

# 堆积层滑坡的地下水加卸载动力作用规律及其位移动力学预测

## ——以三峡库区八字门滑坡分析为例

贺可强<sup>1,2</sup>, 王荣鲁<sup>3</sup>, 李新志<sup>1</sup>, 于广明<sup>1</sup>, 孙林娜<sup>1</sup>, 王思敬<sup>4</sup>

(1. 青岛理工大学 岩土工程研究所, 山东 青岛 266033; 2. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;  
3. 中国水利水电科学研究院 结构材料所, 北京 100044; 4. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 在系统分析水诱发堆积层滑坡位移与失稳动因与机制的基础上, 深入研究并总结地下水在堆积层滑坡稳定性演化过程中的动力作用与动力响应规律和特点, 发现水诱发堆积层滑坡的位移与失稳直接受地下水位变化量控制, 且其位移规律与地下水位变化量存在对应关系。根据上述分析结论并运用加卸载响应比理论的基本原理, 首次提出以月地下水位的变化量作为堆积层滑坡的加卸载参数, 以相应月边坡位移速率或位移加速度作为其加卸载响应参数, 并以此为基础建立和确定地下水位加卸载响应比位移动力学参数与位移动力学预测模型。同时, 以三峡库区典型堆积层滑坡——八字门滑坡分析为例, 运用地下水位加卸载响应比预测模型对该边坡的关键监测部位进行研究, 并使用SZK1和SZK4监测点数据进行加卸载响应比计算, 发现其加卸载响应比时序曲线变化规律与其稳定性动态演化规律相吻合。研究表明, 可以运用地下水位加卸载响应比动力学模型对该类滑坡进行位移动力学预测预报。

**关键词:** 边坡工程; 堆积层滑坡; 地下水; 加卸载响应比; 位移动力学预测; 八字门滑坡

**中图分类号:** P 642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)08 - 1644 - 08

## LOAD-UNLOAD DYNAMIC LAW OF GROUNDWATER LEVEL AND DYNAMIC DISPLACEMENT PREDICTION OF DEBRIS LANDSLIDE——A CASE STUDY OF BAZIMEN LANDSLIDE IN THREE GORGES RESERVOIR

HE Keqiang<sup>1,2</sup>, WANG Ronglu<sup>3</sup>, LI Xinzhi<sup>1</sup>, YU Guangming<sup>1</sup>, SUN Linna<sup>1</sup>, WANG Sijing<sup>4</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards of Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Department of Structures and Materials, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 4. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** On the basis of the systematic analysis of the dynamic displacement factors and destabilized mechanism of debris landslide induced by water, the dynamic action and its response law of groundwater in the process of the dynamic stability evolution of the slope are systematically analyzed. It is discovered that the displacement and destabilization of the debris landslides induced by water are directly controlled by the variation of groundwater quantity; and its displacement law has corresponding relation with the change quantity of groundwater. According to the above analytical results and the principle of the load-unload response ratio theory, the theories that the monthly change of groundwater table can be taken as the load-unloaded parameter of debris landslide and its

**收稿日期:** 2008 - 01 - 25; **修回日期:** 2008 - 05 - 16

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40672182); 教育部三峡库区地质灾害防治重点实验室项目(2006KDZ07)

**作者简介:** 贺可强(1960 -), 男, 博士, 1982年毕业于河北地质学院水文地质与工程地质专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程与地质工程方面的教学与研究工作。E-mail: keqianghe@163.com

displacement velocity and acceleration rate can be taken as the response parameter to load-unload are proposed. Thus, the dynamic displacement parameters and dynamic prediction model of the load-unload response ratio of the groundwater table are determined. Meanwhile, taking the typical debris landslide of the Three Gorges Reservoir region—Bazimen landslide for example, the load-unload response ratio of the key monitoring points SZK1 and SZK4 of Bazimen landslide are calculated by means of the load-unload response ratio model of the groundwater table. The computation results show that the curves of load-unload response ratio of monitoring points SZK1 and SZK4 agree with the dynamic evolution law of the slope stability. All the above-mentioned results show that the groundwater table dynamic model of the load-unload response ratio can be used to perform the complete dynamic prediction of the debris landslides.

**Key words:** slope engineering; debris landslide; groundwater; load-unload response ratio; dynamic displacement prediction; Bazimen landslide

## 1 引言

堆积层滑坡是指发生在第四系及近代松散堆积层的一类滑坡。它分布广、规模大、突发性强、危害性严重且具有很多与岩体滑坡不同的特点,在我国滑坡中占有相当大的比例。经普查,仅在长江上游地区  $100 \times 10^4 \text{ km}^2$  范围内,共发现滑坡 1 736 个,总体积为  $133.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,而且 64% 为堆积层滑坡<sup>[1]</sup>。由于该类边坡物质构成的特殊性,决定了降雨及地下水的作用常常是导致其失稳的最主要动因。据统计,在堆积层边坡的失稳中,94% 以上是由降雨和地下水及人类活动影响而引起的<sup>[2]</sup>。

由于地下水在滑坡演变过程中起着重要的诱发作用,所以基于地下水位的观测,研究地下水作用规律与滑坡灾害发生在时间上的对应关系,建立滑坡灾害与地下水的时空统计规律的研究一直是预测堆积层滑坡一种非常行之有效的研究方法。在该研究领域,国内外许多有识之士进行了卓有成效的有益探索。张作辰<sup>[3]</sup>指出我国大多数滑坡都是以降雨下渗引起地下水状态变化为直接诱导因素;刘才华等<sup>[4]</sup>给出了考虑地下水影响的库岸边坡稳定性计算公式,并指出了能有效降低地下水对边坡稳定性带来的消极影响的措施;魏丽敏等<sup>[5]</sup>考虑地下水的影响,采用推力传递系数法对滑坡进行稳定性分析,该方法能定量分析地下水位降低和疏干地下水对滑坡安全系数的影响;张卫民和陈兰云<sup>[6]</sup>进行了地下水位线与边坡稳定性的关系,指出随着地下水位线的升高,边坡稳定性安全线减小,最终会导致边坡破坏;R. Baker<sup>[7]</sup>运用气象周期降雨量和基本关系分析(CCA)对滑坡进行了预测预报,提出了边坡临界地下水位失稳阈值的关系判据;G. Urciuoli<sup>[8]</sup>对弹性莫尔-库仑材料无限边坡失稳前的位移与应

变规律进行了研究,指出位移严格受坡体孔隙水压力变化与波动的控制;R. M. Iverson和M. E. Reid<sup>[9]</sup>通过试验得到了土体原始含水量与滑坡位移速度的敏感关系,指出其位移速度对外力和含水量的反应随边坡不同稳定状态而变化。上述研究成果均为水诱发滑坡的位移动力学预测进行了有益探索并奠定了坚实的基础。

本文拟运用加卸载响应比理论的基本原理,对堆积层滑坡的地下水位加卸载响应比动力学规律与特征进行初步分析与研究,并以此为基础对其稳定性演化规律进行评价与预测。

## 2 堆积层滑坡地下水位动力学方程与位移动力学响应规律分析

由于堆积层坡体的物质构成主要是第四系及近代松散堆积层,所以就决定了其坡体结构松散,具有大孔隙比、透水性强及易变形等特点,与下覆基岩的弱透水性迥然有别,常常造成基岩面附近大气降水或地下水补给的大量积水,形成坡体地下水含水层及地下水位变幅带(见图 1)。大气降雨量与地下水补给变化必然会引起堆积层边坡坡体地下水位及受力条件的改变<sup>[10]</sup>。

地下水是影响边坡稳定性的主要因素,由于地下水的存在,边坡内必定会产生渗流,而渗流场的存在和变化将会改变土体原有的受力状态和物理力学性能:(1) 会使渗流域内土体的有效重量减轻,进而使土体骨架颗粒间有效应力减少和抗剪强度降低,从而减少了土坡滑动体的抗滑力。(2) 会形成沿流线方向的渗透力,增加了土坡滑动体的滑动力。渗流的这些影响常常是地下水导致土坡失稳破坏的根源<sup>[11]</sup>。

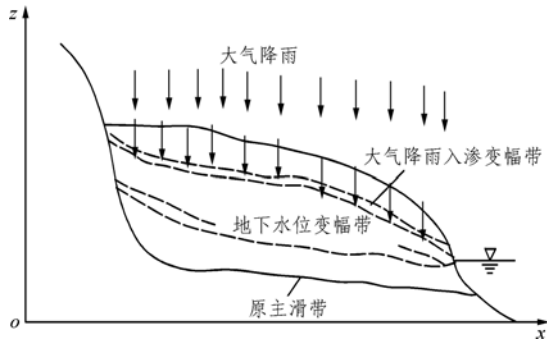


图1 堆积层边坡地下水位与降雨量关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of debris slopes between groundwater level and precipitation

现以单一充水堆积层滑坡为例(见图2), 对该类边坡地下水位与其稳定性及其位移响应关系进行初步分析与探讨。

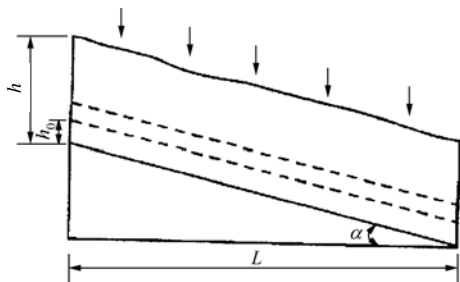


图2 单滑动面滑坡的简化二维极限平衡分析模型

Fig 2 Simplified two-dimensional limit equilibrium analytical model of landslide with single sliding plane

### 2.1 单一倾斜充水堆积层边坡稳定性与地下水位相互关系

根据一般堆积层边坡地质与边界几何条件, 特建立是单滑动面滑坡的简化二维极限平衡分析模型, 如图2所示。设滑动面不透水, 雨季中滑坡体将局部或全部饱水, 滑坡体断面单宽为1 m。根据滑坡稳定性计算的极限平衡原理, 推导出的滑坡稳定系数  $F_s$  的表达式如下:

$$F_s = \frac{L[\rho(h-h_0)+(\rho_s-\rho_w)h_0]\cos a \tan \varphi + cL/\cos a}{L[\rho(h-h_0)+(\rho_s-\rho_w)h_0]\sin a + Lh_0\rho_w \sin a} = \frac{[\rho h + (\rho_s - \rho - \rho_w)h_0] \cot a \tan \varphi + 2c/\sin(2a)}{\rho h + (\rho_s - \rho)h_0} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为滑坡体天然密度( $t/m^3$ ),  $\rho_s$  为滑坡体饱和密度( $t/m^3$ ),  $\rho_w$  为水体密度( $t/m^3$ ),  $a$  为滑动面倾角( $^\circ$ ),  $\varphi$  为滑动面内摩擦角( $^\circ$ ),  $c$  为滑动面黏聚力( $t/m^2$ ),  $h$  为滑坡体铅直厚度(m),  $h_0$  为滑坡体饱水部分铅直厚度(m),  $Lh_0\rho_w \sin a$  为渗透压力(10 kN/m)。

由式(1)可以看出, 除滑坡体饱水部分铅直厚度  $h_0$  为动态变化的参数外, 其他参数均是相对不变的物理力学参数和几何参数, 滑坡稳定系数  $F_s$  与  $h_0$  的动态变化相关, 对式(1)求导可得

$$\frac{dF_s}{dh_0} = -\frac{\rho_w h \cot a \tan \varphi + 2c(\rho_s - \rho) / \sin(2a)}{[\rho h + (\rho_s - \rho)h_0]^2} \quad (2)$$

因为  $\rho_s - \rho > 0$ , 所以  $dF_s/dh_0 < 0$ , 滑坡稳定系数  $F_s$  与地下水位高度  $h_0$  呈单调递减关系, 即地下水位越大, 其稳定系数越小, 反之亦然。

### 2.2 单一倾斜充水堆积层边坡的位移动力学方程及位移动力学特征

由滑坡稳定系数表达式(1)及单滑动面滑坡的简化二维剖面图可知, 作用在边坡单元体的剩余下滑力为

$$\Delta E_i = L[\rho(h-h_0)+(\rho_s-\rho_w)h_0]\sin a + Lh_0\rho_w \sin a - L[\rho(h-h_0)+(\rho_s-\rho_w)h_0]\cos a \tan \varphi - cL/\cos a - R_{i+1} = h_0[(\rho_s-\rho)L\sin a + (\rho-\rho_s+\rho_w)L\tan\varphi\cos a] + L\rho h(\sin a - \cos a \tan \varphi) - cL/\cos a - R_{i+1} \quad (3)$$

式中:  $R_{i+1}$  为边坡下侧的抗滑推力。

由于堆积层边坡的坡体属于黏弹性体, 所以可建立以下位移动力学方程:

$$m_i \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} + \eta_i \frac{\partial X}{\partial t} + K_i X = h(t)[(\rho_s - \rho)L\sin a + (\rho - \rho_s + \rho_w)L\tan\varphi\cos a] + L\rho h(\sin a - \cos a \tan \varphi) - cL/\cos a - R_{i+1} \quad (4)$$

式中:  $X$  为边坡位移量,  $m_i$  为坡体质量,  $\eta_i$  为坡体黏滞系数,  $K_i$  为坡体抗力系数。

由式(4)可以得出以下认识:

(1) 在其他因素相对不变的条件下, 边坡的位移动力学特征主要取决于边坡的地下水位及其变化规律。因此可以认为地下水位是影响和控制堆积层滑坡位移的主要动力因素。

(2) 堆积层滑坡的位移为黏弹塑性位移的综合动力学反映, 即其位移是由刚体滑移、弹性变形、塑性变形及黏性变形构成, 其位移是上述多种性质位移的综合反映。

(3) 堆积层滑坡的位移动力学方程系统描述和刻画了其地下水动力学因素与位移动力响应相互定量关系, 这种定量关系也是评价和预测边坡稳定性演化特征与演化规律的重要依据。

### 3 堆积层滑坡的地下水位加卸载响应比预测模型与位移动力学预测

#### 3.1 加卸载响应比理论概述

加卸载响应比理论<sup>[12~15]</sup>是一种用于研究非线性系统失稳前兆和失稳预报的新理论、新方法。非线性系统失稳前,系统对加载响应率与卸载响应率之比(简称为加卸载响应比, LURR)可以作为非线性系统趋近失稳的定量表征,定义响应率为

$$X = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad (5)$$

令  $X_+$  与  $X_-$  分别代表加载与卸载的响应率。当荷载很小时,系统处于稳定状态,这时  $P$  与  $R$  之间为线性或近似线性关系,在此阶段,加载时的响应率  $X_+$  与卸载时的响应率  $X_-$  基本相等;如果荷载不断增大,逐渐接近临界值  $P_{cr}$ ,即系统趋于不稳定时,其响应率随荷载增大而不断增大,当系统失稳时,  $X_+ \rightarrow \infty$ 。这说明,在接近失稳时,哪怕极其微小的加载都会导致系统巨大的响应。因此,对一个非线性系统进行加载,即使荷载增量保持不变,由于系统的稳定性状态不同,其响应率也不一样,响应越大,系统越接近失稳。加卸载响应比定义为

$$Y = \frac{X_+}{X_-} = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta R_+}{\Delta P_+} \right) / \left( \frac{\Delta R_-}{\Delta P_-} \right) \quad (6)$$

对于弹性系统,  $X_+ = X_- = c$ , 所以有  $Y=1$ ; 但对于非线性系统,  $Y$  值则与系统稳定状态有关。当系统处于稳定状态时,  $Y=1$ ; 当系统偏离稳态时,  $Y>1$ ; 当系统失稳时,  $Y \rightarrow \infty$ 。因此,  $Y$  值可以定量地刻画非线性系统偏离稳态(或逼近失稳)的程度,也可以作为非线性系统失稳预报的判据。滑坡是一个典型的非线性系统,因此,滑坡的演变过程与规律也可运用加卸载响应比与理论来进行描述与判别。

#### 3.2 堆积层滑坡地下水加卸载响应比动力学参数与位移加卸载响应比动力学预测模型

由堆积层滑坡地下水加卸载动力作用规律可知,堆积层滑坡的位移严格受边坡内地下水位的影响和控制,地下水位的变化应该是引起该类边坡稳定性及其位移速率变化的主要动因,且每年处于动态变化之中,所以可选取地下水位的变化量作为堆积层边坡的加卸载参数。同时,由堆积层滑坡地下水

动力学方程可知,边坡位移速率与位移加速率在其他参数相对不变条件下,主要受地下水及其变化规律的影响与控制。边坡位移既可反映边坡的稳定性演化规律,又能反映加卸载作用过程与变化。因此,位移变化值可作为堆积层边坡加卸载响应参数。

为此,可根据堆积层滑坡月地下水位变化量和月位移变化值作为基础数据,以一个加卸载周期的月地下水位  $h_i$  和前月地下水位  $h_{i-1}$  的差值  $\Delta h$  为加卸载参数,当  $\Delta h > 0$  时为加载,当  $\Delta h < 0$  时为卸载,这就得到一个预测周期中的加卸载月份,其分别构成了一个预测周期中的加卸载区间。将  $\Delta h$  分别按每个加卸载周期年的加卸载正负值统计并取其均值,可分别得到地下水位变化的加卸载序列  $\overline{\Delta h_+}$  和  $\overline{\Delta h_-}$ ; 位移加卸载响应则根据不同的位移变化值确定:对于位移速率,加卸载响应则以一个加卸载周期的某月位移速率  $V_i$  与加卸载周期平均位移速率  $\bar{V}_i$  之差  $\Delta V_i$  为依据。当  $\Delta V_i > 0$  时为加载响应  $V_+$ , 当  $\Delta V_i < 0$  时为卸载响应  $V_-$ , 对应于边坡加载时将边坡位移速率分别按加卸载响应统计取均值,从而分别确定该作用周期的加卸载响应区间序列  $\overline{\Delta V_+}$ ,  $\overline{\Delta V_-}$ ; 对于位移加速度,加卸载响应则以位移加速度等于 0 为基准,大于零的为加载响应值,小于 0 的为卸载响应值,将边坡位移加速度分别按加卸载响应正负值统计取均值,可分别得到位移响应值的区间序列  $\overline{\Delta a_+}$ ,  $\overline{\Delta a_-}$ 。根据加卸载响应比理论的基本原理和堆积层边坡加卸载及加卸载响应参数选择的基本依据,可建立堆积层边坡加卸载响应比预测模型:

(1) 堆积层滑坡位移速率加卸载响应比模型:

$$Y = \frac{V_+}{V_-} = \left( \frac{\overline{\Delta V_+}}{\overline{\Delta h_+}} \right) / \left( \frac{\overline{\Delta V_-}}{\overline{\Delta h_-}} \right) \quad (7)$$

(2) 堆积层滑坡位移加速度加卸载响应比模型:

$$Y = \frac{a_+}{a_-} = \left( \frac{\overline{\Delta a_+}}{\overline{\Delta h_+}} \right) / \left( \frac{\overline{\Delta a_-}}{\overline{\Delta h_-}} \right) \quad (8)$$

#### 3.3 滑坡的位移加卸载响应比判据

边坡的月地下水位增量与月位移速率和位移加速度的关系表明了其加卸载与加卸载响应的相互作用关系与规律,其大小反映了边坡的稳定状态与性质,而加卸载与响应参数<sup>[16]</sup>的正负号又代表了加卸载性质和加卸载响应性质。所以,其位移加卸载响应比值  $Y$  即代表边坡的稳定状态。当边坡处于稳定状态时,其加卸载响应比应为1或以1为基数上下波

动；当边坡稳定性降低时，其加卸载响应比将逐渐增大，且大于1；当边坡处于失稳状态时，其加卸载响应比将会急剧增大，从而形成加卸载响应比时序曲线的突变。此突变点便可作为滑坡预测预报的判据。

## 4 实例分析

### 4.1 八字门滑坡形成的地质环境

八字门滑坡<sup>[17, 18]</sup>位于三峡库区湖北省秭归县，长江北岸支流香溪河右岸河口处，是三峡库区近坝库段典型的堆积层滑坡之一。2003年6月长江三峡水库蓄水至135 m后，滑坡体约高程196 m公路处出现多条弧形拉张裂缝，水库蓄水加剧了滑坡体的变形破坏。滑坡体发育于由侏罗系下统紫红色砂页岩、棕色砂岩及燧石砾石组成的单面山逆向斜坡中(如图3所示)，坡体堆积厚度达10~35 m，且结构松散，较大，有利于地表水入渗。滑带为岩土界面，由于滑坡体为老滑坡复活，滑带富集黏性土。滑坡体的地下水可分为基岩裂隙水和松散岩类孔隙水。滑坡堆积物孔隙水主要分布于滑体中，除上部粉质黏土层中含少量上层滞水外，均属潜水性，含水层由碎块石土、角砾土及粉质黏土组成。地下水接受大气降雨和裂隙水补给，总的由西向东径流，滑坡体含水层的补给条件差、径流途径短、排泄条件好，其水位、水量的季节变化明显。

### 4.2 八字门边坡位移监测及其位移演化规律

八字门滑坡目前共布设有 4 个 GPS 变形监测点，分布高程分别为 179, 188, 219 和 238 m，其中北侧 3 个测桩和西侧与南侧两个测桩分别构成 2 条纵向监测剖面。为了和地表 GPS 监测资料比较分析，在 4 个 GPS 监测点处分别布设钻孔测斜孔、滑坡推力孔、地下水位孔各 1 个，分布高程及孔深分别为：SZK1 孔 23.0/175 m，SZK2 孔 30.4/238 m，SZK3 孔 24.6/221 m，SZK4 孔 39.8/189 m。

八字门滑坡体由于葛洲坝水库蓄水于1982年复活，在高程80~125 m处发育4条长60~80 m、走向总体呈NW~SN向，接近平行于香溪河走向的裂缝，形成了主滑坡的临空面，其变形部位已淹没于库水位以下。1983年再次出现裂缝，1987年长江洪峰期间，在高程155 m处建筑物被撕裂，且老公路变形。2003年6月长江三峡水库蓄水至135 m后，实施了专业监测，滑坡体在高程196 m的公路处出现多条走向NNE, SNNW的弧形拉张裂缝，缝宽2~48 mm，下沉量38~66 cm。显示水库蓄水加剧了滑坡体的变形破坏。

目前，该滑坡仍然处于持续变形中，具明显的持续累进性位移变化，自 2003 年 6 月投入专业监测至 2005 年 11 月，滑坡地表位移最大累计已达 444.8 mm，其他测点累计位移为 245.6~285.8 mm。滑坡后部变形大，中前部变幅小。宏观上主要表现为地

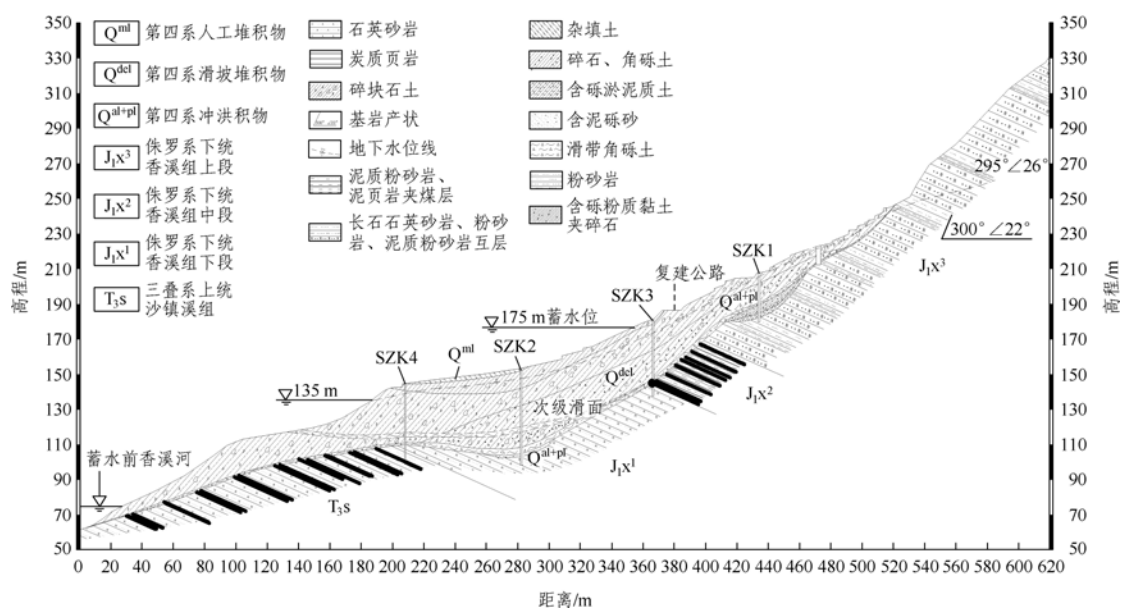


图3 八字门滑坡剖面图<sup>[17, 18]</sup>  
Fig.3 Profile of Bazimen landslide<sup>[17, 18]</sup>

表裂缝张开、公路裂开下沉, 深部测斜孔中因滑体滑动变形滑带处测斜管变形。选取滑坡体两个典型控制监测点: SZK1和 SZK4, 其相关变形曲线见图4。八字门边坡SZK1和SZK4监测点的GPS地表位移和地下水位监测表见表1。

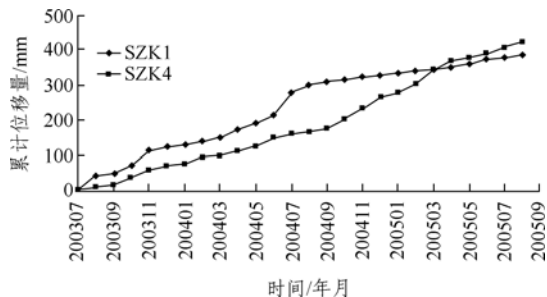


图 4 八字门边坡 SZK1 和 SZK4 监测点的累计位移变化曲线<sup>[17, 18]</sup>

Fig.4 Cumulative displacement variation curves of monitoring points SZK1 and SZK4 for Bazimen slope<sup>[17, 18]</sup>

表 1 八字门边坡SZK1和SZK4监测点的GPS地表位移和地下水位监测表<sup>[17, 18]</sup>

Table 1 GPS ground displacements and groundwater level monitoring table of monitoring points SZK1 and SZK4 for Bazimen slope<sup>[17, 18]</sup>

时间 /年月日	SZK1		SZK4	
	累计位移/mm	水位埋深 观测值/m	累计位移/mm	水位埋深 观测值/m
20030723	2.30	16.01	5.20	7.99
20030818	45.50	12.27	11.10	7.53
20030922	48.52	8.95	18.93	8.46
20031025	70.22	9.45	37.16	8.93
20031117	112.56	8.37	60.80	8.84
20031226	123.91	8.03	71.16	9.62
20040120	132.17	12.27	79.06	10.27
20040221	140.07	12.38	95.00	8.78
2004-3-25	152.33	9.20	100.69	8.92
20040417	172.73	8.96	114.23	11.50
20040518	190.97	8.75	126.60	11.34
20040628	214.77	8.60	149.10	11.22
20040724	279.43	8.99	159.40	8.55
20040824	301.13	10.03	167.31	8.26
20040919	309.69	10.01	175.87	8.96
20041028	316.49	9.45	203.27	8.93
20041119	322.50	8.37	232.86	8.84
20041226	328.20	8.03	265.58	9.62
20050119	334.47	7.93	278.78	10.27
20050227	339.83	7.97	302.33	10.65
20050320	343.83	8.00	345.13	11.06
20050418	352.26	8.00	370.23	11.30
20050515	361.29	8.02	379.46	11.45
20050618	374.29	8.60	389.85	11.53
20050717	378.69	9.24	407.55	11.91
20050815	385.31	9.75	424.25	11.81

### 4.3 八字门滑坡的加卸载响应比特征及其稳定性评价

由于八字门滑坡某些地下水位监测点在很长一段时间内变化较小, 所以本文计算加卸载响应比时采用均值计算法。选取 3 个月为一个加卸载区间, 以 3 个月的平均地下水位为基准地下水位, 加卸载区间内与该水位相差最大的两个月份的地下水位为加卸载水位。高于该水位的月份对应的地下水位和基准水位的差值是地下水位加载量, 其对应月份的位移变化值为位移加载响应量; 低于该水位的月份对应的地下水位和基准水位的差值是地下水位卸载量, 其对应月份的位移和位移速率变化值为位移卸载响应量。由此可以计算和确定上述两个关键监测点的位移速度、位移加速度加卸载响应比。

根据地下水位的高程和 Geo-Slope 边坡稳定性评价软件及三峡库区八字门滑坡勘查报告提供的土体物理力学参数, 使用基于极限平衡方法的 SLOPE/W 模块, 利用 Janbu 法对该边坡不同地下水位条件下稳定系数进行计算。同时根据地下水位加卸载响应比模型(式(7), (8))及 SZK1 和 SZK4 监测点的地下水位和位移动态数据(见表 1), 可计算和确定该滑坡关键点的位移速率和位移加速度加卸载响应比时序曲线。其稳定系数和监测点位移加卸载响应比曲线见图 5, 6。

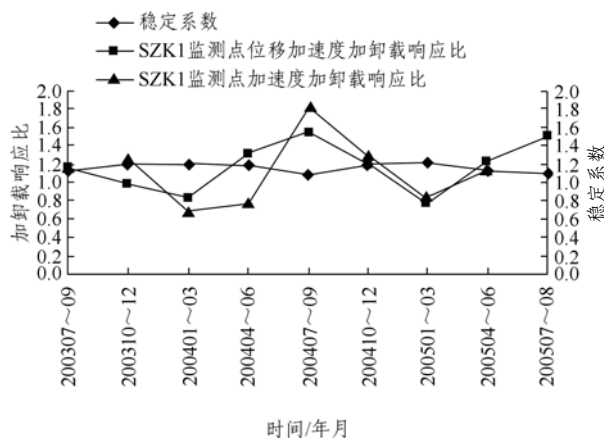


图 5 八字门边坡稳定系数和 SZK1 监测点位移加卸载响应比曲线

Fig.5 Stability coefficient of Bazimen slope and displacement load-unload response ratio curves of monitoring point SZK1

上述计算结果表明边坡稳定系数较小时, 其位移加卸载响应比则较大, 且大于1.0; 稳定系数愈小, 其加卸载响应比偏离1.0程度愈大, 说明滑坡处于

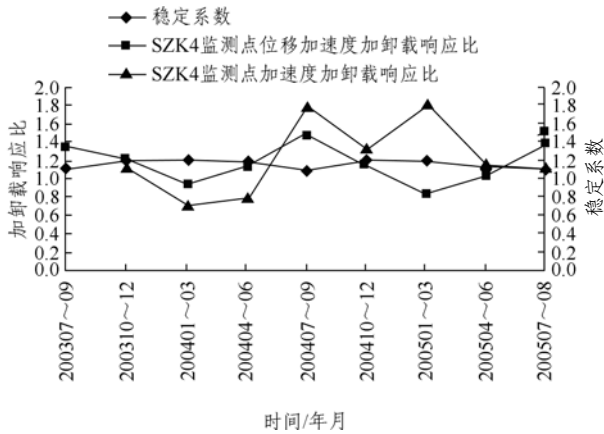


图6 八字门边坡稳定系数和SZK4监测点位移加卸载响应比曲线

Fig.6 Stability coefficient of Bazimen slope and displacement load-unload response ratio curves of monitoring point SZK4

相对不稳定状态；当边坡稳定系数较大时，其加卸载响应比则较小，且小于1.0或在1.0左右波动，说明滑坡处于相对稳定状态。上述变化规律表明边坡位移加卸载响应比变化规律与其稳定性动态演化规律相吻合。加卸载响应比与边坡稳定性演化定量关系与规律表明，可以运用地下水位加卸载响应比参数与模型对堆积层边坡稳定性演化规律与趋势进行评价与预测。

## 5 结论

通过上述研究，可得出如下几点结论：

(1) 水诱发堆积层滑坡的位移与失稳受地下水位变化控制，其位移规律与地下水位存在密切关系，说明地下水位是导致该类边坡不稳定的最直接诱发动力因素。

(2) 根据边坡堆积层的物质组成特点和失稳动因，选用地下水位的变化作为加卸载参数，相应平均位移速率和位移加速度的变化值为加卸载响应参数，由此确定了加卸载响应比，从而有效地将加卸载响应比直接与滑坡失稳的关键动力学因素及位移失稳机制进行有机的耦合。由于边坡的位移加卸载响应比与变化可正确描述和刻画该类滑坡的变形与失稳规律，且能真实地反映了水诱发堆积层滑坡的形成机制，所以可极大提高对堆积层滑坡的预测精度。

(3) 由于堆积层滑坡的地下水位加卸载响应比评价模型为一位移动力学预测模型，所以该模型可克服传统位移数学统计预测模型只能单一描述边坡位移速率(或加速度)而解释不了引起位移速率变化的原因与机制的不足，所确定的加卸载响应比动力学参数时序曲线更能较准确地描述和判别堆积层边坡的稳定演化规律。

(4) 以八字门滑坡分析为例，运用堆积层边坡地下水位加卸载响应比动力学预测模型对其关键位移监测点SZK1，SZK4进行了加卸载响应比分析与计算，发现SZK1，SZK4两点稳定系数较小时，其位移加卸载响应比则较大，且大于1.0；稳定系数愈小，其加卸载响应比偏离1.0的程度愈大，说明滑坡处于相对不稳定状态；当边坡稳定系数较大时，其加卸载响应比则较小，且小于1.0或在1.0左右波动，说明滑坡处于相对稳定状态。上述变化规律表明边坡位移加卸载响应比变化规律与其稳定性动态演化规律相吻合。从而表明该理论方法是水诱发型堆积层滑坡的中、短期预测预报的一种较为准确和有效的方法。

## 参考文献(References):

- [1] 夏金梧, 郭厚桢. 长江上游地区滑坡分布特征及主要控制因素探讨[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(1): 19 - 22, 32.(XIA Jinwu, GUO Houzhen. Distribution characteristics and controlling factors of landslides in the upper reaches of Yangtze River[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1997, 24(1): 19 - 22, 32.(in Chinese))
- [2] 薛果夫, 吕贵芳, 任江. 新滩滑坡研究[C]// 新滩滑坡讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 1988: 39 - 41.(XUE Guofu, LU Guifang, REN Jiang. Study on Xintan landslide[C]// Proceedings of Discussion on Xintan Landslide. Beijing: Science Press, 1988: 39 - 41.(in Chinese))
- [3] 张作辰. 滑坡地下水作用研究与防治工程实践[J]. 工程地质学报, 1996, 4(4): 80 - 85.(ZHANG Zuochen. Mechanism of groundwater effect landslide stability and control construction[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(4): 80 - 85.(in Chinese))
- [4] 刘才华, 陈从新, 冯夏庭, 等. 地下水对库岸边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 419 - 422.(LIU Caihua, CHEN Congxin, FENG Xiating, et al. Effect of groundwater on stability of slopes at reservoir bank[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 419 - 422.(in Chinese))
- [5] 魏丽敏, 何群, 林镇洪. 考虑地下水影响的滑坡稳定性分析[J].

- 岩土力学, 2004, 25(3): 422 - 426.(WEI Limin, HE Qun, LIN Zhenhong. Stability analysis of landslide under influence of groundwater[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 422 - 426.(in Chinese))
- [6] 张卫民, 陈兰云. 地下水位线对土坡稳定的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5 319 - 5 322.(ZHANG Weimin, CHEN Lanyun. Effect of water table on soil slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5 319 - 5 322.(in Chinese))
- [7] BAKER R. Inter-relations between experimental and computational aspects of slope stability analysis[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2003, 27(5): 379 - 401.
- [8] URCIUOLI G. Strain preceding failure in infinite slopes[J]. International Journal of Geomechanics, 2002, 2(1): 93 - 112.
- [9] IVERSON R M, REID M E. Acute sensitivity of landslide rates to initial soil porosity[J]. Science, 2000, 290(5 491): 513 - 521.
- [10] 殷坤龙, 汪 洋, 唐仲华. 降雨对滑坡的作用机制及动态模拟研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(1): 75 - 78.(YIN Kunlong, WANG Yang, TANG Zhonghua. Mechanism and dynamic simulation of landslide by precipitation[J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(1): 75 - 78.(in Chinese))
- [11] 黄永江, 熊耀湘. 渗流作用下土质边坡稳定性分析[J]. 水利科技与经济, 2005, 11(8): 464 - 466.(HUANG Yongjiang, XIONG Yaoxiang. Analysis of earth slope stability under seepage condition[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2005, 11(8): 464 - 466.(in Chinese))
- [12] 尹祥础, 尹 灿. 非线性系统的失稳前兆与地震预报——响应比理论及其应用[J]. 中国科学(B 辑), 1991, 42(5): 512 - 518.(YIN Xiangchu, YIN Can. Destabilized points of nonlinear system and the earthquake prediction[J]. Science of China(Series B), 1991, 42(5): 512 - 518.(in Chinese))
- [13] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平. 加卸载响应比理论及其在地震预测中的应用研究进展[J]. 地球物理学报, 1994, 37(增 1): 223 - 230.(YIN Xingchu, CHEN Xuezhong, SONG Zhiping. Development of load-unload response ratio theory and its application to earthquake prediction[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(Supp.1): 223 - 230.(in Chinese))
- [14] 姜 彤, 马 瑾, 许 兵. 基于加卸载响应比理论的边坡动力稳定分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 626 - 631.(JIANG Tong, MA Jin, XU Bin. Dynamic analysis method of slope stability based on LURR theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 626 - 631.(in Chinese))
- [15] 贺可强, 周敦云, 王思敬. 降雨型堆积层滑坡的加卸载响应比特征及其预测作用与意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2 665 - 2 670.(HE Keqiang, ZHOU Dunyun, WANG Sijing. Features of load-unload response ratio and its significance in prediction of colluvial landslide induced by rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2 665 - 2 670.(in Chinese))
- [16] 贺可强, 阳吉宝, 王思敬. 堆积层滑坡位移动力学理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.(HE Keqiang, YANG Jibao, WANG Sijing. Dynamic displacement theory of debris landslide and its application[M]. Beijing: Science Press, 2007.(in Chinese))
- [17] 湖北省地质灾害防治工程勘察设计院. 三峡库区三期地质灾害防治秭归县归州镇八字门滑坡勘查报告[R]. 宜昌: 湖北省地质灾害防治工程勘察设计院, 2005.(Institute of Reconnaissance Design on Geo-disaster Preventing and Controlling in Hubei Province. The third period of geo-disasters preventing and controlling on the Three Gorges Reservoir region—investigation report on Bazimen landslide on Guizhou Town, Zigui County[R]. Yichang: Institute of Reconnaissance Design on Geo-disaster Preventing and Controlling in Hubei Province, 2005.(in Chinese))
- [18] 湖北省岩崩滑坡研究所. 三峡库区秭归兴山两县地质灾害监测预警工程专业监测简报(2003~2005)[R]. 宜昌: 湖北省岩崩滑坡研究所, 2006.(Research Institute of Collapses and Landslide in Hubei Province. Specialized monitor bulletin of geo-disaster warning project in the Three Gorges Reservoir region(2003 - 2005)[R]. Yichang: Research Institute of Collapses and Landslide in Hubei Province, 2006.(in Chinese))