

网络出版时间:2017-03-31 16:08

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2017.05.031

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170331.1608.062.html>

突变综合评价理论在滑坡体安全分析中的应用

胡德秀^{1,2}, 米艳芳³, 杨 杰¹, 李 斌¹

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地(西安理工大学), 陕西 西安 710048; 3 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

[摘 要] **【目的】**克服目前滑坡安全评价中直接使用权重进行分析的主观性弊端, 寻求边坡预测预报的新途径。**【方法】**以突变理论为基础, 基于滑坡体的长期监测资料, 建立边坡安全稳定的综合评价体系, 通过构建评价指标体系、确定底层评价指标的评分、进行归一运算等逐级向上确定指标体系各突变隶属度的值, 实现对系统的总突变过程的综合评价。**【结果】**提出了边坡安全稳定的突变综合评价法, 并构建了边坡安全的综合评价体系。实例应用表明, 该工程滑坡体总突变值随时间呈现逐渐平稳的变化趋势, 但与其他年份相比, 1990 年和 1995 年的总突变值分别为 0.94 和 0.97, 出现明显突变异常, 其评价结果与该工程的定检报告结果一致。**【结论】**突变综合评价法合理可行, 能较客观、全面地反映滑坡体的实际运行情况, 在及早发现滑坡失稳隐患、保证滑坡体正常运行方面有实用价值。

[关键词] 滑坡体; 安全稳定; 综合评价; 突变理论

[中图分类号] TV698

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2017)05-0228-07

Application of catastrophe comprehensive assessment theory in landslide safety analysis

HU Dexiu^{1,2}, MI Yanfang³, YANG Jie¹, LI Bin¹

(1 Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3 Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming, Yunnan 650021, China)

Abstract: **【Objective】**In order to overcome the subjectivity of using weight directly in current safety assessment of landslide, new ways to predict the slope were sought. **【Method】**Based on catastrophe theory and long-term monitoring data, this paper established a comprehensive assessment system for safety and stability of slope. By building the assessment index system, confirming the underlayer index score, normalization calculation, and confirming the value of each mutation membership degree of the index system, the comprehensive assessment on the process of total catastrophe was realized. **【Result】**This paper proposed a catastrophe comprehensive assessment method and constructed a comprehensive assessment system for slope safety. Application examples showed that the total catastrophe data of landslide tended to be smooth gradually with time. Comparing with other years, the total catastrophe data of 1990 and 1995 were 0.94 and 0.97, indicating abnormal catastrophe. The assessment results agreed well with security report. **【Conclusion】**The catastrophe comprehensive assessment method is feasible, and can reflect the actual operation of

[收稿日期] 2016-03-04

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41301597); 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地(西安理工大学)开放基金项目(2016ZZKT-8); 陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-015); 陕西省教育厅基金项目(13JK0848)

[作者简介] 胡德秀(1973—), 女, 四川涪陵人, 副教授, 博士, 主要从事水利工程安全与环境风险分析研究。

E-mail: libin_1999@163.com

[通信作者] 杨 杰(1971—), 男, 四川大邑人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构、水库大坝安全及除险加固理论方法研究。

E-mail: lgdajs@163.com

the landslide objectively and comprehensively. It is of practical value to find the hidden danger of landslide timely and to ensure the operation of landslide normally and steadily.

Key words: landslide; safety and stability; comprehensive assessment; catastrophe theory

随着社会的发展和工程技术的逐步提高,诸如水利枢纽建设、边坡处理等一些工程的规模逐步扩大,对其安全性要求也越发突出,安全监测的重要性也越来越受到人们的重视,并已发展成为水利、岩土工程等建设领域不可缺少的重要组成部分。通过对监测资料进行及时的处理与分析,掌握和预测被监测体的安全状况,对及时发现可能存在的安全隐患,验证和提高设计、施工水平,指导运行调度抢险,维护工程区安全等都具有重要意义。

近些年来,随着水利工程不断朝着高大型方向发展,边、滑坡体的安全稳定问题研究也正不断深入,在工程施工修建过程中经常会形成百米级以上的临时或永久边坡^[1-2]。然而由于历史原因和缺乏经验,加上各方面环境因素的影响和长期以来非良性的运行管理机制,致使工程不安全因素大量存在,大小边、滑坡失稳事件数目相对较多,如意大利 Vajont 水库左岸大体积滑坡、三峡库区巫峡龚家方滑坡、甘肃东乡酒勒山滑坡、澜沧江漫弯水电站左岸滑坡等^[3-5],其直接影响工程效益的发挥,甚至威胁下游人民的生命和财产安全。因此,无论是从社会、经济角度出发,还是从安全角度考虑,加强对滑坡体的安全监测,并基于实时监测资料分析对滑坡体做出安全性态综合评价具有重要的研究价值和工程实用意义。

目前,对滑坡体安全性态评价的主要方法往往是基于专家赋权重法进行,此方法最重要的是权重的确定。罗东海等^[6]采用层次分析法,并结合熵值法建立了组合赋权法,以确定最优的权重系数;李军霞等^[7]引入未确知数学理论,并根据优序图法、熵信息法获得评价指标的权重值,建立了组合赋权-未确知测度理论耦合评价模型;解传银^[8]采用梯形模糊数加权法计算了二级指标的主观权重,以信息熵理论计算了一级指标的客观权重,最后应用权重线性组合法进行滑坡致灾因子的赋权。经过多年的发展,专家赋权重法已经广泛地应用于滑坡体安全性态评价之中,但其最大的不足是存在较强的主观性,过于依赖专家个人对事物的认识。鉴于诸如滑坡体等工程结构的失稳破坏是一个由量变到质变的发展过程,滑坡的发生具有突变特性,故本研究将突变理论引入滑坡体安全分析评价中,提出了“突变综合评

价法”,用以对滑坡体的安全稳定和变化趋势进行评价与预测。

1 突变分析理论

突变理论是 1972 年由法国数学家勒内托姆(Thom)创立的一门新兴的现代数学分支,它综合运用拓扑学、奇点理论和结构稳定性等数学处理工具,以系统结构稳定性为出发点,处理现实世界具有矛盾性的不连续现象^[9-10]。其本质是揭示事物的质变方式是如何依赖条件而发生变化,其特点是根据一个系统的势函数对其临界点进行分类,研究各类临界点附近非连续变化的特征,从而归纳出若干个初等突变模型。

对于突变模型的势函数 $V(x)$,它的所有临界点集合成一个平衡曲面,令 $V'(x)=0$ 可以得到该平衡曲面方程。该平衡曲面的奇点集可以通过令 $V''(x)=0$ 获得,由 $V'(x)=0$ 和 $V''(x)=0$ 可以得到由状态变量表示的反映各状态变量与各控制变量间分解形式的分歧方程,当控制变量的关系满足分歧方程时系统就将发生突变。Thom 通过数学推导得出自然界的各种突变共有 7 种基本的方式,分别为折线形、尖点形、燕尾形、蝴蝶形、双曲形、椭圆形和抛物形,这些模型的控制变量不多于 4 个,状态变量不多于 2 个^[11]。数学上已经证明,当控制变量多于 5 个时,突变模型会具有无穷多种类型。文献[12]提出了适用于 5 个控制变量的棚屋模型,用以处理有 5 个控制变量的情形。

利用归一公式对矛盾关系进行演算,设 x 为状态变量, a, b, c, d, e 为控制变量,常用初等突变模型(系统)的势函数和由此导出的突变模型的归一公式如下所示。

1) 尖点突变模型势函数为:

$$V(x) = x^4/4 + ax^2/2 + bx;$$

归一公式为:

$$x_a = a^{1/2}, x_b = b^{1/3}。$$

2) 燕尾突变模型势函数为:

$$V(x) = x^5/5 + ax^3/3 + bx^2/2 + cx;$$

归一公式为:

$$x_a = a^{1/2}, x_b = b^{1/3}, x_c = c^{1/4}。$$

3) 蝴蝶突变模型势函数为:

$$V(x)=x^6/6+ax^4/4+bx^3/3+cx^2/2+dx;$$

归一公式为:

$$x_a=a^{1/2},x_b=b^{1/3},x_c=c^{1/4},x_d=d^{1/5}.$$

4)棚屋突变模型势函数为:

$$V(x)=x^7+ax^5+bx^4+cx^3+dx^2+ex;$$

归一公式为:

$$x_a=a^{1/2},x_b=b^{1/3},x_c=c^{1/4},x_d=d^{1/5},x_e=e^{1/6}.$$

式中: x_a 、 x_b 、 x_c 、 x_d 和 x_e 分别表示对应 a 、 b 、 c 、 d 和 e 的 x 值。

在确定控制变量的个数后就可以采用相应的突变模型,根据不同模型的归一公式计算上层状态变量的突变函数值。

2 滑坡体安全分析的突变综合评价法

突变综合评价法是基于突变理论的一种综合评价方法,适合处理具有矛盾性的多准则决策问题,通过构建评价指标体系、确定底层评价指标的评分、进行归一运算等逐级向上确定指标体系各突变隶属度的值,实现对系统的总突变过程的综合评价。由于该评价模型对各指标的确定量化,是根据各指标在归一公式本身中的内在作用机理进行,不是由决策者的主观“权重”确定,相对减小了评价过程中的主观性,使计算更加简单方便,决策和评价更趋于实

际^[13]。

2.1 滑坡体突变综合评价指标体系的构建

滑坡是指斜坡上的部分岩土体在一定的自然条件和重力作用下,失去原有的稳定状态而沿着斜坡内部的软弱结构面整体向下滑动的一种地质现象,按其物质组成、发生年代、滑动方式、滑体厚度、滑坡规模、滑移速度、诱发滑因等有着不同的分类^[14]。滑坡不仅具有规模大、突发性强、破坏力大等特点,还会产生非常严重的次生灾害,因而被列为常见重大地质灾害之一^[15]。因此借助滑坡监测网获取即时信息,研究滑坡形成条件和发展规律,以便采取相应的防治措施,对防灾减灾、保障工程建筑和人类生命财产安全,都具有重要意义。

滑坡体根据其所属工程区的位置不同,监测布设重点也有所区别。尽管滑坡体失稳的形式有崩塌、滑动、倾倒、溃屈、拉裂、流动及以上形式的复合等多种类型,而且滑坡体失稳的内、外因也有所不同,但滑坡失稳前的变形过程及滑坡监测网的布设原理是相似的^[16]。本研究以此为出发点,根据系统分析理论,考虑各滑坡可能出现的工程安全问题和监测布设重点,构建了滑坡体安全稳定综合评价指标体系,如图 1 所示,其具体分析形式由各滑坡体的实际监测布置情况决定。

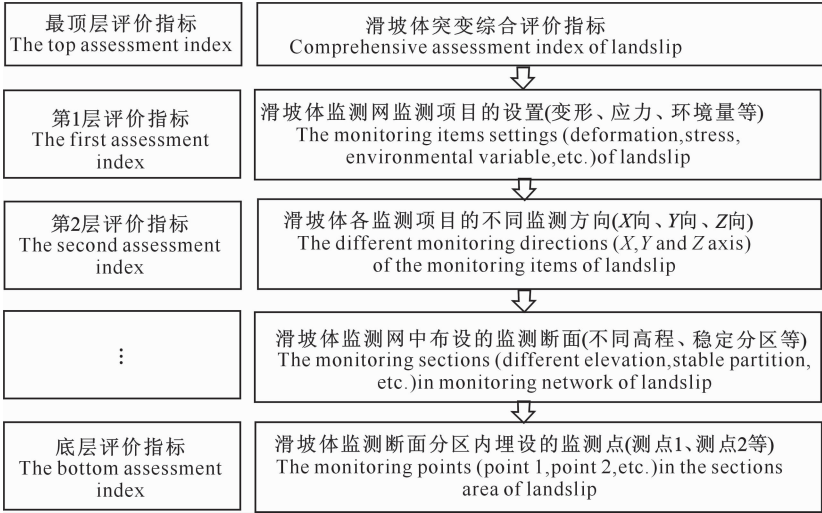


图 1 滑坡体安全稳定综合评价指标体系

Fig. 1 Landslip safety comprehensive assessment system

2.2 底层评价指标的标准化

标准化公式是利用突变理论进行综合评判分析的基本运算公式,它将系统内部指标不同的质态归化为可比较的同一种质态,从而对系统进行量化递归运算,求出表征系统状态特征的总突变函数值,作为综合评价的依据。

底层评价指标按定性、定量两种规格有不同的标准化处理方法,滑坡综合评价体系的底层评价指标为测点的监测数据,属定量指标,故只需根据评价指标所属的变化类型,按一定的控制标准统一转化为 0~1 区间的无量纲值进行分析,各类型评价指标的标准化公式如下^[17]。

越大越优型评价指标的标准化公式为:

$$r(i,j)=\frac{x(i,j)}{[x_{\max}(i)+x_{\min}(i)]}。 \tag{1}$$

式中: $r(i,j)$ 、 $x(i,j)$ 分别为第 j 个方案第 i 个评价指标的初始值和归一化值; $x_{\max}(i)$ 、 $x_{\min}(i)$ 分别为方案中第 i 个指标的最大值、最小值。

越小越优型评价指标的标准化公式为:

$$r(i,j)=\frac{[x_{\max}(i)+x_{\min}(i)-x(i,j)]}{[x_{\max}(i)+x_{\min}(i)]}。 \tag{2}$$

越中越优型评价指标的标准化公式为:

$$r(i,j)=\begin{cases} \text{当 } x_{\min}(i)\leq x(i,j)<x_{\text{mid}}(i), \\ \frac{x(i,j)}{[x_{\text{mid}}(i)+x_{\min}(i)]}; \\ \text{当 } x_{\text{mid}}(i)\leq x(i,j)<x_{\max}(i), \\ \frac{[x_{\max}(i)+x_{\text{mid}}(i)-x(i,j)]}{[x_{\max}(i)+x_{\text{mid}}(i)]}。 \end{cases} \tag{3}$$

式中: $x_{\text{mid}}(i)$ 为方案中第 i 个指标的中间值。

2.3 互补原则和非互补原则在滑坡体突变综合评价体系中的应用

利用突变理论进行安全综合分析时,在由底层评价指标逐级向上推求最终评价指标的过程中,需考虑大中取小的“非互补”原则和取平均的“互补”原则。当各控制变量的相对重要性相差较大且主要控制变量对最终评价起主导作用时,应对次要变量做处理,舍弃或淡化次要控制变量,突出起主导作用的控制变量。

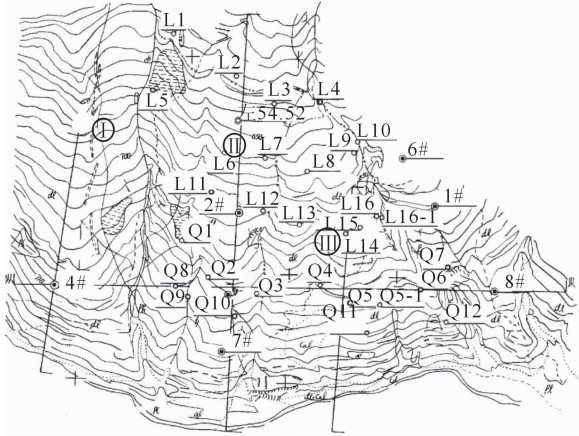
若一个系统的诸控制变量(如 $a、b、c、d$)之间不存在明显的相互关联关系,即不可互相替代或弥补其不足,则按归一公式求得系统状态变量 x 值时,要从诸控制变量相对应的突变级数值($x_a, x_b, x_c, x_d, \cdots$)中选取最小值 $x=\min(x_a, x_b, x_c, x_d, \cdots)$ 作为系统的 x 值,即大中取小的“非互补”原则。若一个系统的诸控制变量之间存在相互关联作用,则应取控制变量对应的突变级数的平均值 $x=\text{average}(x_a, x_b, x_c, x_d, \cdots)$ 作为系统的 x 值,即取平均的“互补”原则^[18-19]。由此将整个综合评判体系中各控制变量的底层指标和突变级数值均转化为 $[0,1]$ 区间内的标准型,再结合长期的监测数据进行分析,得出不同时期的总突变级数值,进而判断滑坡安全状态的变化情况。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

本研究选用位于甘肃文县让水河与白龙江交会左岸处的青崖岭滑坡体^[20]为研究对象,其下游 4

km 处为碧口水电站枢纽,心墙土石坝高 105.3 m,滑坡体一旦失事,将直接威胁碧口水电站水库大坝及其下游碧口镇的安全。青崖岭滑坡体表面为大面积第四系坡积物覆盖,面积约 2 km²,呈一“喇叭形”地貌。在斜坡上发育有两条较大的冲沟,冲沟中局部可见到基岩倾倒体,并有泉水出露,冲沟两侧有塌滑现象。冲沟前沿的三级阶地形成以后,滑坡体无整体滑动,故认为属古滑坡体。在 1986 年设置了滑坡体监测网,并根据滑坡体的地质地貌特征、冲沟切割情况,及各部位的稳定程度,将滑坡体划分为 3 个区,如图 2 所示,其中Ⅰ区为稳定区,Ⅱ区为不稳定区,Ⅲ区为相对稳定区。于 1987 年 7 月开始对其沉降和水平位移进行监测,其方向规定: X 向水平位移与等高线基本垂直,以向北为正,负向与滑坡体的滑动方向一致; Y 向水平位移以向东为正,大致为顺河流方向; Z 向垂直位移以下沉为正。本研究选取 1987-07—2006-07 期间的各测点位移监测资料,对青崖岭滑坡体进行安全稳定分析评价与预测。



L1、L4、Q1 和 Q4 分别表示滑坡体 1、滑坡体 4、青崖岭 1 和青崖岭 4 等不同部位滑坡体,其余类推。图 3 和表 1 同
The L1,L4,Q1,Q4,etcin respectively represent the different landslip bodies of landslide body 1,landslip body 4,Qingyaling 1,Qingyaling 4,etc,the rest of the analogy. The same the Fig. 3 and table 1

图 2 青崖岭滑坡体分区及测点布置图
Fig. 2 Qingyaling landslide partition and measuring-point layout

3.2 突变综合评价法在青崖岭滑坡分析中的应用

基于前面提出的分析思路,构建了青崖岭滑坡体安全综合评价体系,如图 3 所示,并根据突变综合评价法的分析计算步骤,以测点监测数据的年变化速率为底层评价指标,对青崖岭滑坡体在 1987-07—2006-07 期间的稳定情况进行了整体分析预测。

首先,确定底层各测点变位监测数据的年变化

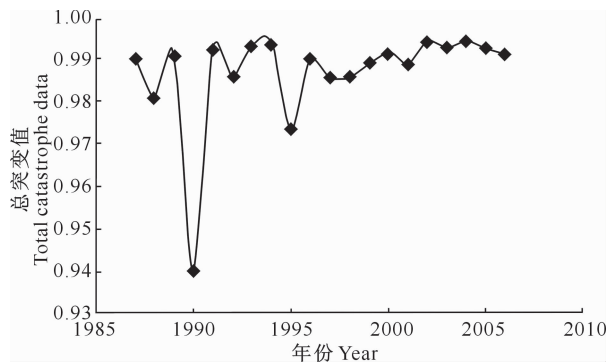


图4 系统总突变级数变化曲线

Fig. 4 Variation of total catastrophe series

由图4可知,青崖岭滑坡体总突变值随时间呈现逐渐平稳的变化趋势,但1990年和1995年的总突变值为0.94和0.97,出现明显突变异常,经核查这与碧口三轮定检报告中的分析结果是一致的,是受当年降雨等环境因素变化和系统误差等原因所致,并已根据监测结果对环境量的突变进行了分离识别,以明确监测重点;对系统误差进行了修正,以保障后续监测数据的有效性。

综上所述,“突变综合评价法”通过突变综合分析能客观地发现滑坡体运行过程中出现的突变奇异值,真实反映滑坡体的整体运行发展情况,这对及早发现滑坡失稳隐患,保证滑坡体正常稳定运行十分重要。

4 结论

1)基于突变理论具有的突变特性,同时在评价体系中不直接使用难以确定且主观性较大的“权重”的特点,本研究将其融入滑坡体的综合评判中,建立了反映评价指标间作用机理的滑坡体突变综合评价体系,得以更加合理、定量地考虑各评价指标的重要性,对其安全运行趋势进行预测。

2)利用监测网长期连续地监测数据,取变形监测的年变化速率作为底层定量评价指标进行递推运算,以全面、直观地反映滑坡体的安全运行,得出客观、准确的最终评价指标。

3)本研究提出的“突变综合评价法”,将突变理论与监测数据结合,融入到滑坡体的综合评价中,经工程实例运用表明,该分析方法能较客观真实地反映滑坡体的实际运行状况,对其安全、稳定的预测有较强的工程实用价值。

参考文献

[1] 黄 铭. 数学模型与工程安全监测 [M]. 上海: 上海交通大学

出版社, 2008: 1-4.

Huang M. Mathematical model and project safety monitoring [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2008: 1-4.

[2] 邓华锋, 朱 敏, 孙旭曙, 等. 坝肩开挖高边坡锚固方案优化分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 409-414.

Deng H F, Zhu M, Sun X S, et al. Optimization analysis on anchoring scheme of high excavated slope at abutment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 409-414.

[3] 汪恕诚. 论大坝与生态 [J]. 水力发电, 2004, 30(4): 1-4.

Wang S C. On dams and ecology [J]. Water Power, 2004, 30(4): 1-4.

[4] 王德厚. 水利水电工程安全监测理论与实践 [M]. 武汉: 长江出版社, 2007: 42.

Wang D H. Theory and practice of water conservancy and hydropower engineering safety monitoring [M]. Wuhan: Changjiang Publishing House, 2007: 42.

[5] 黄波林. 水库滑坡涌浪灾害水波动力学分析方法研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.

Huang B L. Water wave dynamic analysis method study on landslide-generated impulse wave hazard in reservoirs [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.

[6] 罗东海, 尚 慧, 王念泰. 最优组合赋权法在滑坡综合治理方案决策中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 116-118.

Luo D H, Shang H, Wang N T. Application of algorithm of optimal combination determining weights on decision making in comprehensive treatment of landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(4): 116-118.

[7] 李军霞, 王常明, 王钢城. 基于组合赋权-未确知测度理论的滑坡危险性评价 [J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 468-474.

Li J X, Wang C M, Wang G C. Landslide risk assessment based on combination weighting-uncertain measure theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 468-474.

[8] 解传银. 基于权重模型的滑坡灾害敏感性评价 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(6): 1772-1779.

Xie C Y. Landslides hazard susceptibility evaluation based on weighting model [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(6): 1772-1779.

[9] 都兴富. 突变理论在经济领域的应用(下册) [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1994.

Du X F. The application of catastrophe theory in economic field (Vol. II) [M]. Chengdu: University of Electric Science and Technology of China, 1994.

[10] Cheng C H, Lin Y, Hung P Y. Evaluating guide missile destroyer by catastrophe series based on fuzzy scales [J]. Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1996(3): 2188-2193.

[11] Thom R. 突变论: 思想和应用 [M]. 周仲良, 译. 上海: 上海译文出版社, 1989.

Thom R. Catastrophe theory: thought and application [M]. Zhou Z L, translate. Shanghai: Shanghai Translation Publishing House, 1989.

[12] 李士勇. 模糊控制 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.
Li S Y. Fuzzy control [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002.

[13] 赵志峰, 徐卫亚. 基于突变理论的边坡安全稳定性综合评价 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊): 2707-2712.
Zhao Z F, Xu W Y. Comprehensive assessment of slope safety and stability based on catastrophe theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Suppl.): 2707-2712.

[14] 刘红军, 赵兰霞. 土木工程地质 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 141-149.
Liu H J, Zhao L X. Civil engineering geological [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009: 141-149.

[15] 赵兰浩, 侯世超, 毛 佳. 库区滑坡涌浪数值模拟方法研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 81-85.
Zhao L H, Hou S C, Mao J. Review of numerical simulation of landslides and surges in reservoir districts [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 81-85.

[16] 罗爱忠, 邵生俊. 基于单元安全的黄土边坡动力稳定性分析 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(8): 229-234.
Luo A Z, Shao S J. Dynamic stability analysis of loess slope based on the zone safety degree [J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed), 2011, 39(8): 229-234.

[17] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2002.
Chen S Y. Fuzzy identification theory and application of complex water resources system optimization [M]. Changchun: Jilin University Press, 2002.

[18] 李继清, 张玉山, 纪昌明, 等. 突变理论在长江流域洪灾综合风险社会评价中的应用 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(4): 26-30.
Li J Q, Zhang Y S, Ji C M, et al. Application of catastrophe theory to social assessment of integrated flood disaster risks in Yangtze River [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(4): 26-30.

[19] 吴中如, 朱伯芳. 三峡水工建筑物安全监控与反馈设计 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
Wu Z R, Zhu B F. Safety monitoring and feedback design of hydraulic structure in Three George Project [M]. Beijing: China Water Power Press, 1999.

[20] 杨 杰, 陈平志, 伍美华, 等. 碧口水电厂大坝安全监测资料分析报告 [R]. 西安: 西安理工大学, 2007.
Yang J, Chen P Z, Wu M H, et al. Bikou dam safety monitoring data analysis report [R]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.

(上接第 227 页)

[18] Lu B L, Torquato S. Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle system [J]. Physical Review A, 1992, 45(8): 5530-5544.

[19] Bazant Z P, Tabbara M R, Kazemi M T, et al. Random particle models for fracture of aggregate or fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116(8): 1686-1705.

[20] Yang C C, Su J K. Approximate migration coefficient of interfacial transition zone and the effect of aggregate content on the migration coefficient of mortar [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(10): 1559-1565.

[21] ASTM C1202—2005 Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration [S]. USA: American Society of Testing Materials, 2005.