

堆积层滑坡水动力位移耦合预测参数 及其评价方法研究

贺可强¹, 杨德兵¹, 郭璐¹, 李晶²

(1. 青岛理工大学 地质环境与效应工程技术研究中心, 山东 青岛 266033;

2. 中国石油天然气华东勘察设计研究院 岩土工程处, 山东 青岛 266071)

摘 要: 在系统分析滑坡的物质组成和失稳动因的基础上, 分析和研究了地下水在滑坡稳定性演化过程中的卸载与加载动力作用及其位移响应规律和特点。从非线性系统动力学角度, 提出了运用地下水卸加载动力与位移响应耦合预测参数来评价边坡稳定性演化规律与失稳特征, 即以地下水位变化量作为堆积层滑坡的卸加载动力参数, 以相应的位移作为其卸加载响应参数, 建立和确定了地下水卸加载动力与位移响应比预测参数与评价模型。同时, 运用损伤力学基本原理, 建立了其卸加载响应比与坡体损伤变量和稳定性系数的定量关系以及失稳判据。以三峡库区典型堆积层滑坡分析为例, 运用地下水动力与位移耦合预测模型对其稳定性进行了分析与评价, 发现地下水动力位移耦合预测参数变化与边坡稳定性实际动态演化规律基本吻合。研究成果表明, 所确定的参数是水诱发型堆积层滑坡的一种有效位移动力评价参数, 可运用该参数对该类滑坡的动态稳定性进行实时监测预警与评价。

关 键 词: 堆积层滑坡; 水动力位移耦合预测参数; 卸加载响应比; 新滩滑坡

中图分类号: O 302

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2015) 增 2—0037—10

Prediction parameter of water dynamics coupled with displacement and evaluation method of debris landslide

HE Ke-qiang¹, YANG De-bing¹, GUO Lu¹, LI Jing²

(1. Engineering Technique Research Center of Geo-Environment and Impact, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China;

2. Geotechnical Engineering Office, China National Petroleum Investigation and Design and Survey Institute in East China, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: On the basis of systematic analysis of the material composition and destabilized mechanism of debris landslide induced by water, the dynamic action of unloading and loading and its response law of groundwater in the process of the dynamic stability evolution of the slope are systematically analyzed. The unloading-loading response ratio parameter to evaluate the laws of the dynamic stability of the landslide evolution and destabilized features are analyzed and put forward from the viewpoint of the nonlinear system dynamics. This paper firstly proposes that the monthly change of groundwater table can be taken as the unloading-loading parameter of debris landslide and its displacement velocity and acceleration rate can be taken as the response parameter to unloading-loading are proposed. Thus, the dynamic displacement parameters and dynamic prediction model of the unloading-loading response ratio of the groundwater table are determined. Meanwhile, the quantitative relationship between unloading-loading response ratio and damage variable & the stability coefficient and the criterion of displacement response ratio to unloading-loading are determined by using the theory of damage mechanics and the damage variable parameters of slope. Finally, taking the typical debris landslide of the Three Gorges Reservoir region—Xintan landslide for example, the calculation of unloading-loading response ratio of monitoring points of Xintan landslide is completed by using the dynamic displacement prediction models of the groundwater. The computed results show that the curves of unloading-loading response ratio of monitoring points basically agree with the dynamic evolution law of the slope stability. The results of the study show that the parameter proposed in this paper is a kind of effective dynamics appraisal parameter of displacement in the stability of landslides induced by water and it can be used to make real-time monitoring warning and evaluation on the dynamic stability of this kind of landslides.

Keywords: debris landslide; water dynamics displacement prediction parameter; unloading-loading response ratio; Xintan landslide

收稿日期: 2014-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(No.41372297); 高等学校博士学科点专项科研基金(No.20113721110002)。

第一作者简介: 贺可强, 男, 1960 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害预测、评价与防治研究。E-mail: keqianghe@163.com

1 引言

据统计,堆积层边坡的失稳 94%以上是由降雨和地下水变化以及人类活动影响而引起的^[1]。堆积层滑坡坡体孔隙比大、透水性强、易变形,而下伏基岩的透水性相对很弱,在发生大气降雨或地下水补给时常常在基岩面附近大量积水,形成暂时性的含水层或者地下水位变幅带,致使斜坡坡体水动力突然增大,松散堆积物底层强度大幅度降低,导致滑坡发生。这类滑坡坡体物质组成与结构的特殊性,决定了降雨及地下水动力作用常常是导致其失稳的最主要动因。

由于堆积层滑坡物质组成的复杂性、滑面与滑移边界条件的隐蔽性以及坡体结构的非均匀与大变形特殊性,给各种传统力学的评价方法的运用带来一定的困难和不便。此外,这类边坡系统演化的位移时间序列数据含有边坡位移系统演化的丰富信息,同时降雨和地下水又是诱发堆积层滑坡的主要诱因和动力触发因素,所以基于降雨和地下水作用与位移演化规律的边坡稳定性预测一直是比领域中最为有效和重要的方法之一,国内外学者已进行了卓有成效的科学探索,并取得了大量的理论研究成果。李晓等^[2]研究指出,合理确定降雨和库水位变动联合作用下滑坡地下水动力场是库岸滑坡稳定性评价的关键。黄承忠^[3]结合三峡库区堆积层滑坡的具体情况,讨论了地下水对滑坡的物理化学和力学作用,论证了地下水物理化学作用对三峡库区松散堆积层滑坡稳定性的影响远小于地下水动力作用对滑坡稳定性的影响。王家海等^[4]在分析地下水对滑坡稳定性影响的基础上,对比分析了滑坡稳定性影响因素与地下水水位影响因素,论证了利用地下水水位对单体滑坡预警在理论上的可行性,并探讨利用地下水水位对滑坡预警的方法。陈国金等^[5]遵循地下水流-变形-滑坡这-思路,指出了坡体地下水流具有非常复杂的动态变化过程。殷坤龙等^[6]从动态分析和数值模拟两方面,讨论了滑坡过程中的地下水作用机制和降雨期间地下水动力场的时空分布问题。荷兰学者 Baker^[7]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。WANG Gong-hui 等^[8]对降雨型滑坡的孔隙水压力形成与边坡运动进行了试验研究,指出了孔隙水压力的产生是滑坡突变失稳的动因。Chae 等^[9]指出,降雨引起的滑坡体的体积含水率变化比孔隙水压力波动更加明显,提出将边坡的体积含水率梯度作为滑坡预测

的失稳阈值。陆付民等^[10]将滑坡变形看作是时间和地下水位的函数,使用泰勒级数建立了卡尔曼滤波模型,并用于滑坡变形的预测预报。

上述研究成果均为水诱发型滑坡的位移动力学预测进行了有益的探索研究,并奠定了坚实的基础。然而在地下水机制预测模型中,研究的重点往往是降雨或地下水作用形成机制或者降雨和地下水与滑坡发生频率的统计关系,缺少对引起边坡位移响应信息变化的动力学原因及机制进行深入与系统研究,更缺少将滑坡形成的动因和机制与位移响应信息变化及其评价方法进行耦合交叉的研究,因此,位移预测分析结果也就具有很大的或然性和不确定性,特别是对具有随机振荡特征的位移-时间曲线复杂动力作用边坡,由于受动力卸加载因素变化的影响,其位移-时序曲线不是单调变化,而是呈波浪起伏变化,所以运用位移时序统计预测模型预测其稳定性时往往把握不住边坡的真正稳定状态,常会引起错判。如何根据该类边坡的失稳动因与位移规律,对堆积层滑坡进行科学预测与有效防治是目前滑坡灾害预测与防治领域亟待解决的关键问题,具有深远的理论意义及实用价值。

本文以滑坡非线性位移动力学理论为基础,针对堆积层滑坡物质组成和地下水作用特点及位移动力学规律及失稳机制,将地下水动力的变化作为滑坡变形失稳的动因,将滑坡位移速率变化作为滑坡地下水加载动力作用的稳定性变化响应,提出和运用地下水卸加载与位移响应比耦合预测参数,对此类滑坡地下水位卸加载响应比动力学规律与特征进行初步分析与研究,建立了集位移定量预测模型与地下水机制评价模型特点于一体的卸加载响应比物理动力预测模型,并以此为依据对其稳定性演化规律进行预测与评价。

2 边坡地下水动力卸加载位移响应比及其演化规律

2.1 卸加载响应比及其变化特征与意义

2.1.1 非线性卸加载响应比参数及其局限性分析

卸加载响应比及评价模型是滑坡非线性系统动力学研究中的新思路,其理论渊源是加卸载响应比理论。加卸载响应比理论是由我国学者尹祥础等^[11]于 1991 年首先提出的一种用于研究非线性系统失稳前兆和失稳预报的理论,长期以来主要用于地震预测预报研究中。许强等^[12]首次运用固体潮应理论对岩体边坡建立了加卸载响应比预报模型,为加卸载响应比理论在滑坡预报领域的研究进行了初步的

尝试和有益的探索。贺可强等^[13-14]在系统分析堆积层滑坡的物质组成和失稳动因的基础上, 将加卸载响应比理论应用到堆积层滑坡预测预报领域, 并在不断地应用研究中建立了滑坡的加卸载响应比物理动力学预测模型, 推进了加卸载响应比理论在边坡工程中的应用。加卸载响应比理论对边坡的失稳预测预报将边坡的力学作用条件和过程与边坡的位移响应进行了有机的耦合与集成, 既克服了力学评价法的物理力学参数与边界条件等误差而带来的影响, 又考虑了传统位移时序预测方法所无法考虑的物理作用过程与规律, 具有其得天独厚的优势。然而, 加卸载响应比理论运用 $[1, \infty)$ 区间的一个数对边坡稳定性进行描述与评价, 其中, 1 代表边坡绝对稳定; ∞ 代表边坡绝对失稳, 即将加卸载响应比 $Y \rightarrow \infty$ 作为边坡的失稳判据。在实际边坡稳定性评价中要准确地找到代表其失稳或整体不稳定的加卸载响应比很困难, 难以判别加卸载响应比的无穷大值究竟多大才会导致边坡最终破坏失稳, 只能是趋势, 给边坡稳定性的预测同样带来了一定的不确定性与模糊性, 更难以对滑坡的稳定性状态进行具体的定量描述与判别, 使其在实际边坡工程稳定性的评价与预测预报中受到了很大的局限。

2.1.2 卸加载响应比及其演化规律

鉴于加卸载响应比的上述不足与局限, 本文在加卸载响应比基础上, 从边坡稳定性定量分析与评价的角度提出和确定了非线性位移动力学卸加载响应比参数。现代非线性科学理论认为, 同一事物处于不同的发展演化阶段时, 其对外界扰动的响应是不一样的, 如果将滑坡发展演化过程中可能遭受的各种外界因素, 如降雨、库水位变动、人类工程活动等通称为广义荷载作用, 并用 M 来表示, 将斜坡经受广义荷载作用后所产生的响应(如位移、应变、声发射等状态变量)定义为 R , 则广义荷载与系统响应之间具有如图 1 所示的关系。

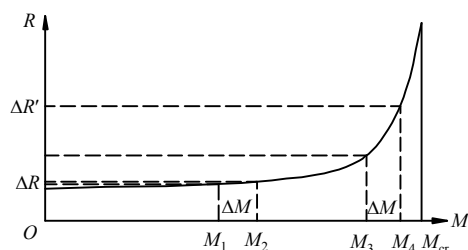


图 1 边坡演化过程中广义荷载与系统响应的关系
Fig.1 Relationship between general load and system response during slope evolution process

设荷载增量为 ΔM 时, 所对应的响应增量为 ΔR ,

定义响应率 χ 为

$$\chi = \lim_{\Delta M \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta M} \quad (1)$$

令 χ_+ 与 χ_- 分别代表卸载与加载响应率。荷载很小时系统处于稳定状态, 这时 R 与 M 之间为线性或近似线性关系, 卸载时的响应率 χ_- 与加载时的响应率 χ_+ 基本相等, 如果荷载不断增大, 逐渐接近临界值 M_{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, $\chi_+ \rightarrow \infty$, 表明当系统临近失稳时, 即使是极其微小的荷载作用都会使系统产生剧烈的响应。

对非线性系统进行加载即使荷载增量保持不变, 由于系统的稳定状态不一样其响应率也会有很大差别, 响应率越大系统越接近失稳。为了找出更一般的规律, 定义卸加载响应比:

$$\gamma = \frac{\chi_-}{\chi_+} = \lim_{\Delta M \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta R_-}{\Delta M_-} \right) / \left(\frac{\Delta R_+}{\Delta M_+} \right) \quad (2)$$

式中: ΔR_- 、 ΔR_+ 分别为卸载响应增量和加载响应增量; ΔM_- 、 ΔM_+ 分别为卸载增量和加载增量。

对于弹性系统, $\chi_+ = \chi_- = c$, 所以 $\gamma = 1$, 但对于非线性系统, γ 值则随系统稳定状态不同而变化。系统处于稳定状态时, $\gamma = 1$; 系统偏离稳态时, $\gamma < 1$; 系统失稳时, $\gamma \rightarrow 0$ 。因此, γ 值可以定量地刻画非线性系统的稳定性程度, 也可作为非线性系统失稳预报的判据。

卸加载响应比将其比值 $\gamma \rightarrow 0$ 作为失稳判据, 当 $\gamma \rightarrow 1$ 时, 边坡处于稳定状态; 当 $\gamma \rightarrow 0$ 时, 边坡失稳。与加、卸载响应比相比, 卸加载响应比将边坡的失稳点评价和定义为一个准确的实数 0, 改变了加卸载响应比的那个不确定和模糊的 ∞ , 其稳定性判据将边坡失稳从一个不确定趋势转化为一个确定的点, 将边坡的稳定性评价区间从一个开放区间转化为一个闭合区间, 其微妙的转变将使卸加载响应比参数及评价模型在实际边坡工程防治和评价等方面具有更加有效和方便的工程应用价值。

2.2 堆积层滑坡地下水卸加载位移响应比参数与动力学预测模型

2.2.1 堆积层滑坡地下水卸加载和卸加载响应参数的选择与分析

由于堆积层滑坡的地下水动力作用过程与变形响应具有很强的非线性, 而且不同类型、不同规模的滑坡的形成机制和位移作用规律也各不相同, 因此将卸加载响应比应用于滑坡预报必须首先对边坡

的地下水卸加载做出合理判别, 选择科学的参数作为其卸加载及卸加载响应参数。

堆积层边坡坡体的下伏基岩一般为不透水岩层, 而且堆积层滑坡的坡体由土和砾石混合体组成, 其性质属于黏弹性体, 由此可确定和概化该类充水倾斜边坡物理模型 (见图 2) 和边坡稳定性位移动力学方程^[15]:

$$m_i \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} + \eta_i \frac{\partial X}{\partial t} + K_i X = h(t)[(\rho_s - \rho)L \sin a + (\rho - \rho_s + \rho_w)L \tan \varphi \cos a] + L \rho h (\sin a - \cos a \tan \varphi) - cL / \cos a - R_{i+1} \quad (3)$$

式中: m_i 为坡体质量; η_i 为坡体黏滞系数; K_i 为坡体抗力系数; X 为边坡的位移量; $h(t)$ 为地下水位值。

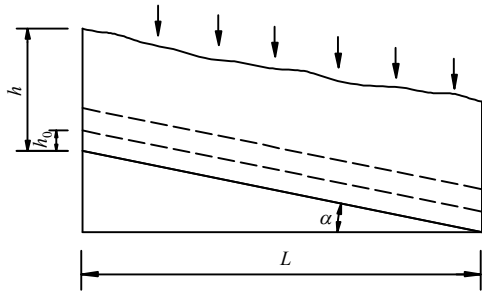


图 2 单滑动面滑坡的简化二维极限平衡分析模型
Fig.2 Simplified two-dimensional limit equilibrium analytical model of landslide with single sliding plane

由上述边坡的位移动力学方程式 (3) 可知, 堆积层滑坡的位移在其他因素不变的条件下严格受边坡内地下水位的影响和控制, 地下水位的变化是该类滑坡失稳及其位移速率变化的直接动力因素。同时, 地下水位的升降是边坡卸加载动力条件, 且往往受每年的降雨或库水位的影响处于动态周期性变化之中。地下水位上升等于增加了边坡下滑力, 对边坡是加载过程; 地下水位下降等于减少了边坡的下滑推力, 对边坡是卸载过程。上述卸载与加载过程必然引起边坡位移速度或位移加速度的减少或增加, 也就是卸加载响应值的减小或增大。

可以选取地下水的变化量作为堆积层边坡的卸加载动力参数, 选取边坡的位移速率或加速率作为边坡的卸加载响应参数, 并以此确定边坡的地下水卸加载动力与位移耦合预测参数, 即地下水卸加载与位移响应比作为边坡稳定性评价参数, 从而可较好地揭示和反映出导致该类滑坡失稳的机制与动因, 极大提高和改善其滑坡的预测精度。

2.2.2 堆积层滑坡卸加载响应比动力预测模型与参数

根据水诱发型堆积层滑坡的位移动力学作用规律和卸加载特点, 选取堆积层滑坡地下水位月变化值和月位移量作为其卸加载及其动力响应的基础数据。其中, 卸加载参数是以一个卸加载周期的某月地下水位 H_i 和前月地下水位 H_{i-1} 的差值 ΔH 为动力卸加载标准, 即当 $\Delta H < 0$ 时为卸载, 当 $\Delta H > 0$ 时为加载, 由此得到了一个卸加载周期中的卸加载月份, 并分别构成一个地下水动力作用周期中的卸加载区间。将 ΔH 分别按每个卸加载周期的卸加载正负值进行统计并取其平均值, 可分别得到地下水位的卸加载参数序列 $\overline{\Delta H_-}$ 和 $\overline{\Delta H_+}$; 卸加载位移响应则根据滑坡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卸加载周期的某月位移速率 V_i 与卸加载周期平均位移速率 $\bar{V}_i$ 之差 ΔV 为依据。当 $\Delta V > 0$ 时, 为加载响应 V_+ ; 当 $\Delta V < 0$ 时, 为卸载响应 V_- , 对应于边坡卸加载时将边坡位移速率分别按卸加载响应统计取均值, 从而分别确定该作用周期的卸加载响应区间序列 $\overline{\Delta V_-}$ 和 $\overline{\Delta V_+}$ 。对于位移加速度, 卸加载响应则以位移加速度等于 0 为基准, 小于 0 的为卸载响应值, 大于 0 为加载响应值。将边坡位移加速度分别按卸加载响应正负值进行统计并取均值, 可得到卸加载序列的位移加速度响应均值 $\bar{a_-}$ 和 $\bar{a_+}$ 。

根据卸加载响应比模型 (见式 (2)), 可以建立堆积层滑坡卸加载位移速度和位移加速度响应比预测模型:

$$\gamma = \frac{\chi_-}{\chi_+} = \left(\frac{\Delta R_-}{\Delta M_-} \right) / \left(\frac{\Delta R_+}{\Delta M_+} \right) = \left(\frac{\bar{V}_-}{\Delta H_-} \right) / \left(\frac{\bar{V}_+}{\Delta H_+} \right) \quad (4)$$

$$\gamma_1 = \frac{\chi_-}{\chi_+} = \left(\frac{\Delta R_-}{\Delta M_-} \right) / \left(\frac{\Delta R_+}{\Delta M_+} \right) = \left(\frac{\bar{a_-}}{\Delta H_-} \right) / \left(\frac{\bar{a_+}}{\Delta H_+} \right) \quad (5)$$

式中符号意义同前。

2.3 堆积层滑坡地下水卸加载响应比 γ 参数特点及预测作用与意义

卸加载响应比 γ 是将边坡位移与地下水动力进行有机耦合的边坡稳定性动力评价参数, 既可以反映边坡的位移变化特点, 又刻画和评价了边坡的下滑动力变化规律, 可以弥补传统位移预测参数只能反映和描述边坡的变形变化规律, 而揭示和解释不了引起边坡变形与失稳的形成机制与力学动因的局限。

由于 γ 是一种物理动力学评价参数, 具有明确的边坡稳定性判据, 即当边坡处于稳定弹性变形阶段, 卸载和加载所产生的变形响应基本相同, 其卸

加载响应比 $\gamma=1$ 或以1为基点而上下波动;当边坡进入不稳定性塑性变形阶段时,卸加载响应量逐渐低于加载响应量,其卸加载响应比 $\gamma<1$,且边坡稳定性越低,卸加载响应比越小;当边坡进入临界整体失稳时,其卸加载响应比将会出现突变,即快速 $\gamma\rightarrow 0$ 。因此该参数可弥补传统位移预测参数不存在稳定统一的位移失稳判据的局限。

由于 γ 是由边坡位移和地下水位变化的可监测性参数决定的,它是一种动态的可实施实时监测的边坡稳定性评价参数,不容易产生取样和试验测试误差,而且还弥补了传统极限平衡法稳定性系数无法对边坡稳定性实施动态分析与评价的局限,同时便于运用该位移动力参数对该类滑坡实施动态监测与失稳预警。

3 地下水卸加载响应比与边坡稳定性的关系及其失稳判据

极限平衡法是评价边坡稳定性最为常用的主要评价方法,该法在对水诱发边坡稳定性评价中往往是根据地下水的静态分布计算其稳定性系数,所得出的稳定性系数往往是边坡某一时刻的静态评价结果,而现实中地下水对边坡的影响作用机制则是随着时间和空间而发生动态变化的,无法运用传统极限平衡法对水诱发边坡动态稳定性进行实时准确的科学分析与评价。卸加载响应比是由边坡位移和地下水位变化的可监测性参数决定的,它是一种动态的可实施实时监测的边坡稳定性评价参数与方法,研究和建立地下水卸加载响应比参数与边坡稳定性系数的定量关系,并依据地下水卸加载响应比确定边坡的稳定性系数对滑坡实施动态监测评价和失稳预警预报将具有重要的理论意义与实用价值。

3.1 卸加载响应比与边坡稳定性系数的定量关系分析

根据损伤力学基本原理,损伤表达的是材料的劣化过程,对于滑坡的碎石土坡体而言,损伤就是使坡体产生不可逆的损伤塑性变形过程,也是边坡稳定性与其卸加载响应比逐渐降低过程,所以卸加载响应比在宏观上可定量地体现和评价滑坡坡体的损伤演化过程与稳定性演化规律,可以依据反映材料内部损伤程度的损伤变量 D 建立卸加载响应比与边坡的稳定系数之间理论联系与定量关系。

从损伤力学的角度看,滑坡的孕育过程就是坡体材料的损伤演化过程。在损伤力学中,损伤过程与损伤程度可以运用损伤变量 D 来定量刻画与描述,其大小被定义为材料的变形模量 E 的变化率

$D^{[16]}$:

$$D = \frac{E_0 - E}{E_0} = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (6)$$

式中: E_0 为初始状态(未损伤)的模量; E 为受损伤的模量。材料未损伤时, $E=E_0$, $D=0$;材料完全破坏时, $E=0$, $D=1$ 。

根据卸加载响应比参数的定义,卸加载响应比即是卸加载阶段坡体的位移响应(应变)和其动力变化(应力)之比与相应加载阶段坡体的位移响应(应变)和其动力变化(应力)之比的比值,即

$$\gamma = \frac{\Delta \varepsilon_- / \Delta \sigma_-}{\Delta \varepsilon_+ / \Delta \sigma_+} = \frac{1/E_-}{1/E_+} = \frac{E_+}{E_-} \quad (7)$$

考虑到材料在卸载时的模量一般可近似等于初始弹性模量 E_0 ,即 $E_- = E_0$ 。加载时其模量为其变形模量,即 $E_+ = E$,于是有

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - \gamma \quad (8)$$

当 $\gamma=1$ 时, $D=0$,材料未受损伤,处于稳定状态;当 $\gamma\rightarrow 0$ 时, $D=1$,材料完全损伤。多数情况下当 $D<1$ 时,表明材料已部分破坏。由式(8)可进一步导出:

$$\gamma_{cr} = 1 - D_{cr} \quad (9)$$

式中: D_{cr} 为临界损伤变量。

式(8)、(9)表明,岩土体材料的卸加载响应比 γ 与其损伤变量 D 之间存在一一对应的定量关系。

边坡岩土体的剪切破坏实质上是岩土体的结构损伤导致其力学性质变化的最终形式,在对边坡岩土体损伤过程的研究中抗剪强度是比较敏感且易测量的因素。当部分岩土体达到其抗剪强度时,即发生部分破坏而整体表现稳定;当边坡岩土体完全达到其抗剪强度时,坡体发生完全破坏。因此,可以从岩土体强度破坏意义上定义损伤变量 D ,为边坡潜在滑移面上岩土体的剪切应力大于抗剪强度时的破坏概率^[17],描述的是边坡岩土体的破坏程度。在边坡稳定性极限平衡法评价中,稳定性系数通常被定义为边坡潜在滑移面上的抗滑力与下滑力之比,描述的是边坡的稳定性程度。根据张道兵^[17]对边坡安全系数的定义,边坡整个损伤直至破坏过程中,损伤变量 D_i 在逐渐趋近于容许最大损伤变量 D_{cr} ,因此,安全系数即为极限损伤变量 D_{lim} 与容许最大损伤变量 D_{cr} 之比^[17]:

$$K = \frac{D_{\lim}}{D_{cr}} \quad (10)$$

由此可知, 边坡稳定性系数应为极限损伤变量 $D_{\lim}$ 与边坡任意时刻损伤变量 D_t 之比, 即

$$F_t = \frac{D_{\lim}}{D_t} \quad (11)$$

式中: D_t 为 t 时刻的损伤变量; $D_{\lim}$ 为极限损伤变量取 1。

由卸加载响应比与损伤变量的关系 (见式 (8)) 以及损伤变量与边坡稳定系数的关系 (见式 (11)), 可以确定边坡卸加载响应比与其稳定性系数之间的关系:

$$\gamma_t = 1 - \frac{1}{F_t} \quad (12)$$

式 (12) 表明, 边坡卸加载响应比与其稳定系数之间存在着——的对应关系, 可以运用卸加载位移响应比定量地确定边坡的稳定系数, 并可定量地描述和评价边坡的动态稳定性。

3.2 堆积层滑坡卸加载响应比稳定性与失稳判据

边坡失稳预测的研究归根结底是对其发生的可能性做出合理的评价和科学的预测。纵观边坡稳定性评价领域, 目前公认实用的依然是边坡的稳定性系数作为边坡稳定性的评判标准, 它具有明确判据, 用边坡实际稳定系数是否大于等于 1 或大于 1 的程度来判别边坡是否稳定和稳定程度。在滑坡防治及其工程勘察设计的实际工作中, 通常给稳定性系数设定一个安全储备得到一个安全系数 K 作为其稳定性与否则的判据, 它是为了考虑工程的重要性、参数不确定性大小等给出的稳定性系数的一个阈值。因此, 由式 (9)、(10) 可以得出边坡卸加载响应比稳

定性判据为

$$\gamma_{cr} = 1 - \frac{1}{K} \quad (13)$$

即为运用边坡安全系数所确定的边坡卸加载响应比稳定性判据。根据边坡卸加载响应比稳定性判据, 可对边坡的稳定性进行以下分析与评价: 当边坡的卸加载响应比 $\gamma \geq \gamma_{cr}$, 边坡处于稳定性状态; 当边坡的卸加载响应比 $\gamma < \gamma_{cr}$, 边坡处于不稳定状态; 当边坡稳定性系数 F_t 趋近于 1 时, 卸加载响应比参数趋近于 0, 边坡处于临界失稳状态。

4 实例分析

4.1 新滩滑坡的基本概况

新滩滑坡位于湖北省秭归县川江巷道的咽喉之处, 隔江对面为链子崖危岩体, 距离三峡水利工程约 27 km, 滑坡于 1985 年 6 月 10 日发生整体失稳。整个滑坡坐北朝南, 总长 1 900 m, 东西宽 210~710 m, 滑坡面积为 0.73 km², 体积约 3×10⁷ m³, 北部较窄南部较宽, 后缘高程为 900 m 左右, 前缘垂直距江边 65 m, 坡面平均约为 23°。堆积物厚一般为 30~40 m, 自东向西增厚, 姜家坡西侧至高家岭一带厚 80 m, 最厚达 110 m。堆积物以崩(坡)积碎块石夹黏土为主; 下伏基岩面为志留系砂、页岩, 形态比较复杂, 其边坡堆积剖面图, 如图 3 所示。

整个滑坡地下水存在主要受到大气降雨补给。新滩滑坡地处鄂西暴雨区内, 年降雨量为 1 100 mm/a, 雨量多集中于 5~9 月, 占全年的 61%。具有约 2 km² 以上汇水面积的老滑坡汇集的地表水大量渗入滑体中, 促使地下水位抬升, 孔隙水压力和

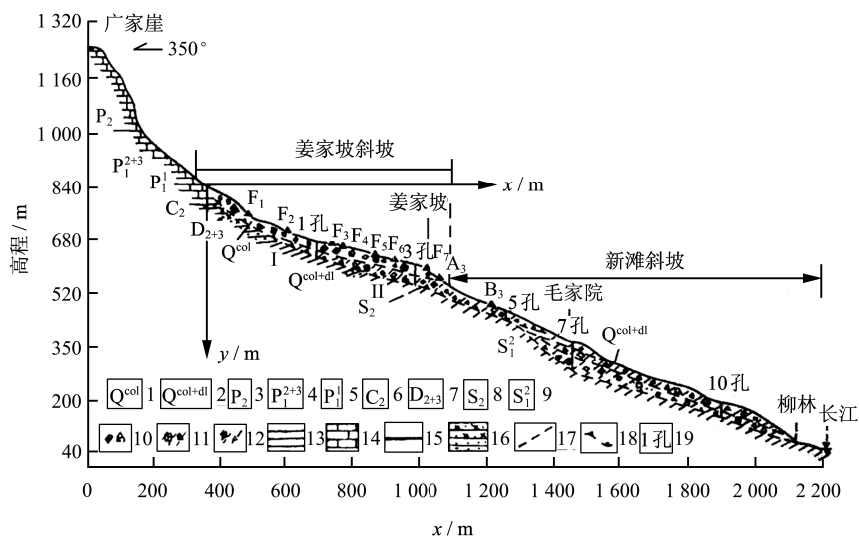


图 3 新滩边坡地质纵剖面图^[15]

Fig.3 Sectional arrangement drawing of Xintan landslide^[15]

浮托力增高, 并软化基岩顶面上的滑带土, 使其力学强度降低, 加剧滑坡的变形发展。

4.2 新滩滑坡位移监测及其位移演化规律

为了确定新滩边坡位移变形与失稳规律, 1977 年在该边坡上布设了与长江大致平行的 A~E 五条视水准线, 对边坡的位移与降雨量进行了系统全面的监测, 其边坡的基本地质条件及监测点的分布如图 4 所示。

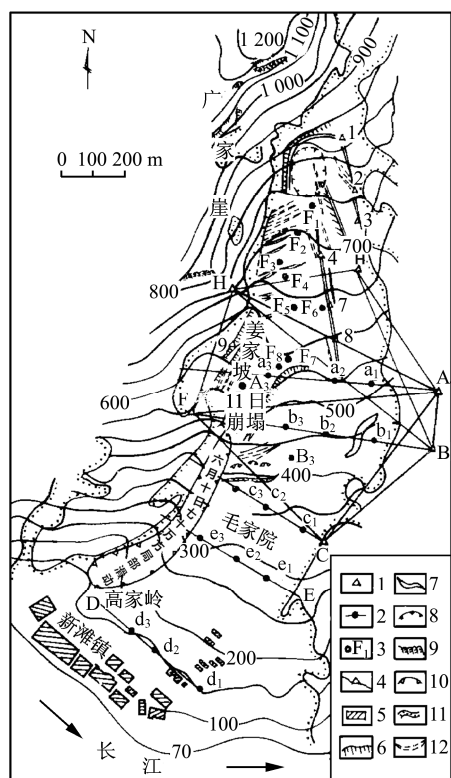


图 4 新滩滑坡变形观测点及滑前裂缝分布^[15]

Fig.4 Observation points of Xintan landslide and fissure distribution before sliding^[15]

本文选取新滩滑坡的监测降雨量 (见表 1) 和该滑坡主滑区最具有代表性的 A3 和 B3 两个点监测点的累计位移量 (见图 5) 为分析依据, 并经统计分析得到其 A3 点的月位移速率和 B3 点的月位移速率 (见表 1)。

根据日本谷雄敏等建立的有效降雨量与地下水位变化量的关系^[18]为 $h(t) = AX_a(t) + B$, 其中 A 、 B 与岩土体性质有关, $A > 0$ 及新滩滑坡区的有效降雨量监测值 (见表 2), 并运用工程地质类比法, 可综合确定新滩滑坡坡体岩土体性质参数 A 和 B 为 $A = 0.015\ 93$, $B = 7.429\ 97$, 由此可确定新滩滑坡其相应时间的平均地下水位 ($h(t)$) 值 (见表 3)。

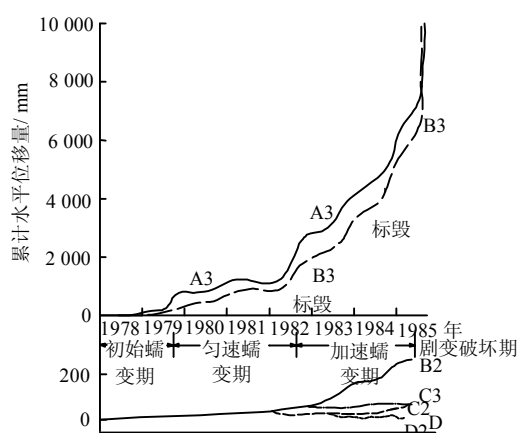


图 5 A3 和 B3 监测点累计位移曲线^[15]

Fig.5 Accumulated deformation curves of monitoring points A3 and B3^[15]

4.3 新滩滑坡地下水卸加载响应比特征及其稳定性分析与评价

根据新滩滑坡区地下水位数据 (见表 4), 以一

表 1 新滩滑坡 A3 和 B3 点月位移速率^[15]

Table 1 Month displacement rate of A3 and B3 point at Xintan Landslide^[15]

滑坡	年份 /a	月位移速率/(毫米/月)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A3	1978	0.0	3.2	7.1	6.1	6.4	8.7	13.1	6.9	4.8	1.8	1.8	7.5
	1979	1.6	7.2	1.0	1.6	5.0	10.5	5.7	19.7	336.3	161.3	39.8	1.6
	1980	14.3	11.1	7.8	4.2	9.7	9.7	80.8	49.5	59.5	20.7	9.4	18.7
	1981	22.9	6.9	6.2	10.6	6.5	5.0	3.4	10.2	8.6	11.7	6.8	1.9
	1982	8.2	7.5	6.8	33.2	66.7	82.2	54.5	344.2	430.6	525.6	433.5	35.3
	1983	45.3	15.0	31.8	16.4	20.0	20.8	43.9	348.1	101.3	171.2	298.7	156.2
	1984	69.1	51.3	27.6	15.5	49.0	127.9	196	320.1	136.1	413.8	325.8	214.6
	1985	142.1	146.1	153.3	123.0	296.1	2 005.9						
B3	1978	0.0	3.4	3.8	4.3	4.0	14.6	17.1	6.0	8.5	2.6	0.2	10.0
	1979	1.6	3.9	4.9	1.5	4.7	11.1	10.9	23.5	125.1	65.0	37.5	8.2
	1980	15.2	9.9	4.6	9.0	5.0	15.0	49.0	68.0	100.0	1.7	31.7	8.1
	1981	7.5	7.7	8.4	15.2	12.5	8.8	4.2	2.9	26.0	2.0	5.0	8.0
	1982	5.0	3.5	7.5	78.0	148.6	21.6	21.5	136.2	250.8	243.0	75.8	71.5
	1983	100.7	28.7	31.9	31.2	32.1	28.8	129.4	152.1	152.1	152.1	152.1	151.8
	1984	152.4	152.1	152.1	152.1	152.1	152.1	237.7	333	151.8	522.1	271.7	237.7
	1985	158.3	149.4	164.5	127.3	381.7	10 102.6						

表 2 新滩滑坡区的月降雨量数据^[15]
Table 2 Month rainfall values of Xintan landslide^[15]

年份 /a	月降雨量/mm											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1978	30.4	7.6	58.4	95.1	224.6	154.2	61.9	35.7	62.5	55.2	54.0	12.9
1979	6.0	2.3	21.7	116.1	168.3	138.8	146.9	87.9	359.3	12.4	7.6	50.9
1980	18.2	20.5	76.3	38.7	99.1	292.5	250.9	281.3	85.7	67.3	21.3	0.3
1981	14.8	31.5	61.7	99.3	54.5	67.1	90.9	221.9	55.7	100.4	47.0	4.6
1982	19.7	18.1	86.4	86.1	87.6	170.0	189.7	137.8	159.8	78.4	75.3	4.1
1983	21.3	14.8	42.2	79.3	97.3	195.4	313.7	126.3	183.2	276.4	40.8	12.3
1984	19.0	2.6	39.4	65.4	103.1	243.2	99.9	108.3	154.2	80.2	54.2	47.6
1985	5.2	38.5	16.6	79.1	162.6	126.6	156.1	121.7				

表 3 新滩滑坡区的地下水位深度数据
Table 3 Depth data of groundwater level of Xintan landslide zone

年份 /a	不同月份(月)地下水位深度/mm											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1978	7.914	7.551	8.360	8.945	11.008	9.886	8.416	7.999	8.426	8.309	8.290	7.635
1979	7.526	7.467	7.776	9.279	10.111	9.641	9.770	8.830	13.154	7.628	7.551	8.241
1980	7.720	7.757	8.645	8.046	9.009	12.089	11.427	11.911	8.795	8.502	7.769	7.435
1981	7.666	7.932	8.413	9.012	8.298	8.499	8.878	10.965	8.317	9.029	8.179	7.503
1982	7.744	7.718	8.806	8.802	8.825	10.138	10.452	9.625	9.976	8.679	8.629	7.495
1983	7.769	7.666	8.102	8.693	8.980	10.543	12.427	9.442	10.348	11.833	8.080	7.626
1984	7.733	7.471	8.058	8.472	9.072	11.304	9.021	9.155	9.886	8.708	8.293	8.188
1985	7.513	8.043	7.694	8.690	10.020	9.447						

表 4 新滩滑坡卸加载区间划分
Table 4 Division of unloading and loading stage of Xintan landslide

年份 /a	时间/月											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1978		-	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-
1979	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-
1980	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-
1981	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	-	-
1982	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	-
1983	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-
1984	+	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-
1985	-	+	-	+	+	-						

注：表中“-”代表卸载，“+”代表加载。

个卸加载周期的某月地下水位 H_i 和前月地下水位 H_{i-1} 的差值 ΔH 为依据，当 $\Delta H < 0$ 时为卸载， $\Delta H > 0$ 时为加载，就得到了一个地下水作用周期的卸加载月份与卸加载区间，由此可确定自 1978—1985 年的地下水卸加载区间（见表 4）。边坡位移响应则以位移加速度等于 0 为基准，大于 0 为加载响应值，小于 0 的为卸载响应值。

根据地下水动力卸加载区间，将 ΔH 分别按每个卸加载周期年的卸加载正负值统计并取其均值，可分别得到地下水位的卸加载序列 $\overline{\Delta H_-}$ 和 $\overline{\Delta H_+}$ ；将边坡位移加速度分别按卸加载响应正负值统计取其

均值，可分别得到位移加速度响应均值的区间序列 $\overline{a_-}$ 和 $\overline{a_+}$ ，由此可确定各卸加载区间内其边坡卸加载地下水位增量均值与位移加速度均值（见表 5）。将表 6 中 $\overline{\Delta H_-}$ 、 $\overline{\Delta H_+}$ 、 $\overline{a_-}$ 、 $\overline{a_+}$ 序列分别代入滑坡卸加载响应比预测模型式（5）中，可确定新滩滑坡监测点 A3、B3 的地下水卸加载响应比时间序列（见表 6）及卸加载响应比时序曲线如图 6 所示。

根据《地质灾害防治工程勘察规范》^[19]和《三峡库区三期地质灾害防治工程地质勘察技术要求》^[20]，设定新滩滑坡的安全系数 $K = 1.15$ ，可确定该滑坡的卸加载响应比参数临界失稳判据 $\gamma_{cr} = 0.13$ 。

表 5 新滩滑坡卸加载与卸加载响应
Table 5 Average rainfall and acceleration response
parameters of Xintan landslide in unloading
and loading stage

年份 /a	卸加载月地下 水位增量		卸加载位移响应值			
	卸载 ΔH_-	加载 ΔH_+	A3		B3	
			卸载 $\bar{a}_-$	加载 $\bar{a}_+$	卸载 $\bar{a}_-$	加载 $\bar{a}_+$
1978	-0.595	0.971	-3.075	3.320	-4.925	4.383
1979	-1.197	1.298	-58.600	57.617	-21.483	21.183
1980	-0.894	1.090	-15.250	21.720	-11.375	12.323
1981	-1.222	0.620	-4.413	4.625	-6.150	6.133
1982	-0.556	0.555	-43.283	46.067	-44.414	74.880
1983	-1.824	0.928	-36.250	46.325	-19.075	31.320
1984	-0.849	0.686	-74.843	116.460	-116.475	137.950
1985	-0.532	0.952	-72.500	2 124.560	-44.150	2 656.675

注: 位移响应值单位为毫米/月²。由于监测过程中局部标段导致其位移监测数据出现偏差, 经分析特对 A3 点 1982—1983 年和 B3 点 1980 年的位移加速度均值序列计算采用全年求平均来消除。

表 6 A3 和 B3 点的卸加载响应比
Table 6 Unloading-loading response ratio of
monitoring points A3 and B3

监测点	不同年份 (a) 卸加载响应比							
	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
A3	1.512	1.103	0.856	0.484	0.937	0.398	0.520	0.061
B3	1.834	1.100	1.221	0.508	0.592	0.310	0.683	0.022

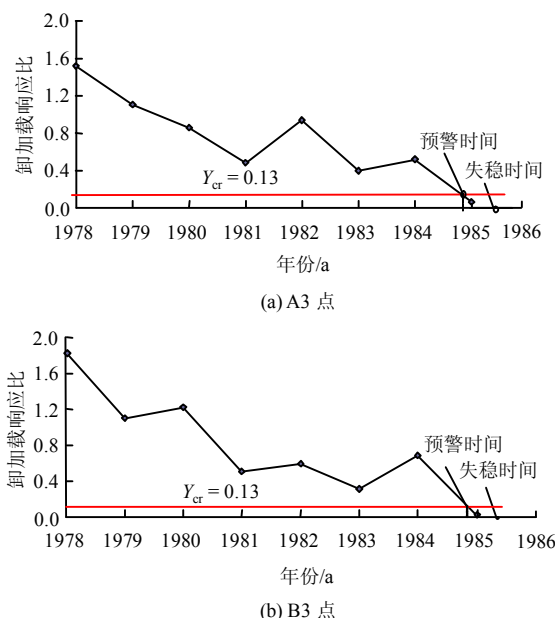


图 6 点 A3 和 B3 卸加载响应比曲线
Fig.6 Unloading-loading response ratio curves of
monitoring points of A3 and B3

由新滩滑坡的卸加载响应比时序曲线和稳定性判据可以看出, 其关键监测点 A3 和 B3 点卸加载响应比从 1978 年呈逐渐下降的趋势, 滑坡的稳定性逐渐降低。其中该滑坡的卸加载响应比值在 1978—1980

年滑坡形成初期均大于 1 且有所降低, 反映了边坡整体处于稳定性演化阶段且基本稳定, 但已经出现稳定性降低的趋势; 1980 年以后该滑坡卸加载响应比虽有所波动但整体呈现下降趋势且均小于 1, 表明边坡处于不稳定演化阶段, 稳定性逐渐降低; 1984—1985 年期间, 边坡的卸加载响应比突然降低, 卸加载响应比时序曲线发生突变, 并于 1984 年底其卸加载响应比均低于其临界值 $\gamma_{cr} \rightarrow 0$, 表明边坡此期间发生了整体的损伤破坏并最终将发生整体失稳。上述卸加载响应比计算分析结果与边坡实际位移和失稳规律基本吻合, 表明卸加载响应比参数是边坡动态稳定性评价与监测预警的一种有效和具有实用价值的位移动力预测参数。

5 结 论

(1) 堆积层滑坡的位移和失稳受地下水位的控制, 其位移规律与地下水位的变化存在密切的对应关系, 表明地下水位变化是导致滑坡位移和失稳的最直接动力因素。

(2) 将地下水位的变化作为滑坡的卸加载动力参数, 其相应位移速率或位移加速度作为卸加载动力位移响应参数, 建立了该类滑坡的地下水卸加载响应比参数和模型。该模型是滑坡的一种位移动力预测模型, 可较真实地反映该类滑坡为位移与失稳形成机制和动因。该动力预测参数的变化在该类边坡动态稳定性评价与监测预警中具有较高的准确性与实用性。

(3) 以边坡卸加载响应比与其稳定性的演化规律为依据, 确定了边坡卸加载响应比与其稳定性系数的定量关系, 并根据极限平衡法的边坡安全系数建立了边坡卸加载响应比稳定性判据。根据边坡卸加载响应比稳定性判据临界值 γ_{cr} , 可对水诱发堆积层滑坡的动态稳定性进行实时监测预警与评价。

(4) 监测点 A3 和 B3 的卸加载响应比均在开始阶段等于 1 或在 1 上下波动, 随着边坡稳定性的降低其呈现逐渐下降趋势, 并在边坡失稳前突变且接近于 0。表明地下水动力卸加载位移响应比预测模型在水诱发型堆积层滑坡的稳定性评价中具有一定的实用性和有效性, 其卸加载响应比参数与其极限平衡法的稳定性系数在某种程度上具有等效的理论和工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 薛果夫, 吕贵芳, 任江. 新滩滑坡研究[C]//新滩滑坡讨论论文集. 北京: 科学出版社, 1988: 39—41.

- [2] 李晓, 张年学, 廖秋林, 等. 库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3714—3720.
LI Xiao, ZHANG Nian-xue, LIAO Qiu-lin, et al. Analysis of hydrodynamic field influenced by combination of rainfall and reservoir level fluctuation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(21): 3714—3720.
- [3] 黄承中. 考虑地下水作用的滑坡时间预测研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 816—822.
HUANG Cheng-zhong. Prediction of landsliding time under action of groundwater[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2011, 19(6): 816—822.
- [4] 王家海, 任佳, 张顺斌, 等. 利用地下水水位对滑坡预警的分析及探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(6): 85—97.
WANG Jia-hai, REN Jia, ZHANG Shun-bin, et al. Analysis and discussion of utilizing groundwater level for landslide early-warning[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2008, 4(6): 85—97.
- [5] 陈国金, 陈松, 蹇佳洲. 水库型和降雨型滑坡地下水作用研究[C]//湖北省三峡库区地质灾害防治工程论文集. 武汉: 湖北省人民出版社, 2005.
- [6] 殷坤龙, 汪洋, 唐仲华. 降雨对滑坡的作用机制及动态模型模拟研究[J]. 地质科学情报, 2002, 21(1): 77—81.
YIN Kun-long, WANG Yang, TANG Zhong-hua. Mechanism and dynamic simulation of landslide by precipitation[J]. **Geological Science and Technology Information**, 2002, 21(1): 77—81.
- [7] BAKER R. Inter-relations between experimental and computational aspects of slope stability analysis[J]. **International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics**, 2003, 27(5): 23—36.
- [8] WANG Gong-hui, SASSA K. Pore-pressure generation and movement of rainfall induced landslides: effects of grain size and fine-particle content[J]. **Engineering Geology**, 2003, 69: 109—125.
- [9] CHAE Byung-gon, KIM Man. Suggestion of a method for landslide early warning using the change in the volumetric water content gradient due to rainfall infiltration[J]. **Environment Earth**, 2012, 66(7): 1973—1986.
- [10] 陆付民, 王尚庆, 李劲, 等. 顾及地下水位因子的卡尔曼滤波模型在滑坡变形预测中的应用[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2010, 35(10): 1184—1187.
LU Fu-min, WANG Shang-qing, LI Jin, et al. Application of Kalman filter model considering groundwater level factors to landslide deformation forecast[J]. **Geomatics and Information Science of Wuhan University**, 2010, 35(10): 1184—1187.
- [11] 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, 21(5): 512—518.
YIN Xiang-chu, YIN Can. Destabilized points of nonlinear system and the earthquake prediction[J]. **Science of China(Series B)**, 1991, 21(5): 512—518.
- [12] 许强, 黄润秋. 用加卸载响应比理论探讨斜坡失稳前兆[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(2): 25—30.
XU Qiang, HUANG Run-qiu. Studies on the precursor of slope instability applying to the load-unload response ratio theory[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 1995, 6(2): 25—30.
- [13] 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): 2665—2670.
HE Ke-qiang, ZHOU Dun-yun, WANG Si-jing. Features of load-unload response ratio and its significance in predication of colluvial landslide induced by rainfall[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(16): 2665—2670.
- [14] 贺可强, 李相然, 孙林娜, 等. 水诱发堆积层滑坡位移动力学参数及其在稳定性评价中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2983—2989.
HE Ke-qiang, LI Xiang-ran, SUN Lin-na, et al. A displacement dynamics parameter of debris landslide induced by water and its application to stability evaluation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(11): 2983—2989.
- [15] 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.
- [16] LAMAITRE J. Formulation and identification of damage kinetic constitutive equations[M]. New York: Springer Verlag, 1987.
- [17] 张道兵, 王军, 刘忠桓. 土质边坡的安全系数求解[J]. 湘潭师范学院学报(自然科学版), 2004, 26(2): 37—39.
ZHANG Dao-bing, WANG Jun, LIU Zhong-heng. Resolved safety-factor of soil slope[J]. **Journal of Xiangtan Normal University(Natural Science Edition)**, 2004, 26(2): 37—39.
- [18] AGOSTONI S, LAFFI R, MAZZOCOLA D, et al. Landslide inventory data base for alpine area[C]// Proceedings of the 8th IAEG Congress. Rotterdam: BALKEMA A A, 1998: 919—923.
- [19] 重庆市地质环境监测总站. DB 50/143—2003 地质灾害防治工程勘察规范[S]. 北京: 中国大地出版社, 2002.
- [20] 三峡库区地质灾害防治工作指挥部. 三峡库区三期地质灾害防治工程勘察技术要求[R]. 宜昌: 三峡库区地质灾害防治工作指挥部, 2004.