + \frac{1}{\beta} \quad (12)$$

当使用双曲线法进行沉降预测时,其要求的已知量即为前期数据处理得到的累计沉降量 s_i 和监测时间 t_i 。监测时间从第1期开始计算,式(11)可表达为:

表2 容许工后沉降

道路等级	桥台与路堤相邻处	涵洞、通道处	一般路段
高速公路、一级公路	≤0.10 m	≤0.20 m	≤0.30 m
二级公路	≤0.20 m	≤0.30 m	≤0.50 m

3 系统功能的实现

使用 C++ 语言,在 Microsoft Visual Studio 2005 平台上进行程序开发和编译,研发建立采空区域高速公路路基变形预测预警系统。该系统实现的主要功能有:数据的添加、修改保存、删除和查看;计算沉降量,对地表工后沉降进行预测预警;绘制地面沉降预测曲线;生成沉降预测预警报告等。

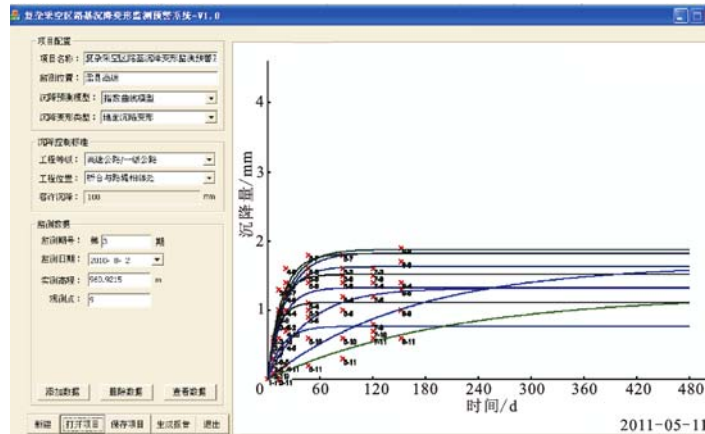


图2 地表沉降变形监测预测曲线

在实际工程应用中,判断采空区域工后沉降状态,以该区域内各个观测点的最终沉降量相比较,取其最大值,作为该观测区域的最终沉降量,与设定的容许沉降量作比较,小于允许沉降量的,视为可接受的,大于允许沉降量,则发出预警,需要采取工程处置措施。

4 结语

由于各地工程地质条件的差异性,以及采空区实际状态的高度复杂,加上采空区工程处置及治理的方式和效果也不尽相同,这都决定和影响了高速公路穿越采空区域后,路基工后沉降趋势和形态千差万别。对其剩余变形预测,行业内对此也进行了大量的研究和实践,但总体还是处于探索阶段。双曲线拟合方法,在类似工程地表变形预测中,也表现出了自己的优越性和缺陷。在本系统的研究开发中,结合实际工程,对地表沉降数据处理及预测模型的建立,作了谨慎的演算处理,系统建成后,通过现场实际采集数据,对预测模型和系统平台也作了验证和测试。当然,为了提高预测的可靠性,还可以增加钻孔深部沉降和钻孔深部应变监测等数据进行分类预测,这也是本系统的关注点。期望对类似工程建设和运营中的地表工后沉降预测工作有所裨益。

在山西某地高速公路穿越下伏采空区工程建设中,经过注浆处理后,采集了地表工后沉降前期数据,并由该系统生成了后续沉降预测曲线(见图2),根据地表沉降变形监测数据计算分析,说明该项目注浆处治效果良好,监测和预测结果吻合性较高,满足工程技术和质量要求。

参 考 文 献

- [1] 李 健,等. 双曲线模型在沉降监测预报中的应用[J]. 北京测绘,2012(1):41-43.
- [2] 王正晓,等. 高速公路采空区变形监测浅析[J]. 测绘通报,2003(1):44-46.
- [3] 黄声亨,等. 变形监测数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.
- [4] 张海清. 下伏采空区桥隧工程力学响应特征及变形趋势预测分析[D]. 秦皇岛:燕山大学,2010.
- [5] 刘 全. 高速公路软土路基沉降预测方法研究[D]. 南京:河海大学,2004.
- [6] 李国维,杨 涛,宋江波. 公路软基沉降双曲线预测法的进一步探讨[J]. 公路交通科技,2003(1):15-17.
- [7] 潘林有,谢新宇. 用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J]. 岩土力学,2004,25(7):1053-1058.
- [8] 李剑锋. 公路路基沉降预测方法及其改进措施综述[J]. 科技情报开发与经济,2007,17(36):281-283.
- [9] 孙常青,饶锡保,王月香. 沉降观测曲线的拟合和最终沉降量的确定[J]. 长江科学院院报,2002,19(5):58-61.

收稿日期:2012-06-27