

文章编号: 1000-7598-(2007) 08-1725-04

基于指数平滑法与回归分析相结合的滑坡预测

尹光志¹, 张卫中^{1,2}, 张东明¹, 康钦容¹

(1. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 2. 中南财经政法大学 安全科学与管理学院, 武汉 430074)

摘 要: 滑坡时间预报研究是滑坡研究中的一个热门课题。以实际监测数据为基础, 把指数平滑法与非线性回归分析法结合起来; 以滑坡的变形值和变形速率为判据, 对滑坡进行时间失稳的动态跟踪预报。根据某滑坡的实际情况, 对部分监测点位移进行了建模和预测, 预测结果表明, 该方法具有较高的精度, 可以应用于实际工程。

关 键 词: 指数平滑法; 非线性回归分析; 滑坡预测

中图分类号: TU 459

文献标识码: A

Forecasting of landslide displacement based on exponential smoothing and nonlinear regression analysis

YIN Guang-zhi¹, ZHANG Wei-zhong^{1,2}, ZHANG Dong-ming¹, KANG Qin-rong¹

(1. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. School of Safety Science and Administration, Zhongnan University of Economics and Law (ZUEL), Wuhan 430074, China)

Abstract: The landslide forecasting study is one of the hot problems in landslide research. Based on the actual observation data, the exponential smoothing and nonlinear regression analysis are integrated. According to the criterions of displacement and displacement velocity, the dynamic track prediction about the slippage time of landslide is introduced. In light of the practical landslide conditions, a model was established for the special displacement of some observation points; and the prediction based on this model was obtained with high accuracy. Therefore, the method can be used in practical engineering.

Key words: exponential smoothing; nonlinear regression analysis; prediction of landslide

1 引 言

滑坡是一种常见的地质灾害, 已成为威胁人类生存的主要自然灾害之一^[1]。滑坡的产生是一个缓慢的过程, 大量的试验研究和滑坡变形破坏行为的宏观观测和仪器监测的资料表明, 滑坡从孕育、发展到破坏, 一般经过较长的演化过程, 表现明显的蠕变特征, 位移与时间关系具有明显的蠕变曲线特征和明显的蠕变阶段, 即有减速蠕变、等速蠕变和增速蠕变等 3 个阶段, 因此及早地对滑坡进行正确的预测并采取相应的预防措施, 可以最大限度地减少灾害发生的损失。

滑坡预报研究是从 20 世纪 60 年代开始起步的, 已成为滑坡研究中的一个热门课题。由于滑坡

问题的复杂性, 滑坡时间预报目前还是一个世界性难题。国内外已取得了一些成果, 预报成功的也不乏其例, 但这些成功预报大多是通过监测工作实现的, 而运用什么样的理论模型进行预报, 并没有完全解决, 目前滑坡的时间预报还处于探索研究阶段。

滑坡的预测已有多种方法^[2,3], 各种方法都有自己的独到之处, 但也存在着相应的缺点和不足。指数平滑法是最常用的预测方法之一, 其优点是计算过程比较简单, 预测时所需观测值(或实际值)不多, 且能够对实际变化做出较为迅速的反应。

一般来说, 回归分析是研究一个变量或一组变量(即自变量)之变动对另一个变量(因变量)之变动的影 响程度, 其目的在于根据已知的自变量的变异

收稿日期: 2005-08-19 修改稿收到日期: 2006-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50374084)资助。

作者简介: 尹光志, 男, 1962 年生, 教授、博士, 博士生导师, 重庆大学资源及环境科学学院院长, 主要从事岩石力学与工程方向的研究工作。

来估计或预测因变量的变异情况。

如果把回归分析和指数平滑法结合起来,对滑坡的位移变化情况进行正确的预测,就能对滑坡时间做出预测。

2 基于指数平滑法与非线性回归分析相结合的滑坡预测原理

首先,通过研究与滑坡变形时间序列相似的非平稳时间序列的特征,采用三次指数平滑法来预测滑体上某一点在某时段内的变形值,后选取若干个观测时步的位移曲线作有限时段,采用与物体运动方程相似的抛物线函数:

$$X = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 \quad (1)$$

进行非线性回归。对反映了斜坡上监测点处的运动规律的公式对时间进行求导,即可得到

$$V = a_2 + 2a_3 t \quad (2)$$

式中 V 为测点的变形速率。

当确定滑坡的临界破坏速率 V_{cr} 后,根据式(2)就可求得滑坡的失稳时间:

$$T_0 = \frac{V_{cr} - a_2}{2a_3} \quad (3)$$

式中 a_2 、 a_3 为回归系数。

该预测模型的关键在于确定滑坡的临界破坏速率,但非常困难。一般采用已发生失稳的相似滑坡的破坏速率来确定或通过相似模型试验来确定。

2.1 三次指数平滑法建模原理^[4-6]

常用的趋势型指数平滑法包括 1 次指数平滑、2 次指数平滑和 3 次指数平滑。

1 次指数平滑计算公式为

$$S_t^{(1)} = aY_t + (1-a)S_{t-1}^{(1)} \quad (4)$$

2 次指数平滑是在 1 次指数平滑的基础上作一次平滑,其计算公式为

$$S_t^{(2)} = aS_t^{(1)} + (1-a)S_{t-1}^{(2)} \quad (5)$$

3 次指数平滑是在 2 次指数平滑的基础上再作一次平滑,其计算公式如下:

$$S_t^{(3)} = aS_t^{(2)} + (1-a)S_{t-1}^{(3)} \quad (6)$$

式中: a 为平滑系数, $a \in [0, 1]$; $S_t^{(1)}$ 、 $S_t^{(2)}$ 、 $S_t^{(3)}$ 分别为 t 期的 1~3 次指数平滑值; $S_{t-1}^{(1)}$ 、 $S_{t-1}^{(2)}$ 、 $S_{t-1}^{(3)}$ 分别为 $t-1$ 期的 1~3 次指数平滑值; Y_t 为第 t 期的实际测量值。

3 次指数平滑预测模型:

$$\hat{Y}_{t+T} = a_t + b_t T + c_t T^2 \quad (7)$$

其中

$$a_t = 3S_t^{(1)} - 3S_t^{(2)} + 3S_t^{(3)} \quad (8)$$

$$b_t = \frac{a}{2(1-a)^2} [(6-5a)S_t^{(1)} - 2(5-4a)S_t^{(2)} + (4-3a)S_t^{(3)}] \quad (9)$$

$$c_t = \frac{a^2}{2(1-a)^2} [S_t^{(1)} - 2S_t^{(2)} + S_t^{(3)}] \quad (10)$$

式中: $\hat{Y}_{t+T}$ 为第 T 期的预测值; T 为 t 期后的期数; a_t 、 b_t 、 c_t 为平滑系数,其他符号的意义同前。

在指数平滑预测中确定合适的 a 值起着重要的作用。其大小体现了观测值与预测值间的比例关系。 a 的选取,一般根据最小均方差的原则,即在 0~1 之间取不同的值进行预测,分别计算均方差,取其中最小均方差对应的平滑常数作为正式预测的平滑常数 a 。也可凭经验选取几个不同的 a 值进行试算,选择其中误差最小的值。初始值的确定通常有两种方法: $S_0^{(1)} = S_0^{(2)} = S_0^{(3)} = Y_1$, 或者是 $S_0^{(1)} =$

$$\frac{1}{n} \left| \sum_{i=1}^n Y_i \right|, S_0^{(2)} = \frac{1}{n} \left| \sum_{i=1}^n S_i^{(1)} \right|, S_0^{(3)} = \frac{1}{n} \left| \sum_{i=1}^n S_i^{(2)} \right|。$$

实际预测时,3 次曲线指数平滑法的初始值依赖于前两个时期的观测值,一般取 $S_0^{(1)} = S_0^{(2)} = S_0^{(3)} = Y_1$ 。

2.2 非线性回归分析

很多实际问题中,当从散点图或机理分析判断两变量之间的关系不是线性关系时,应考虑曲线拟合。

一般非线性模型的形式^[7]为

$$Y = f(x, \theta) + \varepsilon \quad (11)$$

式中: f 为一般的函数; θ 为 p 维参数向量; ε 为一维随机误差变量, $E(\varepsilon) = 0$, $V_{cr} = \sigma^2$ 。

按“最小二乘法”拟合曲线,就是求 θ 的估计值 $\hat{\theta}$, 使

$$\min S(\theta) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, \theta)]^2 \quad (12)$$

再将 $\hat{\theta}$ 的值代入 $f(x, \theta)$, 得到拟合曲线 $Y = f(x, \hat{\theta})$, 问题转化为求解非线性规划问题。然而, $\hat{\theta}$ 的求解并非是一件容易的事,因为一般地进行叠代的方法,这牵涉到叠代时许多问题,比如,叠代时是否收敛,如果发散将无法算到所求的解,选初值是否恰当,改进的高斯-牛顿叠代法可以解决上述问题。

2.3 预测步骤

①详细分析监测点原始数据，对时间非等间距的原始数据进行等间距插值处理；

②对监测点位移建立指数平滑模型并预测；

③对预测结果进行非线性回归分析，判断滑坡的发展情况。

基于指数平滑法与回归分析相结合的滑坡预测的另一个关键问题就是根据监测点变形的时间序列的变化趋势选择适当的指数平滑模型，而平滑系数 a 的正确选取则是关系到预测准确性的重要因素。

3 工程应用

本次研究的向家坡滑坡位于渝黔高速公路 k13+500~k13+960 段。滑坡区分布的地层为第四系全新统地层和侏罗系下统珍珠冲组 (J_{1z})、自流井组 (J_{1-2z}) 和三叠系上统须家河组 (T_{3xj})。滑坡主要发生在第四系滑坡堆积层 (Q_4^{del}) 和第四系全新统崩积层 (Q_4^{col+dl})。滑坡体主要由粉质黏土夹碎块石及强风化砂泥岩组成，属于土岩混合型滑坡，滑体范围内的岩体结构松散，含水率高，不稳定、易变形。

通过土层及滑面分析，该滑坡为由浅层、中层及深层组成的多层次的滑坡。前期经过了两次不太成功的治理。2004 年 6~8 月，坡顶发现裂隙，滑坡体仍然缓慢位移。前排桩已向公路倾斜为主，半

坡桩出现坡外倾斜、下沉，整个滑坡体欠稳定。如果发生滑坡将直接危及公路及立交桥正常营运，抢险工程迫在眉睫。笔者对向家坡滑坡的变形情况进行了监测，监测点布置见图 1。

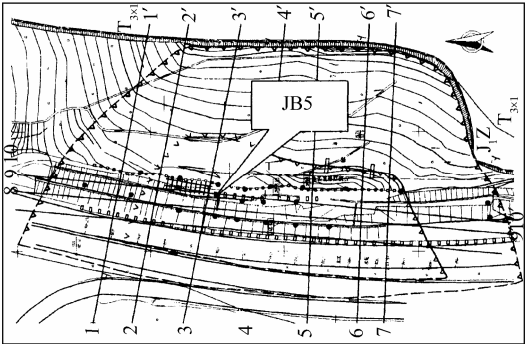


图 1 向家坡监测布置平面图
Fig.1 The monitoring plan of Xiangjiapo landslide

向家坡滑坡变形的时间序列具有明显的不断增加趋势，且具有明显的非线性，故可以应用 3 次指数平滑法进行预测。

本次对该高速公路滑坡部分监测点空间位移进行了建模和预测。表 1 为对 JB5 位移实测值及平滑指数法预测结果。由表 1 预测可知，预测结果最大误差不超过 3 %，在允许范围之内，满足精度要求。说明该模型能很好的应用于滑坡时间序列的预测。

表 1 向家坡滑坡 JB5 位移实测值及预测结果
Table 1 Actual and predicted displacements of No.JB5 monitoring point in Xiangjiapo

观测总 时间/周	x_t /mm	$s_t^{(1)}$ /mm	$s_t^{(2)}$ /mm	$s_t^{(3)}$ /mm	A_t /mm	B_t /mm	C_t /mm	$\hat{y}_t$ /mm	误差 /%
1	32.300	32.300	32.3	32.300					
2	48.600	45.340	42.732	40.646	48.470	18.778	4.173		
3	69.600	64.748	60.345	56.405	69.615	25.027	3.707	71.420	-2.615
4	96.370	90.046	84.105	78.565	96.386	30.162	3.201	98.348	-2.053
5	128.700	120.969	113.596	106.590	128.708	35.355	2.932	129.748	-0.814
6	168.200	158.754	149.722	141.096	168.190	42.607	3.240	166.996	0.716
7	207.870	198.047	188.382	178.925	207.919	41.983	1.662	214.038	-2.967
8	256.400	244.729	233.460	222.553	256.361	50.877	2.900	251.564	1.886
9	306.800	294.386	282.201	270.271	306.827	52.831	2.045	310.138	-1.088
10								361.703	

对预测结果进行回归分析，并与观测值相比较，如图 2 所示，则经回归分析所拟合的 2 次函数方程为

$$y = 2.328 \ 8t^2 + 11.433t + 15.563 \quad (13)$$

相关系数： $R^2 = 0.999 \ 3$ ，则

$$T_0 = \frac{V_{cr} - a_2}{2a_3} = \frac{V_{cr} - 11.433}{2 \times 2.328 \ 8} \quad (14)$$

根据工程经验，结合向家坡滑坡监测资料整理

分析可得, 规模较小的向家坡浅层滑坡的临界变形破坏速率为每周 255 mm。则滑坡的失稳时间为距最近测量时间约为 52 周。但考虑到目前施工对滑坡移动速度的影响以及即将到来的雨季对滑坡的诱发作用。本监测组提出了对浅层滑坡进行临时支护处理和加快抗滑桩施工的建议, 施工单位根据监测结果, 调整了施工工序, 避免了滑坡灾害的发生。

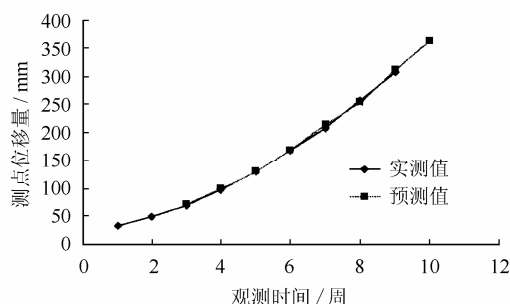


图2 向家坡 JB5 监测点位移实际及预测曲线

Fig.2 Actual and predicted displacement curves of No. JB5 monitoring point in Xiangjiapo

4 结 论

本文根据向家坡滑坡实际监测资料, 采用指数平滑法和非线性回归分析相结合的方法, 对该滑坡进行了预测。研究表明, 该方法具有较高的精度, 预测结果可用于指导现场施工, 修正设计方案, 实现滑坡治理的动态管理。

参 考 文 献

- [1] 杨达源, 闫国年. 自然灾害学[M]. 北京: 测绘出版社, 1993.
- [2] 文海家, 张永兴, 柳源. 滑坡预报国内外研究动态及发展趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 2—4.
WEN Hai-jia, ZHANG Yong-xin, LIU Yuan. At home and abroad investigation tendency of landslide forecast[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**: 2004, 15(1): 2—4.
- [3] 林鲁生, 冯夏庭, 白世伟, 等. 人工神经网络在边坡位移预测中的应用[J]. 岩土力学, 2002, 23 (4): 508—510.
LIN Lu-sheng, FENG Xia-ting, BAI Shi-wei, et al. Application of artificial neural network to prediction of sliding slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**. 2002, 23(4): 508—510.
- [4] 肖庭延. 实用预测技术及应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993.
- [5] 吕金虎, 陆君, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [6] 项静恬, 史久恩. 非线性系统中数据处理的统计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [7] 齐欢. 数学模型方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000.
- [6] Zhao X H, Cao M B, Lee I K, Valliappan S. Soil-structure interaction analysis and its application to foundation design in Shanghai[A]. **Proceedings of 5th International Conference on Numerical Methods in Geo- mechanics**[C]. Japan: Nagoya, 1985: 805—811.
- [7] Katzenbach R, Arslan U, Gutwald J, Holzhauserl J. Soil-structure-interaction of the 300m high Commerzbank tower in Frankfurt am Main measurements and numerical studies[A]. **Proceedings of 14 International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg**[C]. [s. l.]: [s. n.]. 1997: 1 081—1 084.
- [8] 胡春林, 李坤, 杨志勇, 等. 复杂地质条件下高层筒桩筏现场监测与综合分析[J]. 岩土力学, 2003, 24 (4): 673—676.
HU Chun-lin, LI Kun, YANG Zhi-yong, et al. Field monitoring and comprehensive analysis of piled raft foundation for tall building under complex conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 673—676.
- [9] 张关林, 石礼文. 金茂大厦——决策、设计、施工. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [10] MORI, KPF, LERA, ECADI. Shanghai world financial center--structural preliminary design report[R]. [s. l.]: [s. n.]. 2000.
- [11] Zhao X H, Gong J, Zhang B L. A study on super-long pile-foundation interaction for super-tall building in Shanghai[J]. **Computers and Geotechnics** 2006.
- [12] 赵锡宏, 龚剑. 桩筏(箱)基础的荷载分担实测、计算和机理分析. 岩土力学, 2005, 26 (3): 337—342.
ZHAO Xi-hong, GONG Jian. Load-sharing between pile and raft or box in field experiment, calculation and mechanism analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**. 2005, 26(3): 337—341.

上接第 1699 页

629—634.