三峡水库水位变化对滑坡监测变量影响的数值分区——以泄滩滑坡为例

张振华[1,2]，罗先启[1]，吴　剑[1]，刘斯春[3]，王志俭[1]

（1. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点试验室，湖北 宜昌 443002；2. 中国科学院武汉岩土力学研究所，湖北 武汉 430071；
3. 宜昌三大工程建设监理公司，湖北 宜昌 443002）

摘　要：在三峡水库蓄水和运行条件下，三峡库区水库型滑坡（以泄滩滑坡为例）不同部位的地下水位和位移的改变表现出对库水位变化的敏感程度不同的特征。根据监测变量（位移与地下水位）的变化对库水变化敏感程度的不同与监测信息量获取大小的关系，采用模糊模式识别方法对三峡库区泄滩滑坡地下水位及位移场变化对水库水位变化的敏感程度进行数值分区。结果表明：库水位对坡体地下水位的影响部位集中在滑坡的中前部；滑坡体中前部浅层土体水平位移在库水蓄水和骤降过程中表现得很敏感，随着坡体高程和土体深度的增加，土体水平位移变化表现得逐渐不敏感；滑体浅层土体的垂直位移变化对库水位的变化表现得很敏感，随着土体深度的增加，坡内土体的垂直位移变化对库水位变化的敏感程度逐渐减小。借助泄滩滑坡监测变量敏感程度数值分区规律，给出三峡库区水库型滑坡地下水位与位移监测点布设的建议。

关键词：模糊模式识别；监测变量；敏感程度；分区；监测点布置

作者简介：张振华(1977－)，男，讲师，博士研究生，主要从事滑坡灾害防治理论与技术研究。

0　前　言

根据三峡库区石榴树包滑坡在水库蓄水与骤降的物理模型[1-2]试验数值模拟计算[3]和水库滑坡现场监测的结果[4-5]得到的规律，可以发现库岸边坡内各点位移和地下水位的变化对库水位变化表现出不同的敏感性，即坡体内某些点位移或水头在某一库水位变化过程中变化较大，而另一些点的位移或水头在同一库水位变化过程中变化较小。对于坡体监测变量（这里指所研究的位移和地下水位）对库水位变化敏感与否是一个模糊的概念，而这个敏感程度能够表现坡体监测变量在库水位变化过程中变化范围的相对大小，即监测变量对库水位变化越敏感，则该监测变量的变化范围就越大，反之越小。如果能够将监测变量随库水位变化的敏感程度进行分级，并判断坡体内各点属于哪一个敏感程度级别，就能区分监测变量在坡体不同位置的变化范围的相对大小，这样就可以根据监测变量变化所属等级（敏感等级越高的区域所包含的信息量越大，所布置的监测点密度应越大）来规划监测点位的布置，以期为有效地获取监测数据提供依据。这种做法的优点在于能够在以往进行滑坡监测点布置仅根据滑坡的宏观地质调查结果并进行工程地质分析，结合国家规范进行相应监测设施的布置的基础上[6,7]，更好地确定滑坡监测的关键部位和敏感部位[8]；同时，能够具体而详细地结合水库型滑坡主要外动力因素——库水位变化对滑体地下水位的和位移变化的空间差异特征，即地下水位和位移对库水位变化的敏感程度差异特征进行分析，以利于根据所确定的监测关键部位和敏感部位有效地进行监测点的布置，并能更有效地捕捉坡体的演化信息。

1　模糊模式识别方法

由于在一般情况下，不同类事物之间的界限不是分明的，所以用传统的方法有一定的局限性，用模糊集方法分类显得更为自然和符合实际[9]。本文采用的模糊分类方法为模糊模式识别方法。模糊模式识别是已知各种类型，对给定对象识别它属于哪一种类型。

在论域 X 上有 n 个模糊子集，它们代表 n 个模糊型 A_1，A_2，…，A_n。而被识别的对象 B 也是 X 上的一个模糊模型，这是要考虑 B 与 A_i 的贴近程度。如果 B 与 A_i 中哪个更贴近就认为它属于哪一类。贴近程度的量化判断采用择近原则，即，设 A_1，A_2，…，A_n 是论域 X 上的 n 个模糊子集。B 也是论域 X 上的模糊子集。若

$$N(B,A_j)=\max_{1\le i\le n}N(B,A_i)\quad , \tag{1}$$

则认为 B 属于 A_j 类。其中 $N(B,A_i)$ 表示 B 与 A_i 的贴近程度。贴近度采用最大最小法进行求解：

若 $X=\{x_1,x_2,...,x_n\}$，$A,B\in F(X)$，

$$N(A,B)=\frac{\sum_{k=1}^{n}(A(x_k)\wedge B(x_k))}{\sum_{k=1}^{n}(A(x_k)\vee B(x_k))}\quad , \tag{2}$$

式中，$A(x_k)\wedge B(x_k)$ 表示模糊集 A 与模糊集 B 的交集的隶属函数，$A(x_k)\vee B(x_k)$ 表示模糊集 A 与模糊集 B 并集的隶属函数。

2　模糊模式识别方法在水库型滑坡与降雨型滑坡监测变量敏感程度分区中的应用

将坡体内某一结点（有限元网格结点）的监测变量（这里指坡体内各结点的水平位移、垂直位移和水头值）随库水位变化敏感程度定义为四个等级即不敏感（A_1）、一般（A_2）、敏感（A_3）、和非常敏感（A_4）。将坡体各结点的监测变量的敏感模型定义为 B。模糊模式识别的目的就是要确定 B 属于 A_1、A_2、A_3、A_4 中那种类型，以判断该点监测变量随库水位变化的敏感程度。通过对坡体内每一结点的监测变量进行这种类别的判断，就可以在整个坡体内形成相应监测变量对水库水位变化的敏感程度的四个区域，即不敏感（A_1）、一般（A_2）、敏感（A_3）、和非常敏感（A_4）四个区。

2.1　等级标准 $A_i(i=1,2,3,4)$ 影响因素的确定

基金项目：国土资源部 2000 年科技专项计划“长江三峡地质灾害监测与预报”项目基金资助（SDH200027）

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

作者采用有限单元法对三峡库区多个滑坡在三峡水库蓄水和运行条件下的地下水位变化和滑体位移场的变化进行数值模拟计算，从数值模拟结果可知滑坡体地下水位、水平位移和垂直位移在不同蓄水阶段的变化的程度不同，对应的坡体稳定趋势也不同。为了从整个水库蓄水和骤降过程考虑监测变量变化对库水位变化的敏感程度，选取三峡库区三期蓄水和骤降水位特征水位，即135、156、175 m水位和骤降到145 m水位时监测变量的变化量(变化量是该特征水位与前一特征水位对应监测变量之差，比如，156 m时水平位移变化量等于156 m时对应的水平位移与135 m水位时对应的水平位移之差)作为分类等级标准的影响因素。由于各特征水位属于库水位影响这单一因素，可确定各监测变量变化的敏感程度等级的指标参数相同。同一特征库水位下，根据监测变量变化与敏感程度相一致的特点，即变化量大敏感程度就高，可按敏感程度成比例地确定同一特征库水位不同敏感程度等级的参数指标值。反映坡体各结点监测变量随库水位变化的敏感程度的影响因素指标参数选取见表1。

表1 坡体内各结点监测变化量敏感程度影响因素指标参数

敏感等级	135 m水位	156 m水位	175 m水位	175 m骤降到145 m水位
A_1（不敏感）	0.1	0.1	0.1	0.1
A_2（一般）	0.2	0.2	0.2	0.2
A_3（敏感）	0.3	0.3	0.3	0.3
A_4（很敏感）	0.4	0.4	0.4	0.4

2.2 各敏感程度模糊集隶属函数的选取

假设滑体内所有结点在某一特征水位时其监测变量变化量的最大值为ΔL_{max}，某一结点的监测变量变化量为y，由于影响监测变量由于影响监测变量y的因素属于库水位变化单一因素，可采用模糊集线性隶属函数，则模糊集A_1、A_2、A_3和A_4的隶属函数的解析表达式可分别表示为：

$$A_1(y)=\begin{cases}1 & (0\le y\le \frac{\Delta L_{max}}{4}),\\ 2-\frac{4y}{\Delta L_{max}} & (\frac{\Delta L_{max}}{4}<y\le \frac{\Delta L_{max}}{2}),\\ 0 & (\frac{\Delta L_{max}}{2}<y\le \Delta L_{max});\end{cases} \tag{3}$$

$$A_2(y)=\begin{cases}0 & (0\le y\le \frac{\Delta L_{max}}{4}),\\ \frac{4y}{\Delta L_{max}}-1 & (\frac{\Delta L_{max}}{4}<y\le \frac{\Delta L_{max}}{2}),\\ 3-\frac{4y}{\Delta L_{max}} & (\frac{\Delta L_{max}}{2}<y\le \frac{3\Delta L_{max}}{4}),\\ 0 & (\frac{3\Delta L_{max}}{4}<y\le \Delta L_{max});\end{cases} \tag{4}$$

$$A_3(y)=\begin{cases}0 & (0\le y\le \frac{\Delta L_{max}}{2}),\\ \frac{4y}{\Delta L_{max}}-2 & (\frac{\Delta L_{max}}{2}<y\le \frac{3\Delta L_{max}}{4}),\\ 4-\frac{4y}{\Delta L_{max}} & (\frac{3\Delta L_{max}}{4}<y\le \Delta L_{max});\end{cases} \tag{5}$$

$$A_4(y)=\begin{cases}0 & (0\le y\le \frac{3\Delta L_{max}}{4}),\\ \frac{4y}{\Delta L_{max}}-3 & (\frac{3\Delta L_{max}}{4}<y\le \Delta L_{max})。\end{cases} \tag{6}$$

四个模糊集合隶属函数的图象见图1，图中横坐标$m=y/\Delta L_{max}$。

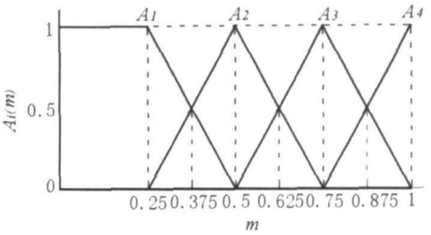

图1 各敏感程度模糊集的隶属函数图象

2.3 各结点待识别模型B的确定

根据各结点某一监测变量变化量y值，从隶属函数中可以求得其对应两个相连模糊集的隶属度b_1与b_2。设$B(x_k)$(k=1，2，3，4)为各特征水位对应的指标参数分量对应的指标参数值，满足下式：

$$B(x_k)=\begin{cases}\frac{1}{10} & (0\le y\le \frac{\Delta L_{max}}{4}),\\ \frac{1}{10}D & (\frac{\Delta L_{max}}{4}<y\le \frac{\Delta L_{max}}{2}),\\ \frac{1}{10}E & (\frac{\Delta L_{max}}{2}<y\le \frac{3\Delta L_{max}}{4}),\\ \frac{1}{10}F & (\frac{3\Delta L_{max}}{4}<y\le \Delta L_{max}),\end{cases} \tag{7}$$

式中，

$$D=1+0.5b_1(\frac{4y}{\Delta L_{max}}-1)+0.5b_2(2-\frac{4y}{\Delta L_{max}}),$$

$$E=2+0.5b_1(\frac{4y}{\Delta L_{max}}-2)+0.5b_2(3-\frac{4y}{\Delta L_{max}}),$$

$$F=3+0.5b_1(\frac{4y}{\Delta L_{max}}-3)+0.5b_2(4-\frac{4y}{\Delta L_{max}})。$$

根据式(7)可求得结点待识别模型B。

2.4 B与A_i贴近度的计算及B所属类别的确定

根据式(2)计算B与A_i(i=1,2,3,4)的贴近度$N(B, A_i)$。根据择近原则将$N(B, A_i)$中的最大值A_j所对应的敏感程度类别作为B的敏感程度类别。

3 模糊模式识别方法在坡体监测变量随库水位变化敏感性数值分区的程序实现

由滑坡数值模拟计算的监测变量结果和模糊模式识别方法实现的算法，同时考虑模糊模式识别方法计算结果的输出的可视化，模糊模式识别方法在坡体监测变量随库水位变化敏感性数值分区中的程序实现流程图表达如图2。

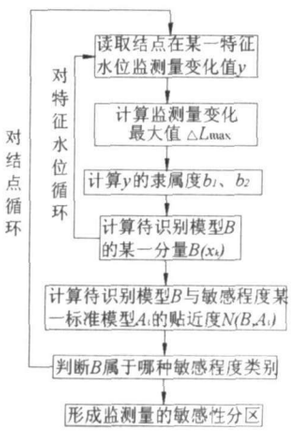

图2 模糊模式识别方法在坡体监测变量敏感性数值分区中的程序实现流程图

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

根据以上流程编制监测变量敏感程度数值分区程序 MGFQ，并利用该程序将三峡库区泄滩滑坡的数值模拟结果进行监测变量敏感程度数值分区，可得出泄滩滑坡监测变量敏感程度数值分区结果图，见图3～5。

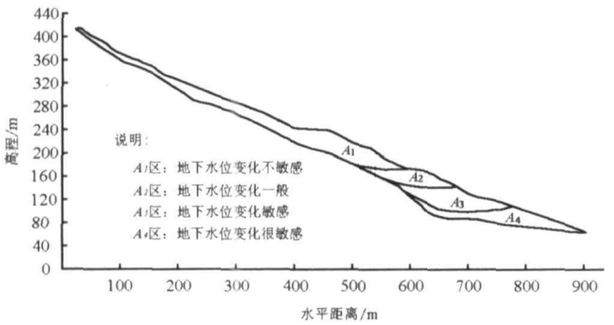

图3 泄滩滑坡库水作用下地下水位变化敏感程度数值分区

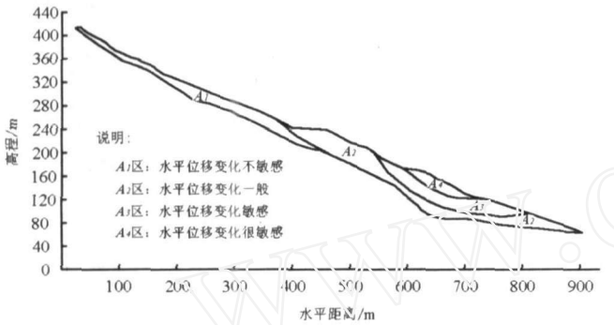

图4 泄滩滑坡库水作用下水平位移变化敏感程度数值分区

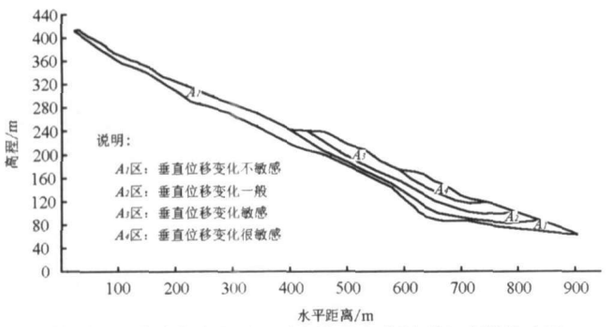

图5 泄滩滑坡库水作用下垂直位移变化敏感程度数值分区

从三峡库区泄滩滑坡地下水位、水平位移和垂直位移对库水位变化的敏感程度数值分区结果可以看出：

(1) 坡体在水库蓄水和骤降工况下地下水位变化主要集中在高程60～180 m范围内，因此库水位对坡体地下水位的影响部位集中在滑坡的中前部，并且整个蓄水和骤降过程坡体地下水位变化敏感程度由高程60 m到180 m范围逐渐降低，见图3。

(2) 坡体120～180 m范围内浅层土体水平位移在库水蓄水和骤降过程中表现得很敏感，随着坡体高程和土体深度的增加，土体水平位移表现逐渐不敏感，见图4。

(3) 坡体从高程120～180 m范围内的浅层土体的垂直位移变化对库水位的变化表现得很敏感，随着土体深度的增加，坡内土体的垂直位移变化对库水位变化的敏感程度逐渐减小，见图5。

上述根据数值模拟结果进行的泄滩滑坡监测变量（地下水位、水平位移及垂直位移）敏感程度数值分区所得到的结果的特征与物理模型试验[1-2]及现场监测结果[5]所得监测变量表现出的规律基本一致，这也说明了采用模糊模式识别方法对三峡库区泄滩滑坡监测变量进行库水位变化的敏感程度数值分区是合理的。

4 结论及建议

4.1 结论

(1) 采用模糊模式识别方法对三峡库区泄滩滑坡监测变量（地下水位、水平位移和垂直位移）对库水位变化的敏感程度具有明显的数值分区特征：库水位对坡体地下水位的影响部位集中在滑坡的中前部；滑坡体中前部浅层土体水平位移在库水蓄水和骤降过程中表现得很敏感，随着坡体高程和土体深度的增加，土体水平位移表现逐渐不敏感；滑体浅层土体的垂直位移变化对库水位的变化表现得很敏感，随着土体深度的增加，坡内土体的垂直位移变化对库水位变化的敏感程度逐渐减小。

(2) 采用模糊模式识别方法对三峡库区泄滩滑坡监测变量敏感性数值分区来反映库区滑坡监测变量（地下水位、水平位移和垂直位移）随库水位变化的空间分布特征是合理的，能够用该数值分区来规划滑坡区域内水位监测点和变形监测点的布置。

4.2 建议

(1) 建议根据监测变量对库水位变化敏感程度数值分区等级规划地下水位和变形监测点的布置。将滑坡地下水位和变形监测点集中布置在很敏感区和敏感区，同时适当考虑在一般区和不敏感区布置少量的监测点，以保证整个滑坡区域内监测数据在空间位置上的连续性，且便于进行监测数据的整体比较分析。

(2) 建议进行三峡库区多个水库型滑坡进行相应的监测变量对库水位变化的敏感程度数值分区，确定滑坡监测的关键部位和敏感部位，总结归纳出水库型滑坡地下水位监测点和变形监测点布设的共同特征，以期为三峡库区水库型滑坡监测点的布设提供有效依据。

参考文献：

[1] 罗先启, 刘德富, 吴　剑, 等. 雨水及库水作用下滑坡模型试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2005, **24**(4): 2476－2483.

[2] 罗先启, 陈海玉, 沈　辉, 等. 自动网格法在大型滑坡模型试验位移测试中的应用[J]. 岩土力学, 2005, **26**(2): 231－238.

[3] 罗先启, 田　斌, 彭　刚. 黄腊石滑坡群石榴树包滑坡有限元分析[J]. 中国三峡建设, 1998, (7): 15－18.

[4] 张保军, 李亦明, 马水山. 从隔河岩水利枢纽库岸稳定性监测实施谈长江三峡库岸滑坡安全监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **25**(增刊): 1658－1662.

[5] 闵　弘, 谭国焕, 戴福初, 等. 蓄水期库岸古滑坡的水动力学响应监测——以三峡库区泄滩滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(21): 3721－3726.

[6] 二滩水电开发有限责任公司. 岩土工程安全监测手册[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.

[7] 韩建设. 岩土工程中滑坡监测的主要技术方法简述[J].西北水电, 2002, (2):57－59.

[8] 吕建红, 袁宝远, 杨志法, 等. 边坡监测与快速反馈分析[J]. 河海大学学报, 1999, **27**(6):98－102.

[9] 张振良.应用模糊数学[M].重庆:重庆大学出版社,1991.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net