

# 广元市金洞乡 II 号滑坡系统演化的非线性动力学反演分析

刘宏<sup>1</sup>, 邓荣贵<sup>2</sup>, 张倬元<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川成都 610059; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610072)

**摘 要:** 本文在研究广元市金洞乡 II 号滑坡位移特征基础, 认为该滑坡正处于开放的、复杂的非线性动力学系统中。在滑坡系统诸要素中, 宝珠寺库水位的升降已成为系统演化的控制力量。坡体位移是系统演化的主要状态变量, 但北部坡体、南部坡体与中部坡体之间的滑动变形具较强的独立性, 单一的位移序列不能较好的反映滑坡的演化特征。因此, 文中以两列独立的位序列为状态变量, 结合控制变量建立了滑坡系统演化的非线性动力学模型, 并从现有的变形监测资料进行滑坡系统的非线性动力学反演和稳定学反演和稳定性评价。

**关键词:** 滑坡; 非线性动力学反演分析; 稳定性评价

**中图分类号:** P642.22

**文献标识码:** A

## 1 前言

非线性理论认为非线性是滑坡及其组成岩体的本质属性, 滑坡和岩体都处于开放的、复杂的非线性动力学系统中。非线性决定了系统演化具分岔、混沌等特征, 此外, 能量流和物质流的传递使系统还具有耗散结构性质。因而, 滑坡系统是确定性与随机性同时并存的复杂系统, 以往所用的“一一对应”的确定性理论或“一对多”的概率理论, 均不能全面描述系统的演化方式及其力学行为。非线性动力学则从滑坡系统内部的动力学性质出发, 研究系统内在的本质规律。但由于滑坡系统高度的非线性特征所表现出的复杂性, 使滑坡演化的非线性动力学机制分析, 并从现有的时间序列资料进行滑坡系统的非线性动力学反演分析和稳定性评价。

## 2 滑坡位移基本特征

金洞乡 II 号滑坡位于四川省广元市市中区金洞乡集镇上, 该集镇始建于 1992 年, 1995 年底基本建成投入使用。1997 年宝珠寺库水位上升至 565m 高程, 集镇场坝未出现变形滑动现象。1998 年库水位升至 585.12m 高程, 同年 12 月库水位开始消落, II 号滑坡自上而下出

现蠕滑拉裂现象。此后, 随着库水位的升降, II 号滑坡间歇性出现蠕滑拉裂现象, 具体阐述如下。

图 1 为 1999 年 3 月到 2000 年 4 月滑坡体滑动的水平位移矢量图。就坡体水平位移量而言, 自西向东可划分为三个部分, CDE 线以东坡体的位移量最大, 平均为 150cm, AB 线与 CDE 线之间的位移量次之, 平均为 100cm, AB 线以西坡体位移量最小, 平均为 50cm。从南向北表现为北部坡体位移量最大, 平均为 150cm, 南部坡体位移量次之, 平均为 100cm, 中部坡体位移量最小, 平均为 70cm。就位移方向而言, AB 线以西, 坡体位移总体偏向下游, 从北向南偏移量逐渐增大; AB 线以东, 坡体位移总体偏向上游, 从南向北偏移量逐渐增大。

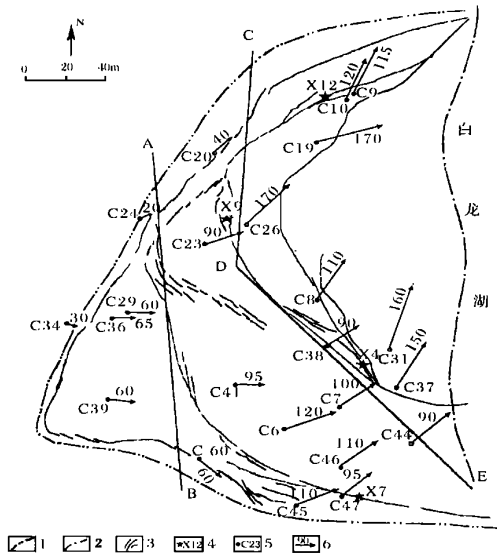
图 2 为同期滑体内各裂缝带的相对位移监测结果, 其结果表明 II 号滑坡最明显的特征是滑动变形与白龙湖库水位的升降紧密相关, 受降雨的影响较小。并且在库水位升降过程中, 均存在某一临界水位(570m), 当库水位低于该临界值时, 滑坡滑动变形剧烈, 当库水位高于该临界值时, 即使库水位的变化速率很大, 滑坡体的滑动变形仍十分微弱。如在库水位上升过程中, 从 1999-06-02~1999-06-21, 库水位从 558.96m 上升至 567.821m, 上升速

收稿日期: 2002-01-21。

作者简介: 刘宏(1976-), 男(汉族), 云南省普洱县人, 现为成都理工学院工程地质研究所博士研究生。主研方向: 岩体稳定, 地质灾害等。电话(028)2976458; E-mail: liuhggg@263.net

率平均为 443mm/d, X12 号监测点的水平位移速率平均为 11.25mm/d, 而 1999-01-21 ~ 1999-07-26, 库水位从 567.821m 上升至 585.781m, 上升速率平均为 513mm/d, 但 X12 号监测点的水平位移速率仅为 0.04mm/d。在库水位下降过程中, 从 1999-03-15 ~ 1999-04-05, 白龙湖水位从 565.2m 降至

559.7m, 下降速率平均为 250mm/d, X12 号监测点的水平位移速率平均为 14.56mm/d, 而从 1999-07-26 ~ 1999-08-19, 库水位从 585.781m 降至 580.641m, 下降速率平均为 367mm/d, 但 X12 号监测点的水平位移速率为 0.041mm/d。



1- 老滑坡边界; 2- 白龙湖库水位线 (565mm); 3- 裂缝带; 4- 相对位移监测点; 5- 绝对位移监测点及其编号; 6- 位移矢量值 (cm)

图 1 滑坡水平位移矢量图

Fig. 1 Horizontal displacement vectors of the landslide

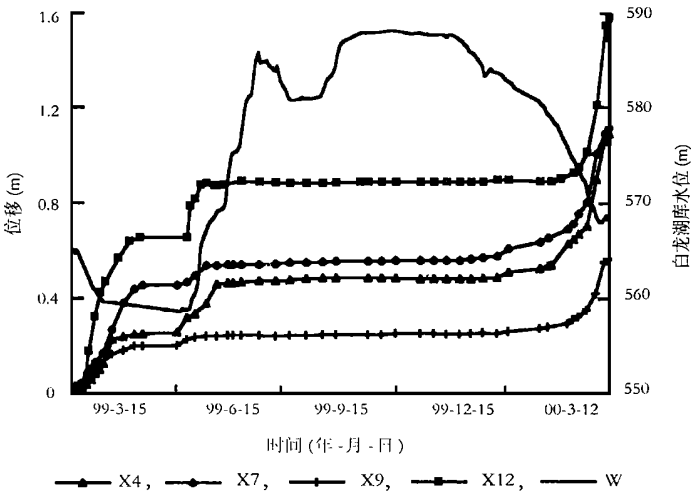


图 2 II 号滑坡相对位移曲线

Fig. 2 Relative displacement curves of No. 2 Landslide

### 3 滑坡系统演化的非线性动力学分析

#### 3.1 系统演化的非线性动力学机制及其模型

滑坡是处于开放的、复杂的非线性动力学系统中,主要要素包括地层岩性、构造动力、风化剥蚀、重力场、地应力场、地下水渗流场等等。系统中各要素的相互作用已具备较强的非线性,否则,系统的演化只能引起量变而不可能出现质变。系统的长期演化趋势是向非稳定过渡,再奔向混沌吸引子。其演化的动力学方程为

$$\dot{X} = F(X, a, \nabla, t) + F'(t) \quad (1)$$

式中  $F$  表示确定性动力,  $F'$  表示随机涨落力,  $X$  是  $N$  维状态变量,  $a$  为控制变量,  $\nabla$  为偏微分算子,  $t$  为系统演化时间。

由于滑坡本身的复杂性,目前还不能写出上式的具体形式,只能先对滑坡系统作动力学分析,找出起关键作用的机制,筛选出系统的控制变量和主要状态变量,再根据协同学的“绝热消去法”得出系统的动力学模型。此时系统的动力学模型可简化为

$$\frac{dX_i}{dt} = f_i(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

这里的函数  $f_i$  为  $X_1, X_2, \dots, X_n$  的一般非线性函数,状态变量个数为  $n$ 。

对于 II 号滑坡,首先是滑体为老滑坡堆积物,岩土体结构松散,强度低,滑体在长期的演化过程中,形成了后部为下滑段,前部为抗滑段的受力特征,其下滑力与抗滑力之间处于相对的平衡状态,而库水位的升降则完全打破了下滑力与抗滑力的平衡状态,并且大大劣化了岩土体的力学性能,此时库水位的升降已成了系统演化的主导力量之一,是描述系统演化的控制变量;其次,由于滑坡的位移时间系列是滑坡系统中各要素相互作用的结果,它不但包括着系统演化的综合信息,还蕴藏着参与滑坡变形破坏整个过程其他变量的痕迹,因而滑坡监测的位移时间系列是滑坡系统的主要状态变量,但 II 号滑坡最明显的滑动变形特征是具分区性,北部坡体、南部坡体与中部坡体之间的滑动变形具较强的独立性,单一的位移序列不能较好地反映滑坡的演化特征。因此,从滑坡监测的位移时间系列中选取两个位移序列作为状态变量,与控制变量构成的非线性动力学模型如下:

$$\frac{dX}{dt} = a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4X^2 + a_5Y^2 +$$

$$a_6Z^2 + a_7XY + a_8XZ + a_9YZ$$

$$\frac{dY}{dt} = b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4X^2 + b_5Y^2 +$$

$$b_6Z^2 + b_7XY + b_8XZ + b_9YZ$$

$$\frac{dZ}{dt} = c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4X^2 + c_5Y^2 +$$

$$c_6Z^2 + c_7XY + c_8XZ + c_9YZ \quad (3)$$

式中  $a_1, a_2, \dots, a_9, b_1, b_2, \dots, b_9, c_1, c_2, \dots, c_9$  为待反演确定的常数,  $X$  为系统的控制变量,即白龙湖库水位升降的时间,  $Y$  和  $Z$  为系统的两个主要状态变量,即滑坡体上具独立变形特征的位移时间系列。由于所建立的模型为非线性动力学模型,其非线性特征使得模型对初值极具敏感性,这导致了系统长期行为的不可预测,即滑坡预测应采取动态预测方法,当取得新一轮观测数据时,应对模型进行新一轮反演分析,以逐步达到对滑坡系统运动趋势的客观预测和合理评价。

#### 3.2 系统稳定性判据

方程组(3)的 Jacobi 矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y}{\partial X} & \frac{\partial X}{\partial X} & \frac{\partial Z}{\partial X} \\ \frac{\partial Y}{\partial Y} & \frac{\partial Y}{\partial Y} & \frac{\partial Y}{\partial Z} \\ \frac{\partial Z}{\partial X} & \frac{\partial Z}{\partial Y} & \frac{\partial Z}{\partial Z} \end{bmatrix}$$

式中  $X = \frac{dX}{dt}, Y = \frac{dY}{dt}, Z = \frac{dZ}{dt}$

Jacobi 矩阵的特征多项式为

$$\lambda^3 + A\lambda^2 + B\lambda + C = 0 \quad (4)$$

式中,

$$\begin{aligned} A &= -\left(\frac{\partial X}{\partial X} + \frac{\partial Y}{\partial Y} + \frac{\partial Z}{\partial Z}\right) \\ B &= -\frac{\partial X}{\partial X} \frac{\partial Y}{\partial Y} + \frac{\partial X}{\partial X} \frac{\partial Z}{\partial Z} + \frac{\partial Y}{\partial Y} \frac{\partial Z}{\partial Z} - \frac{\partial X}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial X} - \\ &\quad \frac{\partial X}{\partial Z} \frac{\partial Z}{\partial X} - \frac{\partial Y}{\partial Z} \frac{\partial Z}{\partial Y} \\ C &= \frac{\partial X}{\partial X} \frac{\partial Y}{\partial Z} \frac{\partial Z}{\partial Y} + \frac{\partial X}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial X} \frac{\partial Z}{\partial Z} + \frac{\partial X}{\partial Z} \frac{\partial Y}{\partial Y} \frac{\partial Z}{\partial X} - \\ &\quad \frac{\partial X}{\partial X} \frac{\partial Y}{\partial Y} \frac{\partial Z}{\partial Z} - \frac{\partial X}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial Z} \frac{\partial Z}{\partial X} - \frac{\partial X}{\partial Z} \frac{\partial Y}{\partial X} \frac{\partial Z}{\partial Y} \end{aligned}$$

由动力学稳定性分析理论知,系统稳定的充要条件是满足

$$A > 0, AB - C > 0, C > 0 \quad (5)$$

若滑坡系统满足(5)式,滑坡处于稳定状态;反之则处于不稳定状态。

#### 3.3 非线性动力学反演分析

对于 II 号滑坡的  $X_4, X_7$  和  $X_{12}$  相对位移监测

点, 从 1999—03—15 ~2000—04—05, 每 5 天提取一个观测数据, 每个监测点有 77 个数据, 根据系统演化的非线性动力学机制分析, 形成如下计算方案。

方案 I : 白龙湖库水位变化序列+X12 号监测点的位移序列(北部坡体)+X7 号监测点的位移序列(南部坡体);

方案 II : 白龙湖库水位变化序列+X4 号监测点的位移序列(中部坡体)+X7 号监测点的位移序列(南部坡体);

方案 III 白龙湖库水位变化序列+X4 号监测点的位移序列(中部坡体)+X7 号监测点的位移序列(北部坡体);

各方案的计算结果如表 1 与表 2 所示。从表 2 中可知, 在第 10 步到第 77 步之间, 滑坡整体上是稳定的, 但除个别参数外, 条件中各参数的绝对值均 <1, 因此, 滑坡的稳定程度是较低的, 当外界条件发生较大变化后, 滑坡很可能发生整体性失稳破坏。

表 1 非线性动力学方程的反演系数

Table 1 the coefficient of the nonlinear dynamic inversion formula

方 案	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$
方案 I	-0.488	0.333	0.001	1.107	-0.151	1.4E-5	-0.364	-0.010	0.004
方案 II	0.764	0.423	0.001	-1.964	-1.100	1.8E-4	3.055	-0.030	0.006
方案 III	0.276	0.146	-0.002	0.174	-0.390	1.3E-4	0.414	-0.044	0.015
方 案	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$
方案 I	-1.713	0.937	0.019	0.925	-0.850	4.9E-5	1.108	-0.023	-0.008
方案 II	-1.150	1.114	-0.002	-7.258	-6.521	1.4E-4	13.950	-0.002	-0.008
方案 III	-0.150	0.309	0.018	3.239	-0.009	7.3E-5	-1.887	-0.063	0.009
方 案	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$
方案 I	50.880	-33.82	0.273	62.498	61.484	-3.6E-3	-134.0	-0.549	0.092
方案 II	77.165	-63.22	0.389	217.62	227.74	2.0E-3	-450.0	-2.134	0.906
方案 III	18.258	-12.61	0.032	-8.709	12.956	-2.3E-3	-12.91	-1.129	0.524

表 2 非线性动力学反演结果

Table 2 the conclusion of the nonlinear dynamic inversion

反演步骤	方案 I				方案 II				方案 III			
	A	AB—C	C	滑坡状态	A	AB—C	C	滑坡状态	A	AB—C	C	滑坡状态
10	0.282	0.005	0.001	稳定	0.076	0.052	0.086	稳定	0.643	0.014	0.006	稳定
20	0.156	0.001	0.002	稳定	0.022	0.004	0.001	稳定	0.117	0.016	0.017	稳定
30	0.502	0.014	0.005	稳定	0.26	0.014	0.012	稳定	0.656	0.042	0.027	稳定
40	0.635	0.040	0.065	稳定	0.011	0.005	0.004	稳定	0.916	0.199	0.011	稳定
50	0.638	0.041	0.005	稳定	0.029	0.001	0.004	稳定	0.915	0.195	0.015	稳定
60	0.503	0.018	0.009	稳定	0.012	0.006	0.005	稳定	0.758	0.089	0.020	稳定
70	0.044	0.003	0.005	稳定	0.364	0.034	0.054	稳定	0.788	0.083	0.044	稳定
77	0.131	0.067	0.018	稳定	0.386	0.190	0.132	稳定	1.071	0.34	0.27	稳定

4 结语

通过对广元市金洞乡 II 号滑坡位移特征研究和滑坡系统演化的非线性动力学析, 得出了以下认识:

- 1、滑坡是处于开放的、复杂的非线性动力学系统中, 其长期演化趋势是向非稳定过渡, 再奔向混沌吸引子。
- 2、滑坡系统的外因在一定条件下可以成为主导

系统演化的控制力量。白龙湖宝珠寺库水位的升降已成了 II 号滑坡系统演化的控制力量;

- 3、对同一滑坡体上的位移系列, 当其反映的滑坡变形破坏特征具有较强的相对独立性时, 应分别当作系统的不同状态变量进行分析。
- 4、在目前的外界条件下, II 号滑坡处于较稳定状态。

## 参考文献:

- [1] 秦四清, 张倬元, 等. 非线性工程地质学导引[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
- [2] 黄润秋, 许强. 工程地质广义系统科学分析原理及应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [3] 许强, 黄润秋. 地质灾害非线性数据处理与建模技术[J]. 山地学报, 2000, 18(增): 123 ~ 127.
- [4] 罗文强, 等. 几种边坡可靠性数学模型的对比[J]. 山地学报, 2000, 18(1): 42 ~ 46.
- [5] 李晓红, 等. GM(1, 1)优化模型在滑坡预测预报中的应用[J]. 山地学报, 2001, 19(3): 265 ~ 269.
- [6] 曾开华, 等. 边坡变形破坏非线性动力学特征的分析与探讨[J], 南昌水专学报, 1998 17(4): 16 ~ 20.
- [7] 刘宏, 等. 广元市金洞乡 II 号滑坡复活成因机制探讨[J], 地质灾害与环境保护, 2000 11(1): 50 ~ 54.

## Nonlinear Dynamic Analysis on the Evolvment of the No. 2 Landslide on Jindong Town, Guangyuan City

LIU Hong, DENG Rong-gui and ZHANG Zhuo-yuan

(1. *Institute of Engineering Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059 China;*

2. *College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031 China*)

**Abstract:** Based on the study of the landslide displacement, the author considers the no. 2 landslide on Jindong town, Guanyuan city, is becoming an exoteric and complicated nonlinearar dynamic system. Among the system factors of the landslide, the elevation and subsidence of the water level of the Baozhusi reservoir has been the controlling factor. Though the displacement of the slip bldy is the main state variable of the system, because of the independence of the displacement among the north, south and middle part of the system, because of the independenceof the displacement among the north, south and middle part of the slip body, the single time series data can't reflect the evolutionary characteristic of the landslide completely and thoroughly. Therefore, with two state variables, whichare two independent displacement series, and one controlling variable, the nonlinear dynamic model If the system evolution is set up. According to the monitoring data, the nonlinear dynamic model of the system is analyzed with the method of inversion, and its stability is also evaluated.

**Key words:** landslide; nonlinear dynamic inversion; stability evaluation