

排桩冻结法深基坑支撑轴力时间序列动态预测

赵燕容 袁宝远 陈艳国 李爱国 任丽芳

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 结合润扬长江公路大桥南汊悬索桥南锚碇基坑采用排桩冻结法的工程实际,对深基坑支撑轴力监测数据,采用时间序列分析方法建立了时间序列动态预测模型,分析、预测基坑支撑轴力,及时修改设计方案,为该基坑的安全施工提供了技术保障,为排桩冻结法新技术应用于深大基坑工程提供了经验。

关键词 排桩冻结法;深基坑;支撑轴力;时间序列;动态预测

中图分类号: TU473.1+6 文献标识码: B 文章编号: 1006-764X(2005)S1-0112-04

对于大型建筑物来说,基坑的施工关系到整个建筑物的施工安全和将来的运营.因此,基坑施工的动态监测对于那些采用施工新技术的基坑工程来说显得尤为重要.准确进行动态预测不仅可为基坑工程的安全施工提供可靠保证,而且还能为其新工艺的推广和应用提供经验.通常采用仪器对基坑工程进行安全监测,并及时处理和分析监测数据.目前,常用的监测数据的处理方法有回归分析法、灰色理论分析法及神经网络方法等.近年来,时间序列分析方法因其可以处理动态数据、短期预测精度较高等优点,在工程实际中得到了广泛应用.本文结合润扬长江公路大桥南汊悬索桥南锚碇采用排桩冻结法新技术的工程实际,对深基坑支撑轴力监测数据,采用时间序列分析方法建立数学模型,并通过数学模型对其进行预测和预报.

1 时间序列分析方法简介

1.1 时间序列的线性模型

a. 自回归 $F_{AR}(p)$ 模型. 如果随机过程 X_t ($t = 0, \pm 1, \dots$) 的观测值,与其自身前一个或前 n 个时刻的观测值 X_{t-1}, X_{t-2}, \dots 有关,或有依赖性.此时 X_t 与其前一个时刻或前几个时刻的观测值之间的回归模型为

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + a_t \quad (1)$$

我们称式(1)为 p 阶自回归模型,记作 $F_{AR}(p)$.其中实数 φ_j ($j = 1, 2, \dots, p$) 称为自回归系数, a_t 表示残差,且满足

①均值为零: $E(a_t) = 0$

②相互独立: $\gamma_k = E(a_t a_{t+k}) = \begin{cases} \sigma^2 & k = 0 \\ 0 & k \neq 0 \end{cases}$

③服从正态分布: $a_t \sim N(0, \sigma^2)$

④ a_t 与前一时刻的 X_{t-k} ($k > 0$) 互不相关: $E(a_t X_{t-k}) = 0$ ($k > 0$),又常称 a_t 为白噪声.

b. 滑动平均 $F_{MA}(q)$ 模型. 若 $\{X_t\}$ 为零均值的平稳时间序列,则定义

$$X_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (2)$$

为 q 阶滑动平均模型,记作 $F_{MA}(q)$,其中 θ_i ($i = 1, 2, \dots, q$) 称为滑动平均系数.

c. 自回归滑动平均 $F_{ARMA}(p, q)$ 混合模型. 在实际问题中,更一般的随机序列 X_t ($t = 0, \pm 1, \dots$) 可用方程

$$X_t - \varphi_1 X_{t-1} - \varphi_2 X_{t-2} - \dots - \varphi_p X_{t-p} = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (3)$$

来描述.其中 φ_j ($j = 1, 2, \dots, p$), θ_i ($i = 1, 2, \dots, q$) 为参数,称式(3)为 p 阶自回归 q 阶滑动平均混合模型,记作 $F_{ARMA}(p, q)$.

1.2 模型的识别

所谓模型识别就是根据时间序列 $\{X_t\}$ 的一段样本(即观测得到的一串有序数据) $\{X_t\}$ ($t = 1, 2, \dots, N$) 所包含的信息,利用它们的某些特征来寻求与它拟合得最好的模型.其中特征主要有自相关函数和偏相关函数.

1.2.1 自相关函数

设 x_1, x_2, \dots, x_N 为零均值平稳时间序列 $\{X_t\}$ 的

一段样本观测值. 定义样本自协方差函数为

$$\hat{\gamma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} x_i x_{i+k} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (4)$$

样本自相关函数为 $\hat{\rho}_k = \hat{\gamma}_k / \hat{\gamma}_0$, $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

为了保证 $\hat{\gamma}$ 充分接近 γ_k , $\hat{\rho}_k$ 充分接近 ρ_k ($k = 0, 1, 2, \dots, K$), N 需要取得很大. 但 K 相对于 N 不能取得太大, 否则就不能保证 $N - K$ 相当大. 一般取 $K < N/4$, 常用 $K = N/10$.

1.2.2 偏相关函数

同理可定义样本偏相关函数

$$\begin{bmatrix} \hat{\phi}_{k1} \\ \hat{\phi}_{k2} \\ \vdots \\ \hat{\phi}_{kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \hat{\rho}_1 & \cdots & \hat{\rho}_{k-1} \\ \hat{\rho}_1 & 1 & \cdots & \hat{\rho}_{k-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\rho}_{k-1} & \hat{\rho}_{k-2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{\rho}_1 \\ \hat{\rho}_2 \\ \vdots \\ \hat{\rho}_k \end{bmatrix} \quad (5)$$

从而可求得样本偏相关函数 $\hat{\phi}_{kk}$.

1.2.3 模型识别准则

由前面分析可以得出平稳序列 X_t 为各种模型的特征, 总结如下:

a. 若 X_t 的自相关函数 $\hat{\rho}_k$ 具有拖尾性 (即指数衰减或振荡而无限拖尾), 偏相关函数 $\hat{\phi}_{kk}$ 具有截尾性 (即有限长度截断), 则可判断 X_t 是 AR 序列.

b. 若 X_t 的自相关函数 $\hat{\rho}_k$ 具有截尾性, 偏相关函数 $\hat{\phi}_{kk}$ 具有拖尾性, 则可判断 X_t 是 MA 序列.

c. 若 X_t 的自相关函数 $\hat{\rho}_k$ 和偏相关函数 $\hat{\phi}_{kk}$ 都不具有截尾性, 而具有拖尾性, 则可判断 X_t 是 ARMA 序列.

1.2.4 模型阶数的确定

a. 对于 $F_{AR}(p)$ 序列和 $F_{MA}(q)$ 序列, 可求出 $\hat{\rho}_k$ 和 $\hat{\phi}_{kk}$, 然后根据模型的截尾步数确定阶数, 如果 n 步截尾, 那么就可以判定模型为 n 阶.

b. 对于 $F_{ARMA}(p, q)$ 序列, 由于其自相关函数 $\hat{\rho}_k$, 偏相关函数 $\hat{\phi}_{kk}$ 均不截尾, 所以没有像 $F_{AR}(p)$, $F_{MA}(q)$ 序列那样有明显的识别法则. 由于 $\hat{\rho}_k$ 与 $\hat{\phi}_{kk}$ 都是拖尾的, 因此 $F_{ARMA}(p, q)$ 序列的阶数 (p, q) 难以判定, 一般采用由低阶到高阶逐个试探, 如取 (p, q) 为 (1, 1), (1, 2), ... 直到经验认为模型合适为止.

1.3 模型参数的最小二乘估计

令 $t = n, n+1, \dots, N$ (其中 n 为阶数, N 为样本数) 用矩阵形式表示为

$$y = x\varphi + a \quad (6)$$

式中: $\varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]^T$; $y = [x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_N]^T$; $a = [a_{n+1}, a_{n+2}, \dots, a_N]^T$;

$$x = \begin{bmatrix} x_n x_{n-1} & \cdots & x_1 \\ x_{n+1} x_n & \cdots & x_2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-1} x_{N-2} & \cdots & x_{N-n} \end{bmatrix}$$

根据多元回归理论, 参数矩阵 φ 的最小二乘法估计为: $\varphi = (x^T x)^{-1} x^T y$.

1.4 模型的拟合与预报

设 $\{X_t\}$ 是零均值的平稳正态序列, 根据现在时刻 t 和已往各时刻的观测值: X_t, X_{t-1}, \dots 的历史资料, 对未来时刻 $t+k$ ($k \geq 1$) 的随机变量 X_{t+k} ($k \geq 1$) 作出估计, 这称为 k ($k \geq 1$) 步预报, 其估计值就是预报值, 记为 $\hat{X}(k)$.

其最佳预测公式为

$$\hat{x}(k) = \sum_{i=1}^{k-1} \varphi_i \hat{x}(k-i) + \sum_{i=1}^n \varphi_i x_{t+k-i} \quad (1 < k \leq n) \quad (7)$$

式中 $\hat{x}(k)$ 表示预测值, x_t 表示经处理后的观测数据. 当 $k=1$ 时, 即一步预测公式为

$$\hat{x}(1) = \sum_{i=1}^n \varphi_i x_{t+k-i} \quad (8)$$

2 实例分析

2.1 工程概况

润扬长江公路大桥位于镇扬汽渡上游约 1.5 km 处, 北起扬州, 南至镇江润州镇扬汽渡上游, 横跨南汉江、世业洲. 北汉为斜拉桥, 南汉为悬索桥, 南北汉以中州为过渡, 南汉南塔位于镇扬汽渡上游, 北塔位于中州. 其中南汉江采用跨度 1490 m 单孔双绞钢箱梁悬索桥, 其跨度为目前国内第一、亚洲第二、世界第三. 南北锚碇均采用深大基坑. 润扬长江公路大桥南汉悬索桥南锚碇中心距江边大堤 540 m, 南锚碇基础尺寸为 70.50 m × 52.50 m × 29.00 m (长 × 宽 × 深), 为特大型嵌岩深基坑工程. 工程采用 1500 mm 钻孔灌注桩和 1.30 m 冻结壁止水帷幕的新型基坑围护形式. 采用这种基坑围护结构在桥梁建设中尚属首次, 对工程的设计和施工提出了更高的要求, 因此, 加强基坑支撑轴力的动态监测对优化设计和保障施工十分必要. 为保证基坑施工的安全, 在基坑开挖过程中, 每开挖一段就浇筑一道支撑, 一共浇筑了 7 道内支撑; 同时, 在每道支撑布置 4 组断面, 每组断面有两个应力监测点和两个应变监测点, 通过应力应变监测值换算成支撑轴力值 (图 1).

2.2 实测轴力数据时间序列分析

取第二道支撑的 4 组断面作为研究对象 (A, B, C, D 共 4 组). 取它们 2002 年 3 月 11 日至 4 月 28 日共 49 d 的数据进行分析, 其中取前 40 d 的数据进行计算, 建立时间序列模型, 以后 9 d 的数据作为预报的比较. 作 4 组支撑轴力随时间变化曲线如图 2 所示.

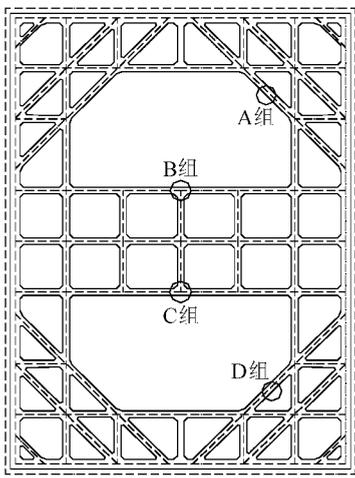


图1 南锚碇内支撑轴力监测点平面布置

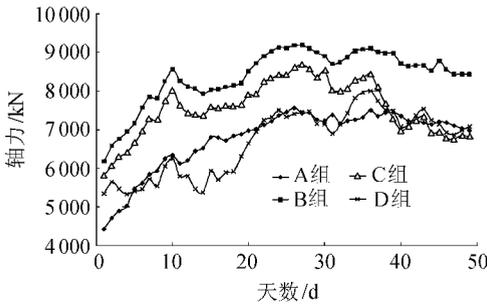


图2 第二道支撑4组轴力随时间变化曲线

2.2.1 建立时间序列模型

a. 数据的前期处理. 由于建立时间序列模型的数据要求为平稳、零均值, 因此对于采集得到的数据要求进行差分运算, 以得到平稳、零均值的时间序列, 这是建模的基础.

b. 模型的识别. 根据自相关函数和偏相关函数的计算公式, 求得自相关函数与偏相关函数, 绘制曲线图(图3). 根据前文提到的关于模型识别原则和模型阶数确定方法, 我们可以看出4组数据都符合 $F_{AR}(1)$ 模型.

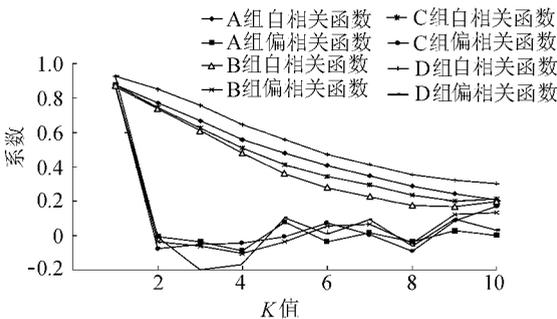


图3 4组数据的自相关函数与偏相关函数分析曲线

c. 模型参数确定. 根据最小二乘法原理, 利用 Matlab 计算出参数 φ (见表1).

2.2.2 模型的拟合与预报

通过以上的计算和分析, 就可以建立时间序列模型了, 然后根据预报公式, 分别计算出向前1步、2

步和3步预测值, 从而得到各组实测值的拟合值和预测值, 如图4~7所示.

表1 4组数据模型的参数值

参数	A组	B组	C组	D组
φ	0.8920	0.8707	0.8823	0.9343

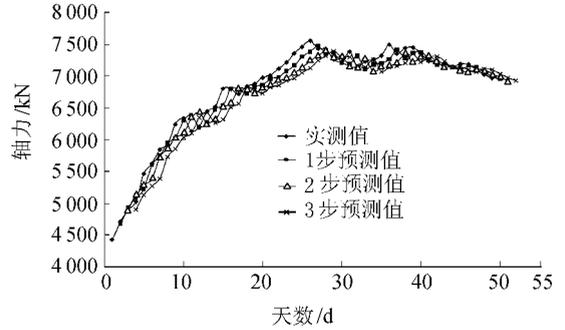


图4 A组支撑轴力实测值与预测值对比

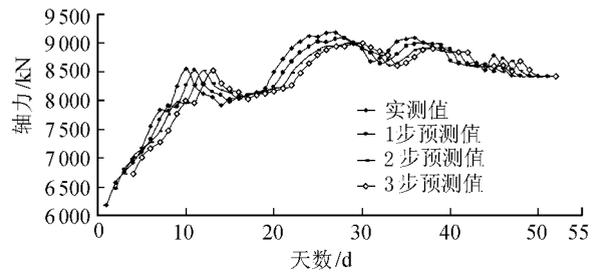


图5 B组支撑轴力实测值与预测值对比

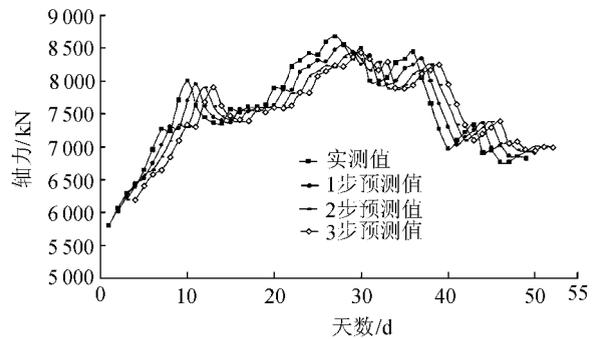


图6 C组支撑轴力实测值与预测值对比

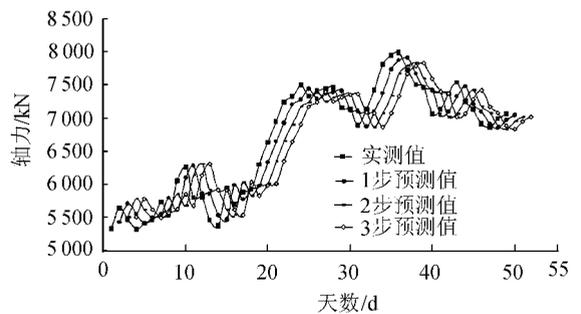


图7 D组支撑轴力实测值与预测值对比

a. 由第二道支撑的4组轴力随时间变化曲线可以看出, 在初期轴力有明显的上升趋势, 这是由于当初在设计时对冻胀力的考虑不够充分所致, 后来随着对冻胀力的足够重视, 在施工过程中采取了打

泄压孔和修改基坑内部支撑设计方案等措施,支撑轴力逐渐稳定。可见,监测工作可以对工程的安全施工和不断修正、优化设计提供有价值的参考。

b. 通过对图 4~7 四组实测值与预测值对比分析,不难发现预报序列与实测序列变化趋势基本一致,说明本文模型具有良好的模拟效果和自适应性,基本能反映实际轴力变化情况。为了得到关于时间序列模型的更深入认识,我们进行了 2 步预报和 3 步预报,从结果可以看出,随着预测步数的增加,预报精度也随之下降,其最大误差 δ_{\max} 和平均误差 $\bar{\delta}$ 也逐渐增加(见表 2)。此外我们还发现, A 组和 B 组的预测效果明显要好于 C 组和 D 组,分析当时施工情况不难发现, C 组和 D 组所在位置当时安装有塔吊等起重设备,表明施工对监测数据有着明显的干扰。

表 2 4 组轴力数据预测误差值 %

预测步数	A 组		B 组		C 组		D 组	
	δ_{\max}	$\bar{\delta}$	δ_{\max}	$\bar{\delta}$	δ_{\max}	$\bar{\delta}$	δ_{\max}	$\bar{\delta}$
1 步预测值	4.52	1.41	4.20	1.39	6.42	2.23	8.25	3.06
2 步预测值	4.52	2.23	6.93	2.07	9.56	3.54	10.05	4.33
3 步预测值	7.90	2.70	7.28	2.88	13.94	4.70	15.57	5.21

3 结论与建议

a. 时间序列动态预测对基坑安全监测工作具

(上接第 109 页) c_f 为阻力系数; ρ 为水的密度; a_0 为波浪作用下水质点在床面附近的水平方向振幅; L 为水面波波长; h 为水深; T 为周期。

式(10)的左侧也就是希尔兹希在分析单向流中泥沙起动时所用的参数,由式(11),作用于坝坡上的波浪起动拖曳力条件可以转化成起动流速条件,而起动流速可由式(12)计算,这样公式(10)所计算出的抛石代表粒径是波浪高、周期等的函数。再依据从坝坡稳定性方程建立起的抛石粒径与波浪浪高、坝坡等设计参数的函数关系式(式(1)),这样综合考虑就找到了既有理论依据又能够应用于水库防浪抛石护坡实际工程中的一般关系式,从而扩大了应用范围。由于目前对于波浪高、周期等没有统一的公式,而且不同的坝坡取决于回落波还是涌波也是不一样的,所以本文没有给出抛石护坡的统一计算式,可根据不同情况采用公式(2)或式(6)或(10)分别计算抛石粒径,结合工程安全、抛石稳定等因素选取最佳抛石粒径。

5 结论与建议

水库抛石护面是最为古老的一种护面形式之

有一定的参考价值。

b. 时间序列预测模型具有很强的自适应性,预测精度较高,但随着预测步数的增加预报效果也随之下降。

c. 工程的施工干扰对数据的准确采集有着明显的影响,所以在进行监测工作时应注意减少工程施工对监测的不良影响。

d. 时间序列预测模型在进行短期预报时有着很好的效果,但如何进一步提高时间序列预测模型的预报周期尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] 田铮. 动态数据的处理与方法[M]. 西安:西北工业大学出版社,1995:25-48.
- [2] 吴中如,沈长松,阮焕祥. 水工建筑物安全监控理论及应用[M]. 南京:河海大学出版社,1990:36-52.
- [3] 华似韵. 随机过程[M]. 南京:东南大学出版社,1988:1-10.
- [4] 汪荣鑫. 随机过程[M]. 西安:西安交通大学出版社,1987:3-15.
- [5] 夏乐天,朱永忠. 工程随机过程[M]. 南京:河海大学出版社,2000:163-180.
- [6] 张树京,齐立心. 时间序列分析简明教程[M]. 北京:清华大学出版社,2003:78-87.

(收稿日期:2005-09-08 编辑:马敏峰)

一,其料源广泛、造价低廉、易于施工,但缺乏系统的设计方法,本研究基于坝坡稳定方程来确定抛石粒径,从工程运行情况来看效果较好。事实上抛石设计中波浪因素是较难确定的,这进一步增加了设计方法所得结果的不确定性。另外采用何种粒径作为计算代表粒径是值得研究的。本文从抛石的起动拖曳力角度建立了可用于设计的代表粒径公式,在实际应用中可结合坝坡稳定性公式综合考虑选优,对设计具有一定的指导意义和应用价值。

参考文献:

- [1] 斯蒂芬森 D. 堆石工程水力计算[M]. 北京:海洋出版社,1984:221-225.
- [2] 中华人民共和国水利部. SL274—2001 碾压式土石坝设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [3] 左东启,王世夏,林益才. 水工建筑物[M]. 北京:海洋出版社,1984:221-225.
- [4] 钱宁. 泥沙运动力学[M]. 北京:水利电力出版社,1980.

(收稿日期:2005-05-09 编辑:骆超)