

文章编号: 1000-7598 (2011) 04-1069-08

基于实例推理系统的滑坡预警判据研究

李 聪¹, 姜清辉^{1,2}, 周创兵^{1,2}, 周 钟³, 宋胜武³, 龚满福³

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;
3. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 成都 610072)

摘 要: 为研究滑坡预警预报指标, 建立了 31 个典型岩质滑坡组成的滑坡数据库, 基于滑坡数据库、工程类比和模糊综合评判方法开发了滑坡实例推理系统。首先将滑坡特征属性分为 6 大项: 破坏模式、滑面倾角、滑面类型、边坡岩体结构、边坡倾角、滑坡的诱发因素 (降雨、地下水、水库蓄水、开挖、爆破、地震), 用 11 个特征值表示边坡的特征属性; 其次采用比值法相似度计算理论在滑坡数据库中搜索与目标边坡最相似的滑坡, 通过工程类比给出滑坡预警判据建议值; 最后依据模糊综合评判模型修正建议值, 得到预警判据确认值, 形成滑坡实例推理系统。以锦屏一级水电站为例, 通过计算找到了滑坡数据库中与锦屏一级水电站左岸边坡最为相似的 5 个滑坡实例; 其中大冶铁矿狮子山滑坡和安家岭露天矿滑坡有较为完整的变形监测数据, 深入分析类似边坡变形破坏过程, 分 4 个阶段给出了锦屏一级水电站左岸边坡预警判据建议值; 并建立边坡预警判据修正的模糊综合评判模型, 修正相似边坡预警判据, 给出锦屏一级水电站左岸边坡进入加速变形阶段的位移速率阈值的精确区间为 1.0~1.2 mm/d。

关 键 词: 滑坡; 预警判据; 实例推理; 锦屏一级水电站

中图分类号: P 642.2

文献标识码: A

Research on early warning criterion of landslides using case-based reasoning

LI Cong^{1,2}, JIANG Qing-hui^{1,2}, ZHOU Chuang-bing^{1,2}, ZHOU Zhong³, SONG Sheng-wu³, GONG Man-fu³

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Corporation, Chengdu 610072, China)

Abstract: In order to study the early warning index of landslide, a landslide database composed of 31 typical rock landslides is established; and based on the database a landslide case-based reasoning system is developed using engineering analogy and fuzzy comprehensive assessment model. The feature attribute of landslide is divided into 6 items, including failure mode, dip angle of slip plane, slip-zone type, rock mass structure, slope angle, inducing factors in landslide (rainfall, groundwater, reservoir impoundment, excavation, blasting and seismic peak acceleration), whereupon the characteristics of properties of slope is represented by 11 eigenvalues. The most similar slopes are searched from the database using theory of similarity based on ratio method; and the suggested warning criterion is given based on engineering analogy; and then revised criterion is get based on fuzzy comprehensive assessment model. Taking Jinping I hydropower station for example, five landslides that are most similar with the slope at left bank of Jinping I hydropower station are got. Anjialing open-pit mine landslide and landslide in eastern open pit in Daye among the result have intact deformation monitoring data, so in terms of four periods the early warning criterion of the slope at left bank of Jinping I hydropower station is given, based on deep analysis of deformation and failure process of the similar slopes. A fuzzy comprehensive assessment model is established to revise the criterion mentioned above; and exact interval of (1, 1.2) mm/d is given which determines the displacement rate threshold when the slope at left bank of Jinping I hydropower station develops into the accelerated deformation stage.

Key words: landslide; early warning criterion; case-based reasoning; Jinping I hydropower station

1 引 言

滑坡预警预报是地质工程界研究的热点, 也是

滑坡研究中难度最大的课题。由于边坡变形破坏具有复杂性、随机性和不确定性, 想要准确地预报滑坡是非常困难的。为了对边坡的变形演化行为做出

收稿日期: 2010-07-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 50839004); “十一五”国家科技支撑计划专题 (No. 2008BAB29B01-2); 教育部新世纪优秀人才计划项目 (No. NCET-07-0632); 交通部联合攻关科技项目 (No. 2009353342530)。

第一作者简介: 李聪, 男, 1985 年生, 博士, 主要从事边坡稳定分析、非饱和岩土体渗流分析等方面的研究。E-mail: 23151112@qq.com

较为准确的判断, 必须建立一些具有一定适用性的滑坡预报判据。

贺可强^[1]通过对大型堆积层滑坡剪出口实际受力条件的分析, 分别建立了剪出口平面滑移和曲面滑移两种条件下的力学判据。王尚庆^[2]依托长江三峡的新滩滑坡、鸡扒子滑坡、黄腊石滑坡等具体实例, 初步总结出了一套滑坡综合预报方法和预报判据。Roberto^[3]采用 Newmark 稳定计算模型预测地震引起的滑坡位移, 验证了滑体动态剪切强度随地震力的衰减规律, 计算结果给出了预测滑坡发生的位移判据。李秀珍等^[4]详述了 3 类常用的预报判据(安全系数和可靠概率判据、变形速率判据、宏观信息预报判据), 将理论模型预报、根据预报判据预报以及斜坡的宏观变形破坏迹象和前兆信息等有机地结合起来。金海元^[5]在总结国内外有关滑(边)坡预测预报成果的基础上, 设计出适合锦屏一级水电站边坡的综合预测预报模型, 初步给定边坡 4 项预警临界值(位移速率、位移切线角、地震峰值加速度、降雨量)。许强等^[6-7]依托于大量滑坡变形监测数据, 提出基于加速度的滑坡临滑预警方法和临滑预警指标, 并且通过对斜坡累计位移-时间曲线进行坐标变换, 获得改进切线角预警判据。Herrera 等^[8]采用多种监测技术观测了 Portalet 边坡位移与降雨的关系, 通过一维无限黏滞模型对边坡长期位移进行预测, 并与 DGPS(差分全球定位系统)监测数据对比。

综上所述, 目前滑坡预报判据有很多类, 其中以位移速率研究比较突出, 因为位移是边坡稳定状态最直观的反映, 并且变形量测方法简单, 所以它在工程实践中越来越引起人们的重视。然而以往的判据大多通过经验给出, 未见系统的理论方法研究滑坡预警判据。黄润秋^[9]指出, 国内外许多学者都倡导滑坡预报应该以研究斜坡地质模型和斜坡所处的地质条件为基础, 将斜坡变形破坏的宏观信息与滑坡监测资料相结合, 将定性判断与定量分析有机地结合起来进行滑坡的综合预报。本文建立岩质边坡滑坡数据库, 提出了工程类比、实例推理和模糊综合评判相结合的滑坡预警判据研究方法, 并给出了锦屏一级水电站左岸工程边坡预警预报判据。

2 滑坡数据库建立

利用计算机技术建立数据库系统是显示、储存、管理和利用资料信息效果最好、最经济合理的途径。在滑坡数据库设计过程中, 按照数据库设计要求,

充分考虑数据完整性、一致性以及集中管理等原则; 系统设计主要是便于相关信息的输入、输出以及查询检索。

搜集整理了国内外典型滑坡失稳过程及监测分析资料, 归纳了 31 个大型岩质滑坡的特征、地质条件、失稳过程、深部及外观监测资料。这些大型滑坡包括: 漫湾滑坡、云阳县滑坡、天台乡滑坡、金川露天矿滑坡、红土坡滑坡、鸡扒子滑坡、南峪滑坡、抚顺西露天矿滑坡、大冶铁矿滑坡、安家岭露天矿滑坡、胜利露天矿滑坡、小龙潭露天矿滑坡、平庄西露天矿滑坡、三峡升船机及临时船闸边坡、国外某边坡、日本影森石灰石露天矿、Campo Vallemaggia 滑坡、Aknes 滑坡、李家峡滑坡、链子崖危岩体、白银露天矿滑坡、刘家峡苏州崖坍塌、盐池河磷矿山崩、白灰厂滑坡、嘿社滑坡、天宝滑坡、沙岭滑坡、哈密三道岭露天矿滑坡、前河露天矿滑坡、象鼻子山北帮滑坡、红旗岭露天矿滑坡。

将滑坡信息录入 access 数据库, 并建立 3 个窗体库, 分别为滑坡基本信息库、工程地质信息库和详细信息库, 如图 1 所示。其中滑坡基本信息库包括: 滑坡编号、滑坡名称、滑坡位置、滑坡类型、滑坡相对高程、滑坡面积、滑坡平均厚度、滑坡体积、地形条件、滑坡原因、滑坡时间共 11 项; 工程地质信息库包括: 滑坡编号、滑坡名称、地形地貌、地质结构及岩性、地质构造、气象水文条件、坡体结构和滑面特征共 7 项; 详细信息库包括: 滑坡编号、滑坡名称、监测信息、滑坡变形过程、处理方案、预报参数临界值、来源、备注共 8 项。

图1 滑坡基本信息库窗体图

Fig.1 Diagram for main information database of landslide

统计分析滑坡数据库中的预警判据信息表明, 滑坡进入加速变形阶段的变形速率为 $0\sim 10\text{ mm/d}$ 不等, 或者更大。大多数滑坡进入加速变形阶段的变形速率小于 4 mm/d ; 其中位移速率为 $0.5\sim 2\text{ mm/d}$ 的滑坡数量最多, 代表性的滑坡有安家岭露天矿滑坡、大冶铁矿滑坡, 并且这些滑坡有着一个共同点, 即均为滑动破坏。另外, 其他不同破坏模式滑坡进入加速变形阶段的位移速率阈值也分布在不同区间; 倾倒破坏或崩塌破坏的滑坡阈值较大, 一般大于 4 mm/d , 如金川露天矿滑坡和盐池河磷矿山崩。

3 滑坡实例推理系统

3.1 实例推理技术简介

实例推理^[10] (Case-based reasoning, CBR) 是一种机器学习方法, 它与人的思维方式类似, 通过判断新问题与已解决问题的相似性, 找到与之相似的问题的解, 即建议解, 并对建议解进行适当地修正、校订得到确认解来解决新问题, 即用先前求解问题的经验和方法, 通过类比和联想来获得当前相似问题的求解策略。实例推理的求解方法既符合人类解决问题的一般认知过程, 又克服了一般智能系统知识获取“瓶颈”, 其基本推理过程为: ①依据问题描述从实例库中选择一组相似实例; ②选择与当前要求最相似的实例, 并检索其解决方案, 作为建议解提供给用户; ③修改建议解为确认解, 以适应新问题, 产生新方案; ④新方案作为准范例存入实例库, 以备后用。

CBR 原理如图 2 所示。

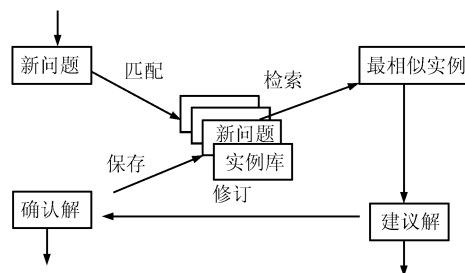


图 2 CBR 原理框图^[10]

Fig.2 Schematic diagram of CBR^[10]

3.2 边坡（滑坡）相似度计算方法

实例相似度是判别实例间相似性的尺度, 用于判定实例库中与新问题最相似的实例, 科学合理的相似度计算方法是 CBR 系统成功的关键。

3.2.1 影响边坡稳定的主要因素及其特征值

根据边坡变形机制、工程地质、水文地质特征, 把对边坡稳定起重要作用的特征因素分为 11 项: 破坏模式、滑面倾角、滑面类型、边坡的岩体结构、边坡倾角、降雨条件、地下水、水库蓄水、开挖、爆破、地震动峰值加速度。如表 1 所示, 依据每项特征因素的特点, 分别罗列出该特征因素的可能情况并进行分类, 并对该特征因素的不同情况按照(诱发)滑坡发生的可能性从大到小依次排列, 顺序打分, 其分值称之为特征值。采用 11 个特征值表示边坡的 11 个特征属性。以降雨因素为例, 依据不同降雨条件将降雨情况分为 3 类, 并按照诱发滑坡可能性从大到小依次排列, 分别为罕见暴雨、雨量充沛、雨水稀少, 顺序打分为 1、2、3, 若某边坡位于雨水稀少区域, 则该边坡降雨因素的特征值为 3。

表 1 特征值分值表

Table 1 Score of characteristic values

分值	边坡 岩体结构	边坡倾角 /(°)	破坏模式	滑面倾角 /(°)	滑面类型	降雨	地下水	水库 蓄水	开挖	爆破	地震(峰值 加速度)
1	散体结构	90~80	平面滑动, 结构面完备	90~80	黏泥型 ^①	罕见暴雨	地下水发育	有	有	有	>0.4g
2	层状 顺倾结构	80~70	平面滑动, 结构面不完备	80~70	含泥屑型 ^①	雨量充沛	地下水不发育, 透水性强	无	无	无	0.3g
3	层状 反倾结构	70~60	楔形滑动, 2 个结构面完备	70~60	碎屑型 ^①	雨水稀少	地下水不发育, 透水性差				0.2g
4	块状结构	60~50	楔形滑动, 1 个结构面完备	60~50	碎石碎屑 ^②						0.15g
5	碎裂结构	50~40	楔形滑动, 2 个结 构面都不完备	50~40	硬光平直 ^②						0.1g
6		40~30	倾倒破坏	40~30	硬岩粗糙 ^②						0.05g
7		30~20	崩塌破坏	30~20	软岩结构 ^②						<0.05g
8		20~10	拉裂破坏	20~10							
9		10~0	溃屈破坏	10~0							

注：表中①属于软弱夹层，②属于硬性结构面。

因此，根据表 1 中的每项特征因素的详细分类及其分值，数据库中每一个滑坡实例都对应一个特征值矩阵 $F_j = [f_{j1}, f_{j2}, f_{j3}, f_{j4}, f_{j5}, f_{j6}, f_{j7}, f_{j8}, f_{j9}, f_{j10}, f_{j11}]$, $1 \leq j \leq k$, k 为数据库 R 中滑坡实例的个数, f_{ji} 代表 j 实例的第 i 个特征因素的打分值。值得注意的是，特征值打分表是一个开放的、动态的信息表，滑坡数据库搜集的工程实例越多，对每一项特征因素分类就越完善，其分值就越趋于合理。由于每项特征因素对边坡稳定的作用和重要性不同，需要确定该因素的权重。通常的做法是采用两两比较法计算各特征因素的权重，按其重要程度分别给出 0~4 分，甲、乙两个因子相比，如果同等重要就各得 2 分；如果甲比乙重要，甲得 3 分，乙得 1 分；如果甲比乙重要得多，甲得 4 分，乙得 0 分。表 2 为破坏模式、滑面倾角、滑面类型、边坡岩体结构、边坡倾角和滑坡诱发因素 6 大因素的两两比较法分值。表中横行因子为比较因子，纵列因子为被比因子，比

较因子的得分放于横行因子相对应的位置上。通过表 2 计算各项因素的权重，并列于表 3，其中，滑坡诱发因素的权重为 15%，按重要性程度分配给降雨、地下水、水库蓄水、开挖、爆破、震动峰值加速度这 6 个因子，分别为 3%、3%、3%、2%、2%、2%。

表 2 两两比较法分值
Table 2 Scores of weight values by neighboring comparative method

	破坏模式	滑面倾角	滑面类型	边坡岩体结构	边坡倾角	滑坡诱发因素
破坏模式		3	3	4	4	4
滑面倾角	1		2	3	3	3
滑面类型	1	2		3	3	3
边坡岩体结构	0	1	1		3	1
边坡倾角	0	1	1	1		0
滑坡诱发因素	0	2	0	3	4	

表 3 特征值权重 (单位: %)

Table 2 Weights of characteristic values (unit: %)

边坡岩体结构	边坡倾角	破坏模式	滑面倾角	滑面类型	滑坡的诱发因素					
					降雨	地下水	水库蓄水	开挖	爆破	地震(峰值加速度)
10	5	30	20	20	3	3	3	2	2	2

3.2.2 滑坡实例相似度计算

输入新边坡的工程地质、水文地质条件、滑裂面的产状、滑带土的物理力学属性等，根据特征值打分表 1 确定新边坡的特征值矩阵 $F = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9, f_{10}, f_{11}]$ ，采用比值法计算该边坡与数据库 R 中每个边坡实例的相似度，计算过程如下：

(1) 获取数据库 R 中每一实例的特征值矩阵 $F_j = [f_{j1}, f_{j2}, f_{j3}, f_{j4}, f_{j5}, f_{j6}, f_{j7}, f_{j8}, f_{j9}, f_{j10}, f_{j11}]$ 。

(2) 将 F 与 F_j 相比较和匹配，确定每个特征因素的匹配值 S_i ($i = 1, 2, \dots, 11$)，即 $S_i = \min(f_i, f_{ji}) / \max(f_i, f_{ji})$, $0 \leq S_i \leq 1$ 。

(3) 求解实例的相似度 $SIM(F, F_j) = \sum u_i S_i$ 。其中 SIM 表示实例相似度； u_i 为边坡实例第 i 个特征因素的权重值； S_i 为第 i 个特征因素的匹配值。

3.3 搜索相似滑坡实例

依据当前新滑坡的描述确定其特征值矩阵，计算新滑坡与数据库中所有实例的相似度。搜索出最相似滑坡编号，在数据库中查询用户所需信息，包

括相似边坡的监测数据和特征值矩阵。分析监测数据，总结相似滑坡的预警判据作为建议解的参考值；整理相似边坡的特征值矩阵作为判据修正的依据。

3.4 边坡预警指标修正的模糊综合评判模型

基于比值法相似度计算得到了边坡预警判据的建议值，而类似边坡的预警判据或预警指标不能完全适用于新边坡，因此，需要通过地质信息对比、水文气象条件对比、变形过程对比、监测资料对比、专家分析对边坡预警判据的建议值进行修正。

滑坡实例推理系统中将滑坡特征属性分为若干项，而各项特征对边坡预警判据的影响也不尽相同，因此，很难用经典数学模型对其加以统一度量。在这些影响因素中，有些是明确的，如边坡倾角，然而更多的是不明确的；并且对预警指标的修正很难给出一个精确的解，而是采用一些模糊的区间作为不同程度的评判。为了考虑滑坡各项特征影响因素，采用模糊数学理论和方法，对影响边坡预警判据修正程度的指标进行分类，建立边坡预警指标修正的模糊综合评判模型。

模糊综合评价是对受多种因素影响的事物做出全面评价的一种十分有效的多因素决策方法。模糊综合评判的基本思想是利用模糊线性变换原理和最大隶属度原则,考虑与被评价事物相关的各个因素,对其作出合理的综合评价。在总结影响边坡预警判据的 m 个因素的基础上,采用专家意见法(专家问卷调查)给出每个影响因素的权重,同时给出每个因素对各个评价等级相应的隶属度,形成因子权重矩阵和模糊关系单因素评判矩阵;利用模糊线性变换原理综合考虑相关因素的耦合作用,求出模糊综合评价集;依据最大隶属度原则进行综合评判,模糊综合评判原理如图 3 所示。

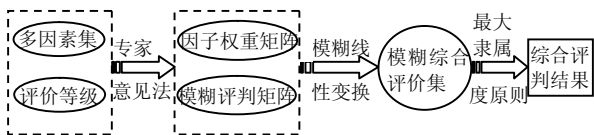


图 3 模糊综合评判原理简图
Fig.3 Schematic diagram of fuzzy comprehensive assessment

模糊综合评判的具体步骤如下：①建立因素集和评价集；②建立单因素模糊评判矩阵；③确定因子集的权矩阵；④模糊综合评判。

详细的模糊综合评判方法参见文献[11]。

4 锦屏一级水电站左岸边坡预警研究

4.1 工程概况

锦屏一级水电站位于四川省盐源县、木里县交界的雅砻江干流,是雅砻江水能资源最富集的中、下游河段 5 级水电开发中的第 1 级。该水电站设计

坝高为 305 m,正常蓄水位为 1 880 m,装机容量为 3 600 MW。
1073

左岸拱肩部位谷坡高陡,绝大部分基岩裸露,自然边坡在 1 850 m 高程以上为砂板岩边坡,坡度 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$; 1 885 m 高程以下为大理岩边坡,坡度 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。边坡中发育规模较大的软弱结构面主要有 F_5 、 f_{42-9} 以及煌斑岩脉 X。岩体内强卸荷带水平深度一般为 70~100 m。深部裂缝多发育在左岸坚硬的变质砂岩和大理岩中,其优势方向有 2 组:① $N40^{\circ}\sim 70^{\circ}E$, $SE\angle 50^{\circ}\sim 75^{\circ}$;② $N0^{\circ}\sim 30^{\circ}E$, $SE\angle 50^{\circ}\sim 65^{\circ}$,与整个坝区左岸的断裂、节理裂隙优势方向基本一致。2 000 m 高程以上部位普遍出现倾倒拉裂变形特征,开挖区内不良地质结构面和坡体内分布的大量卸荷裂缝纵横交切,组合成潜在危险滑移变形体。另外,边坡岩体质量差,岩体破碎等问题严重影响左岸高陡岸坡的稳定性。

4.2 锦屏一级左岸边坡最相似滑坡计算

锦屏一级水电站左岸坝肩开挖边坡的整体稳定性由 f_{42-9} 断层、煌斑岩脉、 SL_{44-1} 拉裂带组成的左岸坝头变形拉裂岩体控制,可能变形失稳滑移破坏模式是以 SL_{44-1} 松弛拉裂带为上游边界,以 f_{42-9} 断层为下游边界及底滑面,以煌斑岩脉为后缘切割面的楔形体滑移破坏模式。

输入锦屏边坡工程条件,依据表 1 可得锦屏左岸边坡特征值矩阵见表 4,采用 matlab 开发的实例推理系统计算锦屏边坡相似度矩阵。得到相似度最大的 5 个滑坡分别为:大冶铁矿狮子山滑坡、白银露天矿滑坡、安家岭露天矿北帮滑坡、三峡升船机边坡楔形体塌落、漫湾滑坡,结果见表 5。

表 4 锦屏边坡特征值矩阵打分表
Table 4 Characteristic value matrix of Jinping slope

因素	破坏模式	滑面倾角 ($^{\circ}$)	滑面类型	边坡的岩 体结构	边坡倾角	降雨 条件	地下水	水库蓄水	开挖	爆破	地震(峰值 加速度)
特征 描述	以 SL_{44-1} 松弛拉裂带为上游边界,以 f_{42-9} 断层为下游边界及底滑面,以煌斑岩脉为后缘切割面的楔形体滑移破坏模式	50~60	f_{42-9} 由构造角砾岩、岩屑和断层泥组成,角砾呈次棱~次圆状,有明显的搓磨特征,具压剪性特点。后期风化强烈,呈强风化夹层。	层状反倾结构	1 850 m 高程以上 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$	雨量充沛	补给水源有限,靠外岩体局部受降雨影响明显,有隔水层	有	有	有	0.1g
特征值	4	4	3	3	5	2	2	1	1	1	5

表 5 锦屏边坡相似度排序表
Table 5 Sequencing of slope similar with Jinping slope by similarity

序号	滑坡名称	相似度/%
1	大冶铁矿狮子山滑坡	77.50
2	白银露天矿滑坡	76.18

3	安家岭露天矿北帮滑坡	75.50
4	三峡升船机边坡楔形体塌落	74.67
5	漫湾滑坡	69.60

4.3 锦屏一级左岸边坡初步预警判据

查询滑坡数据库发现,与锦屏一级左岸边坡最

相似的 5 个滑坡中大冶铁矿狮子山滑坡和安家岭露天矿北帮滑坡有较为完整的变形监测数据，并且给出了变形破坏过程，它们与锦屏边坡的相似度均为 77.50%。

分析安家岭露天矿北帮滑坡和大冶铁矿狮子山滑坡的破坏过程，结合监测数据可给出锦屏一级左岸边坡位移速率判据建议值。如图 4、5 所示，滑坡整个变形过程可分为初始变形、匀速变形、加速变形和急剧变形（临滑）4 个阶段。表 6 给出了安家岭露天矿北帮滑坡和大冶铁矿狮子山滑坡不同变形阶段的变形速率。因此，以安家岭露天矿北帮滑坡和大冶铁矿狮子山滑坡的变形发展过程作为工程类比，可初步预测锦屏左岸坝肩边坡在不同变形阶段的变形速率，如表 7 所示。

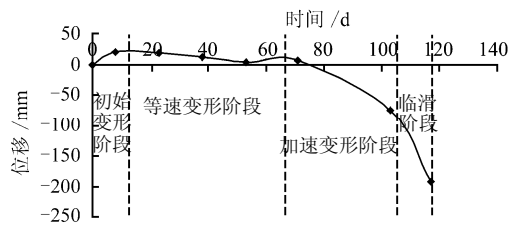


图 4 安家岭露天矿滑坡的竖直位移随时间的变化曲线^[12]
Fig.4 Curve of vertical displacements vs. time of Anjialing landslide^[12]

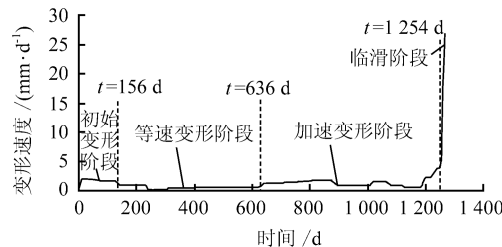


图 5 大冶铁矿东采场滑坡变形速率时间曲线图^[6]
Fig.5 Deformation curve of Daye iron mine landslide^[6]

表 6 典型边坡初步预警判据表
Table 6 Suggested warning criteria of typical slopes

滑坡名称	变形速度/(mm/d)			
	初始变形阶段	匀速变形阶段	加速变形阶段	急剧变形阶段
安家岭露天矿北帮	<0.30	0.30~1.80	1.80~4.20	>4.20
大冶铁矿狮子山	<0.50	0.50~1.63	1.63~4.00	>4.00

表 7 锦屏一级左岸滑坡位移速率判据建议值
Table 7 Suggested displacement rate criterion of landslide at the left bank of Jinping I hydropower project

阶段名称	初始变形阶段	匀速变形阶段	加速变形阶段	急剧变形阶段
变形速率/(mm/d)	<0.30	0.30~1.63	1.63~4.00	>4.00

4.4 锦屏一级左岸边坡预警指标修正

4.4.1 确定评价因子和修正分级标准

影响边坡预警判据的因素多且复杂，而各因素的影响程度也不相同，其中以地质条件影响最为显著。依托滑坡实例推理系统，总结了 11 项主要影响边坡预警判据的因素，分别是破坏模式、滑面倾角、滑面类型、边坡的岩体结构、边坡倾角、降雨条件、地下水、水库蓄水、开挖、爆破、地震动峰值加速度，分别用 $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10}, u_{11}$ 表示。

将边坡预警判据修正这一问题定义为有限论域 U ，把影响边坡预警判据的 11 个因素作为 U 中的因素，则因素集 U 可表示为

$$U = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10}, u_{11})$$

边坡预警指标修正系数的分级和取值是一个开放的、动态的自定义系统。依据滑坡数据库中的判据信息，并满足锦屏工程应用中的精度要求，将边坡预警判据修正划分为 10 个等级，并相应给出修正系数，则边坡预警判据修正评价 V 可表示为

$$V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10})$$

为提高精度和计算效率，按照修正级别越低，修正系数区间越小的原则自定义修正系数，如表 8 所示。

表 8 修正级别及修正系数表
Table 8 Table of correction levels and coefficients

因素	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}
修正级别	-5 级	-4 级	-3 级	-2 级	-1 级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
修正系数	<0.1	0.1~0.25	0.25~0.5	0.5~0.8	0.8~1	1~1.25	1.25~2	2~4	4~10	>10

4.4.2 隶属度（函数）确定和权重分配

在模糊数学中，是以隶属度来描述事物权重的模糊界限的。根据隶属度的建立原则，在水电站高边坡预警判据修正中，由于判据修正因素集 U 中的因素均为离散型变量，因此，采用德尔斐法即专家意见法确定其隶属度。

因子对比值为目标边坡的特征值减去参考边坡的特征值，根据专家意见法得到的专家经验库给出每个因子对比值对应的修正级别以及对该级别的隶属程度，表 9 给出了破坏模式因子对比修正隶属度。其他因子对比修正隶属度可以同理得到，在此不一列举。

各项因素在对边坡预警判据的影响中所起作用

的大小及重要性不同, 综合评判时应对各因素赋以一定的权重。与实例推理系统一致, 采用两两比较法给出因子权重, 由 11 项影响因素 (依次为破坏模式、滑面倾角、滑面类型、边坡的岩体结构、边坡倾角、降雨条件、地下水、水库蓄水、开挖、爆破、

地震动峰值加速度) 权重构成的因子权重矩阵 $A=$ (30%, 20%, 20%, 10%, 5%, 3%, 3%, 3%, 2%, 2%, 2%)。

1075

表 9 破坏模式因子对比隶属度表

Table 9 The membership values of failure mode by factor comparison

修正级别	对比值									修正系数
	[-9, -7]	[-6, -5]	[-4, -3]	[-2, -1]	0	[1, 2]	[3, 4]	[5, 6]	[7, 9]	
-5 级	0.4									<0.10
-4 级	0.4	0.4	0.3							0.10~0.25
-3 级	0.2	0.4	0.4	0.2						0.25~0.50
-2 级		0.2	0.3	0.4						0.50~0.80
-1 级				0.4						0.80~1.00
不修正					1					1.00
1 级						0.4				1.00~1.25
2 级						0.4	0.3	0.2		1.25~2.00
3 级						0.2	0.4	0.4	0.2	2.00~4.00
4 级							0.3	0.4	0.4	4.00~10.0
5 级									0.4	>10.00

4.4.3 模糊综合评价

依据表 9 和锦屏边坡与参考边坡的因子对比值给出单因素指标评判矩阵 R , 即 U 到 V 的模糊关系矩阵。如表 10 所示给出了 (锦屏—安家岭露天矿北帮) 单因素指标评判矩阵 R 锦屏—安家岭。

表 10 (锦屏—安家岭) 单因素指标评判矩阵
Table 10 (Jinping-Anjialing) evaluation matrix of single-factor indicators

影响因素	级别										
	-5 级	-4 级	-3 级	-2 级	-1 级	0 级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
破坏模式			0.2	0.4	0.4						
滑面倾角		0.3	0.4	0.3							
滑面类型											
边坡的岩体结构							0.6	0.4			
边坡倾角											
降雨条件				0.4	0.6						
地下水							0.6	0.4			
水库蓄水		0.1	0.2	0.3	0.4						
开挖											
爆破		0.1	0.2	0.3	0.4						
地震动峰值加速度			0.4	0.6							

评判结果是通过权重矩阵 A 和模糊关系矩阵 R 的复合运算得到。由于需考虑因素集 U 中所有因素 $u_j (j=1,2,\dots,m)$ 对模糊综合评价集的隶属度 b_i 的影响, 所以采用加权平均型综合评价模型 $M(\bullet,+)$, 即 $B=AR$ 。

采用模型 $M(\bullet,+)$ 计算模糊向量 B , 给出边坡

预警判据修正级别的隶属函数。 $\mu_B(v_i)=\{V:b_1/-5 级+b_2/-4 级+b_3/-3 级+b_4/-2 级+b_5/-1 级+b_6/1 级+b_7/2 级+b_8/3 级+b_9/4 级+b_{10}/5 级\}$

经过归一化计算后, 得到

$B_{\text{锦屏—安家岭}}=(0, 0.09, 0.21, 0.29, 0.22, 0.11, 0.07, 0, 0, 0)$

根据最大隶属度原则, 以安家岭滑坡为参考的修正级别为-2级, 修正系数取0.65。同理可以计算出以大冶铁矿滑坡为参考的修正级别为-2级, 修正系数取0.7。

4.4.4 锦屏一级左岸边坡预警速率判据修正

依据边坡预警判据修正级别的隶属函数, 按照最大隶属度原则即可做出分级评判, 确定修正级别, 得到修正系数的范围, 综合判定给出修正因子, 修正因子乘以参考边坡的预警判据即得到锦屏左岸边坡预警判据修正值。根据边坡 (滑坡) 相似度计算结果, 发现安家岭露天矿北帮滑坡和大冶铁矿狮子山滑坡位于锦屏边坡相似度排序表前 5 之列, 由于这两个滑坡与锦屏边坡都不是完全相似, 需要根据模糊综合评价模型进行修正, 修正后的计算结果见表 11 所示。以安家岭滑坡为参考修正得到锦屏左岸边坡从匀速变形阶段进入加速变形阶段的阈值为 1.17 mm/d, 而以大冶铁矿狮子山滑坡为参考修正得到的阈值为 1.14 mm/d。

表 11 锦屏一级电站左岸边坡位移速率判据修正值
Table 11 Revised displacement rate criterion of landslide at the left bank of Jinping I hydropower project

参考边坡	相似度 /%	修正 级别	修正 因子	变形速度修正值/(mm/d)			
				初始	匀速	加速变	急剧
				变形阶段	变形阶段	形阶段	变形阶段
安家岭	75.5	-2 级	0.65	<0.20	0.20~1.17	1.17~2.73	>2.73
大冶铁矿 狮子山	77.5	-2 级	0.70	<0.35	0.35~1.14	1.14~2.80	>2.80

依据位移速率判据值可以设计边坡预警系统，
1076
当锦屏一级左岸边坡进入加速变形阶段，则必须发出预警预报，并及时采取合理的加固措施或其他预警预案，将损失减小到最低，由此可见，滑坡进入加速变形阶段的位移速率阈值至关重要。从表 11 中的结果可以发现，选用两个不同的参考边坡计算得到锦屏一级水电站左岸边坡进入加速变形阶段的位移速率阈值相当接近，所以可以确定该阈值的精确区间为 1.0~1.2 mm/d。

5 结 语

建立了由 31 个典型岩质滑坡组成的滑坡数据库；基于比值法相似度计算理论和模糊综合评判模型研制了滑坡实例推理系统。以锦屏一级电站左岸边坡为例，找到 5 个与其较为相似的滑坡，深入分析类似边坡变形破坏过程，给出了锦屏一级电站左岸边坡预警判据建议值，并建立边坡预警判据修正的模糊综合评判模型，修正了相似边坡预警判据，得到较为准确的位移速率判据。

本文提出的工程类比、实例推理和模糊综合评判相结合的滑坡预警判据研究方法，适用于各种岩质边坡；并且基于该方法研制的滑坡实例推理系统具有自学习功能，随着滑坡数据库不断地充实与完善，将得到更为准确的滑坡预警判据。

参 考 文 献

[1] 贺可强, 李显忠. 大型堆积层滑坡剪出口形成的力学条件与综合位移力学判据[J]. 工程勘察, 1996, (5): 13—16.

[2] 王尚庆, 陈磊. 长江三峡滑坡监测预报[M]. 北京: 地质出版社, 1999.

[3] ROBERTO R. Seismically induced landslide displacements: A predictive model[J]. **Engineering Geology**, 2000, 58(3/4): 337—351.

[4] 李秀珍, 许强, 黄润秋, 等. 滑坡预报判据研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(4): 5—11.

LI Xiu-zhen, XU Qiang, HUANG Run-qiu, et al.

Research on prediction criterion for temporary prediction of landslide[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2003, 14(4): 5—11.

[5] 金海元, 徐卫亚, 孟永东, 等. 锦屏一级水电站左岸边坡稳定综合预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2058—2063.

JIN Hai-yuan, XU Wei-ya, MENG Yong-dong, et al.

Research on comprehensive prediction for slope stability at left bank of Jinping I hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2058—2063.

[6] 许强, 曾裕平. 具有蠕变特点滑坡的加速度变化特征及临滑预警指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1099—1106.

XU Qiang, ZENG Yu-ping. Research on acceleration variation characteristics of creep landslide and early-warning prediction indicator of critical sliding[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(6): 1099—1106.

[7] 许强, 曾裕平, 钱江澎, 等. 一种改进的切线角及对应的滑坡预警判据[J]. 地质通报, 2009, 28(4): 501—505.

XU Qiang, ZENG Yu-ping, QIAN Jiang-peng, et al. Study of a improved tangential angle and the corresponding landslide pre-warning criteria[J]. **Geological Bulletin of China**, 2009, 28(4): 501—505.

[8] HERRERA G, FERNÁNDEZ-MERODO J A, MULAS J, et al. A landslide forecasting model using ground based SAR data: The Portalet case study[J]. **Engineering Geology**, 2009, 105(3/4): 220—230.

[9] 黄润秋, 许强, 戚国庆. 降雨及水库诱发滑坡的评价与预测[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[10] 赵民, 闫韶兵, 朱民, 等. 基于实例推理的强夯设计辅助系统[J]. 工业建筑, 2007, 37(增刊): 892—894.

ZHAO Min, YAN Shao-bing, ZHU Min, et al. Aided dynamic consolidation design system using case-based reasoning[J]. **Industrial Construction**, 2007, 37(Supp.): 892—894.

[11] 温世亿, 李建林, 杨学堂, 等. 卸荷高边坡稳定性分析的多级模糊综合评判[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2041—2044.

WEN Shi-yi, LI Jian-lin, YANG Xue-tang, et al.

Multistage fuzzy comprehensive evaluation for analyzing unloading high-steep slope stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 2041—2044.

[12] 钱兆明, 顾凤鸣. 平朔安家岭露天矿边坡滑坡预报[J]. 采矿技术, 2007, 7(4): 25—26.