

混凝土坝与坝基互馈面及其确定

向 衍^{1,2}, 吴中如¹

(1. 河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 基于混凝土坝坝体与坝基互馈作用面的特性, 运用优势面理论建立了坝体与坝基互馈优势面的评价指标和分类模型. 并以确定三峡工程典型坝段的互馈优势面为例, 说明该确定方法简便可行.

关键词: 坝基; 互馈面; 决策树; 混凝土坝

中图分类号: TV642

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2007)01-0012-09

Behavior and decision method of crossfeed surface between concrete dam body and foundation

XIANG Yan^{1,2}, WU Zhong-ru¹

(1. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;*
2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Based on the characteristics of the crossfeed surface between the concrete dam body and foundation, the evaluation index and classification model for the crossfeed surface are established by using the dominant surface theory. Determination of the crossfeed surface of the typical dam section of the Three Gorges Project shows that the method is convenient and feasible.

Key words: dam foundation; crossfeed surface; decision tree; concrete dam

20世纪发生了3次重大坝工事故, 即1928年美国 St. Francis 重力拱坝溃决、1964年法国 Malpasset 双曲拱坝溃坝和意大利 Vajont 双曲拱坝在近坝库区左岸发生的大滑坡. 张有天^[1]在已有文献资料的基础上, 从岩石力学的观点分析了工程事故的出事原因. 从本质上讲, 这些大坝的失事属于坝体与坝基的互馈作用结果.

1 互馈与互馈面

1.1 互馈作用

水工结构工程中存在着坝体、坝基以及地下水之间的互馈作用, 这三者之间的关系可用图1描述^[2]. 在

收稿日期: 2006-07-11

基金项目: 国家973项目(2002CB412707)和国家自然科学基金重点项目(50139030)

作者简介: 向 衍(1977-), 男, 土家族, 湖北巴东人, 博士, 主要从事大坝安全监控和安全评价.

图1中,A描述了地下水以化学、物理及力学的作用,施加于坝基岩体;A'描述了坝基岩体作为地下水运动的介质,其结构限定了地下水流动的空间与途径;B描述了岩体结构制约着地质条件,影响大坝的稳定性及其正常运行等;B'描述了施加在坝体上的作用力改变着坝基岩体的固有特性,影响岩体内应力场的分布;C描述了大量渗漏的地下水作用于坝体,影响着坝体的稳定性;C'描述了人类活动对地下水的影响,通过大坝工程改变着局部区域内的水文地质条件,影响地下水渗流场的分布。

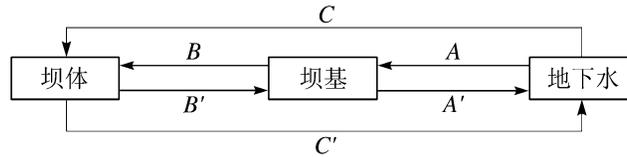


图1 坝体与坝基互馈关系图

Fig. 1 Relationship between dam body and foundation

综上所述,大坝以地质环境为依托,改造着地质环境;地质环境对大坝起反作用,影响着大坝工程的安全和正常运行;地质环境内地下水与岩体又相互作用、相互影响,这种互馈作用将直接影响着大坝结构的稳定性。

1.2 互 馈 面

混凝土坝与坝基互馈的力学行为的前提,是需要明确坝体与坝基互馈作用界面上的力学行为. 本文研究的互馈面即指混凝土坝与坝基间互馈作用的界面. 坝体中的弱面(如裂缝)、坝体与坝基之间的胶结面,以及坝基中的各种软弱结构面均可能成为互馈面. Zienkiewicz^[3]曾指出,耦合常发生在界面上. 同理,互馈作用也会发生在界面. 因此,研究坝体与坝基互馈作用的前提,则是确定互馈作用发生的界面——互馈面. 确定互馈面首先应从诸多的弱面中确定优势面(即互馈优势面). 在此基础上,确定其中影响最为显著的面即为互馈面.

将混凝土坝坝体与坝基互馈作用作为一个整体的力学问题来考虑时,其关键是两者作用界面间的接触. 本文首先确定坝体与坝基间的互馈优势面;在此基础上,建立考虑荷载因素的具有粗糙表面的互馈面.

(1) 结构优势面 漫长的地质年代使岩体内部产生了许多不同类型、不同性质的结构面^[4],如构造结构面、原生结构面和外生结构面等. 岩体结构控制论认为,在这些不连续的结构面中,存在着按一定优势指标确定的、对岩体稳定性起控制作用的结构面,即结构优势面^[5-9].

(2) 粗糙结构面 经典接触力学的重要假设之一就是接触表面为几何光滑面,因而,表面接触应力分布也就几何光滑^[10]. 但有研究^[11]表明,固体表面并不是绝对几何光滑而是有粗糙度. 工程中大量的接触面实际上也是粗糙面,故研究粗糙面的界面效应及其相互作用具有重要意义.

(3) 互馈优势面 坝体与坝基互馈作用的不连续面大致包括两种类型. 一类是混凝土坝体与坝基岩体之间的胶结面;一类是坝基岩体的结构面. 影响坝基稳定最常见的结构面^[12]主要有:①坝基软弱岩层和风化破碎岩层,其强度较低,在坝基应力作用下产生层间滑动;②坝基下平缓的软弱夹层、断裂或破碎带组合,往往会形成沿软弱夹层滑动,以及部分岩体的过大压缩变形;③坝基或坝肩的断裂、软弱夹层组合,尤其是顺河向及平缓断裂的组合,会形成块体或多块体的错动失稳.

2 互 馈 面 的 确 定

针对上述结构面的特性,先寻找互馈优势面. 然后,找出最危险的互馈优势面,并以其强度指标和稳定性指标作为控制标准. 其中,强度指标反映坝体与坝基的局部安全,而稳定性指标则反映大坝的整体安全. 因此,本文以稳定性指标确定互馈面.

2.1 评 价 指 标

影响混凝土坝与坝基稳定性的因素很多. 可粗略地将其概括为几何形状、岩体性质和有关影响因素三类^[9,13]. 其中,几何形状(坝基结构面形状、倾向和倾角、坝基岩体材料种类和层序等)是稳定性的外部表现;岩体结构面(结构特征、软弱层或结构面发育特征、岩体风化程度、地下水影响特征、结构面力学参数等)是

稳定性分析的核心,也是岩性和地质构造及外力作用的综合反映;有关影响因素(作用在坝上的外荷载、温度、地震力、坝基地应力等)是通过互馈面的几何形状和岩体来影响混凝土坝与坝基稳定的外因. 这些因素的性质和特征复杂而又多变,故只能选取具有代表性的主要因素作为模型的输入参数. 这样既可简化模型,又可得到较高的模型预测精度^[14]. 综上,在参阅文献[9,12-18]的基础上,选择了结构面特征、结构面倾向、结构面型式、结构面凝聚力和内摩擦系数、岩体结构特征、岩体基本质量分级、地下水影响特征等 8 个参数,作为混凝土坝与坝基稳定性评价系统的输入参数.

需要说明的是,大坝的稳定性是在外荷载作用下坝体与坝基的整体安全响应. 根据有关设计规范^[19,20],坝体与坝基稳定性复核分为基本荷载组合和特殊荷载组合两种. 本文研究最不利荷载工况作用下的大坝的稳定性.

现就上述 8 个参数中较难确定的几个参数加以说明.

(1) 岩体基本质量分级 选择硬性岩体稳定性的岩石坚硬度和岩体完整度作为分级因素. 根据这两个分级因素定性组合所反映的岩体基本质量的定性特征见表 1;两个分级因素定量指标计算所得的岩体基本质量指标,进行岩体基本质量的定性和定量分级. 为对坝基岩体详细分级,还需考虑地下水状态、初始应力状态,以及大坝轴线方位与岩体主要软弱结构面产状的组合关系等修正因素,以修正岩体基本质量级别.

表 1 岩体基本质量分级

Tab. 1 Levels of basic rock quality

岩体基本质量级别	岩体定性特征	岩体基本质量指标(BQ)
I	坚硬岩,岩体完整	>550
II	坚硬岩、岩体较完整;较坚硬岩、岩体完整	550 ~ 451
III	坚硬岩,岩体较破碎;较坚硬岩或软硬岩互层或较软岩,岩体较完整	450 ~ 351
IV	坚硬岩,岩体破碎;较坚硬岩,岩体较破碎或破碎;较软岩或软硬岩互层,且以软岩为主,岩体较完整 ~ 较破碎;软岩,岩体完整 ~ 较完整	<350

(2) 岩体结构特征 按照混凝土坝坝基岩体结构的工程地质特征,将岩体结构概化为 8 种地质力学模型^[15],即整体结构、块状结构、夹层结构、薄层结构、互层结构、镶嵌结构、层碎结构和碎裂结构.

(3) 结构面特征 按照混凝土坝坝基岩体结构面的工程地质特征,将岩体结构概化为 4 种地质力学模型^[15],即层状结构面(岩体中成层的不连续面,包括层面、软弱夹层及软弱岩层的顺层接触面)、破裂结构面(岩体中的破裂或分离,包括节理、片理、劈理及坚硬岩体的层面等,破碎结构面(岩体内的破坏分离面,包括断层破碎带、风化破碎带、断层及层间错动面,结构面的充填物为角砾岩、碎屑、岩粉、断层泥等且不均一,在法向力的作用下产生显著的压缩)、泥化结构面(最软弱的结构面,完全由塑性泥质物构成).

(4) 地下水影响特征 坝基在水荷载作用下,一般可分为饱和区、非饱和湿区、非饱和混合区和干区,分别对应渗水、湿润、潮湿和干燥 4 种状态^[21]. 在具体定义地下水影响特征时,主要考察坝基软弱面在 4 种分区内的分布大小. 若饱和区占的面积较大,则认为在地下水作用下坝基是渗水的;若非饱和湿区占的面积较大,则认为坝基是湿润的;若非饱和混合区占的面积较大,则认为坝基是潮湿的;若干区占的面积较大,则认为坝基是干的.

对于上述除结构面凝聚力和内摩擦系数以外的 6 个参数,根据上述定性描述,采用表 2 中的二进制定义值. 将混凝土坝与坝基分为稳定(I)、较稳定(II)和失稳(III)三种情况,以前述的 8 个参数作为输入向量,以稳定度作为输出参数.

表2 参数定义值

Tab.2 Defined values of the parameters

参数名称	特 征	定义值	参数名称	特 征	定义值	
岩体结构特征	整体结构	000	结构面形式	台阶	10	
	块状结构	001		凸面	11	
	夹层结构	010	岩体基本质量分级	I级	00	
	薄层结构	011		II级	01	
	互层结构	100		III级	10	
	镶嵌结构	101		IV级	11	
	结构面特征	层状结构面	00	地下水影响特征	干燥	00
		破裂结构面	01		潮湿	01
破碎结构面		10	湿润		10	
泥化结构面		11	渗水	11		
结构面形式	凹面	00	结构面倾向	无	00	
	平面	01		反倾	01	
				高角度	10	
			倾向下游	11		

2.2 分类原理

互馈优势面的确定是一个分类问题,即把数据项映射到其中一个事先定义类中的一个学习函数的过程.由一组输入的属性值向量和相应的类,用归纳学习算法得出分类.学习的目标是构建一个分类模型(即分类器).分类问题的数据库术语可作如下描述^[22-24]:

首先,将一个给定的数据集按指定的 $m+1$ 个属性划分为 A_1, A_2, \dots, A_m, C , 其中的 C 为分类属性. 将该数据集按 C 的属性值分类, 形成一个分类模型, 再用该模型对新的数据集进行分类预测, 即在已知新数据集属性 A_1, A_2, \dots, A_m 的情况下预测分类属性值 C . 故分类问题分为两个步骤(见图2): ①构建分类模型 该步骤是机器学习的过程, 用分类算法和类别已知的数据集创建分类模型. 用于构建模型的数据集为训练集; ②利用分类模型预测 必须先利用构建的模型预测一个类别已知的数据集(测试集), 并将预测结果和已知值进行比较. 然后, 利用准确率达到一定标准的分类模型预测类别未知的数据集.

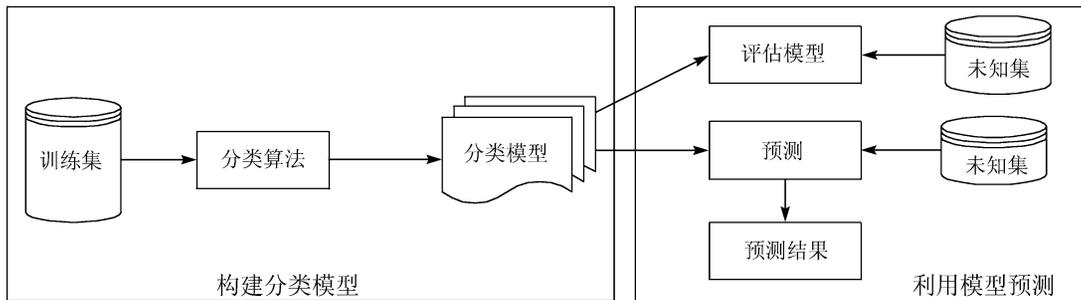


图2 分类问题的两个步骤

Fig.2 Two steps for classifying problems

2.3 样本采集

为较准确地掌握输入因素与输出因素的非线性映射关系, 必须有充足的学习样本. 此外, 样本数据的采集必须按照同一原则进行筛选, 且具有广泛性和代表性, 以保证采集的数据真实可靠. 为此, 本文共收集各类

混凝土坝坝基稳定实例 38 个^[12,25-28],其中,稳定(Ⅰ)22 个,较稳定(Ⅱ)9 个,失稳(Ⅲ)7 个(见表 3)。

表 3 样本数据(80%为训练样本,20%为验证样本)

Tab.3 Data of samples (80% are training samples and 20% are testing samples)

序号	大坝及坝段	结构面					岩体		地下水影响特征	稳定度
		特征	倾向	型式	凝聚力	摩擦系数	结构特征	质量分级		
1	新安江#13	00	00	01	1.10	1.20	001	01	10	I
2	波迪科西 ^[25]	10	00	00	0.00	0.73	010	01	01	I
3	宝塔寺#3	00	00	01	1.00	1.00	011	00	10	I
4	牛头山	01	00	01	1.20	1.10	001	01	11	I
5	安砂#3	10	01	10	0.70	0.90	100	10	10	I
6	长湖#6	01	00	01	0.58	0.85	011	01	11	I
7	长湖#9	01	01	01	0.70	0.90	011	01	11	I
8	古田一级#16	10	00	10	0.90	1.00	011	10	11	I
9	陈村拱坝	10	10	10	1.00	0.65	001	10	01	I
10	丹江口#27	00	00	01	0.80	0.85	001	01	01	I
11	水东大坝	00	00	01	0.85	1.05	010	01	11	I
12	古田二级#11	00	00	01	0.90	1.0	001	01	01	I
13	古田三级#4	00	00	01	0.90	1.0	100	01	01	I
14	古田四级#7	00	00	01	1.0	1.0	000	00	00	I
15	水口#23	00	00	01	1.0	1.2	011	11	11	I
16	水口#8	00	00	01	1.0	1.2	101	00	01	I
17	水口#19	00	00	01	1.0	1.2	000	00	11	I
18	二滩拱坝 ^[26]	01	10	10	1.70	1.0	001	01	00	I
19	三峡#2	11	00	10	2.0	1.7	000	00	00	I
20	三峡#4	11	00	10	2.0	1.7	000	00	00	I
21	古田一级#11	10	00	11	0.90	1.00	101	01	11	I
22	某拱坝 ^[27]	10	10	01	0.75	0.80	001	01	10	I
23	新安江#4	00	00	01	0.70	0.90	000	01	10	Ⅱ
24	新安江#23	00	00	01	0.80	0.90	001	01	10	Ⅱ
25	新安江#3	11	00	01	0.40	0.75	010	01	10	Ⅱ
26	安砂#6	10	01	10	0.60	0.70	100	10	11	Ⅱ
27	古田四级#11	00	00	01	0.00	0.65	000	01	01	Ⅱ
28	丹江口#1	01	00	01	0.00	0.65	000	10	11	Ⅱ
29	新安江#3	00	00	01	0.4	0.75	001	10	11	Ⅱ
30	古田一级#8	10	11	00	0.60	0.80	010	01	11	Ⅱ
31	古田一级#21	00	00	01	0.60	0.80	110	10	11	Ⅱ
32	古田三级#21	10	00	01	0.90	1.00	011	10	11	Ⅲ
33	丹江口右岸转弯段	01	10	01	0.00	0.65	010	01	11	Ⅲ

(续表)

序号	大坝及坝段	结构面					岩体		地下水影响特征	稳定度
		特征	倾向	型式	凝聚力	摩擦系数	结构特征	质量分级		
34	山西某坝 ^[28]	00	00	01	0.025	0.45	010	01	10	Ⅲ
35	梅山右坝肩	01	10	11	0.00	0.60	001	01	11	Ⅲ
36	科恩布赖	01	01	01	0.00	0.60	100	01	11	Ⅲ
37	马尔帕塞	10	11	00	0.15	0.58	111	11	11	Ⅲ
38	双河拱坝	10	10	01	0.00	0.65	001	10	11	Ⅲ

2.4 模式分类器

根据前述分类原理及表3中的样本集,建立了寻找互馈优势面的分类器。

(1) 数据预处理 对定量数据进行预处理可加快收敛速度.对数据预处理即为对输入特征的原始值 $X_{P_i}^0$ 进行线性变换.本文采用归一化预处理,即

$$X_{P_i}^l = \frac{X_{P_i}^0 - \min X_i}{\max X_i - \min X_i} \quad (1)$$

式中: $X_{P_i}^l$ 为输入特征向量第 P 个训练样本的第 i 个影响因素的输入值; $X_{P_i}^0$ 为输入特征的原始值; X_i 为输入特征向量的第 i 个影响因素的输入值。

(2) 决策树分类器 决策树分类器的实质为归纳分类算法.该分类算法具有良好的伸缩性,能处理多种数据类型.决策树算法以树状结构表述数据分类的结果,其内部结点是属性,叶结点是所要学习划分的类.经过训练集训练产生决策树.使用决策树对实例进行分类时,由树根开始对实例的属性逐渐测试,且沿分枝向下走,直至某个叶结点,此叶结点代表的类即为实例所处的类。

决策树算法主要包括(对决策树进行)“分枝”(即利用训练样本集,建立决策树)和“剪枝”(即利用检验样本集,优化形成的决策树)两个方面^[22].本文主要利用信息熵准则进行分支.熵是衡量系统混乱程度的统计量,熵越大表示系统越混乱.分类的目的是提取系统信息,使系统向更加有序的方向发展.故最佳的划分方案为使熵减少量最大的方案.划分后的熵减少量即为信息增益,所以选择属性对节点进行划分的标准就是选取信息增益最大的属性。

C. E. Shannon^[22]对信息熵的定义为:设数据集 S 有 A_1, A_2, \dots, A_n 和 C 共 $n+1$ 个属性.其中,分类属性 C 有 m 个不同的离散属性值 c_1, c_2, \dots, c_m ,即 S 中的记录可分为 m 个类别.又设 S 中的全部记录数为 s ,分类属性值为 c_1, c_2, \dots, c_m 的记录数分别为 s_1, s_2, \dots, s_m .则 S 划分之前的信息熵为

$$E(s_1, s_2, \dots, s_m) = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2(p_i) \quad (2)$$

式中: p_i 为 S 中任意一个记录属于类别 c_i 的概率,并用 s_i/s 估计。

假设属性 A 具有属性 V 个不同的离散值,可使用属性 A 把数据集 S 划成 V 个子集 (S_1, S_2, \dots, S_v) . 设子集 S_j 中全面的记录数为 s_j ,其中分类属性值为 c_1, c_2, \dots, c_m 的记录数分别为 $s_{1j}, s_{2j}, \dots, s_{mj}$,则子集 S_j 的信息熵为

$$E(s_{1j}, s_{2j}, \dots, s_{mj}) = - \sum_{i=1}^m p_{ij} \log_2(p_{ij}) \quad (3)$$

式中: p_{ij} 为子集 S_j 中任意一个记录属于类别 c_i 的概率,用 s_{ij}/s_j 估计。

使用属性 A 把数据集 S 划分成 V 个子集后,数据集 S 的总信息熵为 V 个子集的信息熵的加权平均

$$E(A) = \sum_{i=1}^m W_j E(s_{1j}, s_{2j}, \dots, s_{vj}) \quad (4)$$

式中: W_j 为第 j 个子集的权,并用 s_j/s 表示。

根据信息增益的定义,将 S 用属性 A 划分后的信息增益定义为划分前后的信息熵差,即

$$\text{Gain}(A) = E(s_1, s_2, \dots, s_m) - E(A) \tag{5}$$

2.5 分类器的建立

目前较成熟的决策树算法有3种^[23,24].应用最广泛的是ID3算法及其改进算法C4.5.本文运用C4.5算法,将样本数据中的80%作为训练样本,其余的20%作为验证样本.C4.5算法采用信息增益作为选择属性对节点进行划分的分枝准则,并在决策树的各个节点上利用特征属性的信息增益大小,作为分枝属性选择的启发式函数,选择信息增益最大的特征作为分枝的属性.利用C4.5算法对样本进行训练的结果见图3.

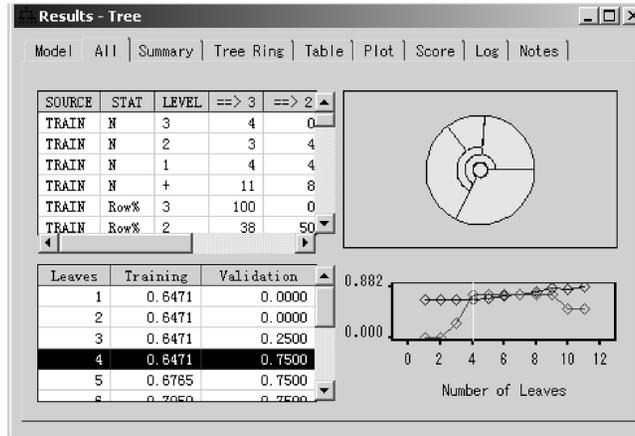


图3 决策树计算结果

Fig.3 Calculation results of tree decision

2.6 互馈面的确定方法

确定互馈优势面之后,还应在其中选择最危险的面作为互馈面.本文采用极限平衡法计算优势结构面的安全系数,定义其中安全系数最小的面即为互馈面.抗滑稳定分析的计算式分为单一滑面、双滑面和复合滑面模型^[29].

3 算例

现利用前述方法,确定长江三峡大坝左岸厂房#3坝段(剖面见图5)的互馈面.三峡大坝左岸厂#1~#5坝段^[30]的建基面高程为▽85.0m~▽90.0m,而厂房的建基面高程仅为▽22.2m,两者高程相差较大.因此,在大坝坝趾处形成高陡坡.坝基岩体内有倾向下游的缓倾角(小于30°)结构面,并兼有少量倾向下游的中倾角裂隙.这些结构面大部分在高边坡处露出,且材料的抗剪强度也较低,不利于坝体稳定.三峡大坝左岸厂房#3坝段坝基地质概化模型见图6.相应的互馈面确定方法如下:

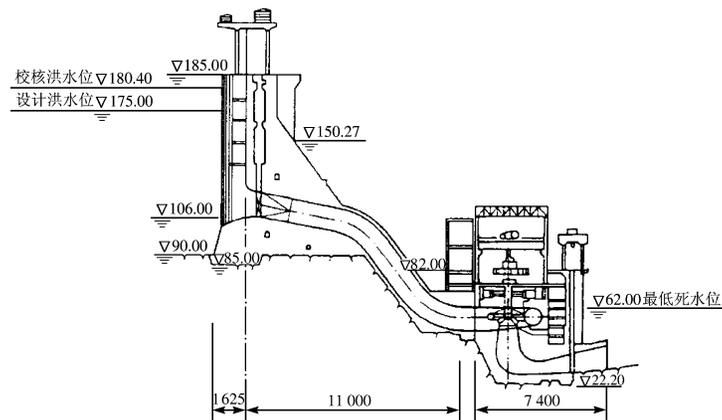


图4 三峡大坝左岸#3坝段剖面(尺寸单位:cm)

Fig.4 Profile of #3 left dam section of Three Gorges Dam (dimension unit; cm)

利用模式分类器确定#3 坝段的互馈优势面. 然后,利用极限平衡法计算其中不稳定面的安全系数,并最终得到#3 坝段的互馈面. 基于确定互馈优势面的模式分类器,对图 5 中#3 坝段的 9 个可能软弱结构面进行分类(分类结果见表 4),从而得到#3 坝段的互馈优势面. 由表 4 可见,利用模式分类器可得到#3 坝段 9 个可能软弱结构面中的 3 个互馈优势面,即结构面 *ABCDE*, *ABCFHI* 和 *ABDGHI*. 这与文献[29]中计算得到的互馈优势面结果一致. 按照确定互馈面的方法,在这 3 个互馈优势面中,确定了 *ABCFHI* 为互馈面.

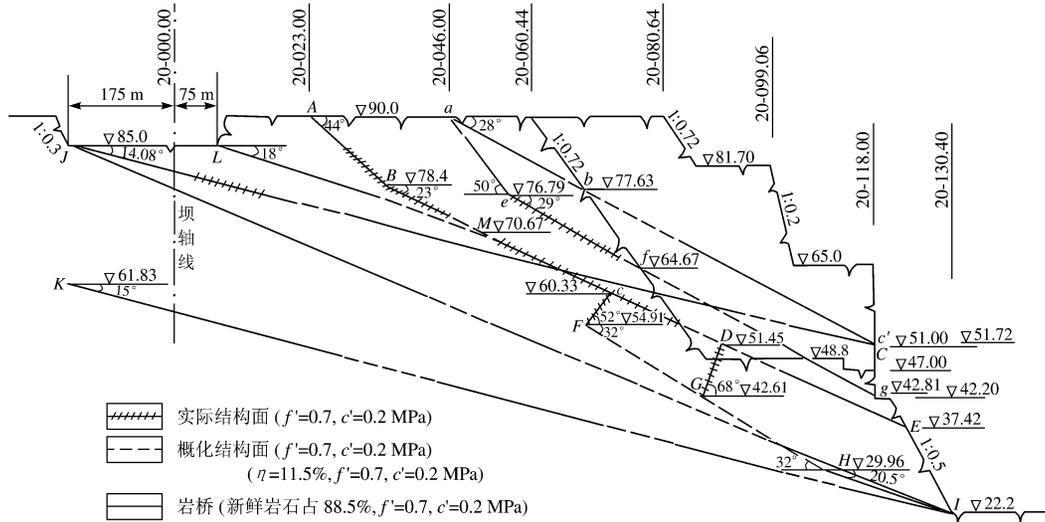


图 5 三峡大坝左岸 3#坝段地质概化模型

Fig. 5 Geological model of #3 left dam section of Three Gorges Dam

表 4 大坝左岸#3 坝段互馈优势面的确定

Tab. 4 Determination of the crossfeed dominant surface of #3 left dam section of Three Gorges Dam

结构面	决策树分类结果	稳定安全系数	互馈优势面
<i>abc'</i>	1	5.0	
<i>ae fg</i>	1	2.7	
<i>ABCDE</i>	2	2.4	✓
<i>LME</i>	1	3.0	
<i>ABCFHI</i>	2	2.0	✓
<i>ABDGHI</i>	2	2.2	✓
<i>JC</i>	1	5.2	
<i>Jl</i>	1	3.8	
<i>KI</i>	1	3.4	

4 结 语

(1) 互馈面是混凝土坝坝体与坝体互馈过程中影响最为显著的结构面,也是坝体与坝基整个系统中对坝基岩体稳定性起控制作用的结构面.

(2) 将与坝基稳定性有关的因素概括为几何形状、岩体性质和影响因素等 3 类,以及描述坝基稳定性的 8 个参数,即结构面特征、结构面倾向、结构面型式、结构面凝聚力、结构面内摩擦角、岩体结构特征、岩体基本质量分级、地下水影响特征等.

(3)根据互馈优势面的特点,建立了基于描述坝基稳定性的8个参数的决策树分类器,以确定坝基中众多软弱结构面中的优势面,即互馈优势面.对于存在多个互馈优势面的情况,采用极限平衡法计算各互馈优势面的抗滑稳定安全系数.稳定安全系数最小的面,即为互馈面.

确定三峡大坝左岸厂房#3坝段互馈面的算例表明,决策树分类器能成功确定混凝土坝坝体与坝基系统中互馈优势面;并能自动和处理复杂样本,简化了互馈优势面的确定.鉴于决策树的坝基稳定性评价系统尚处研究开发阶段,随着工程实践的不断积累和分类器的进一步完善后,互馈面的分类器可达到更高的智能水平和响应速度.

参 考 文 献:

- [1] 张有天. 从岩石力学观点看几个重大工程事故[J]. 水利学报, 2003, (5): 1-10.
- [2] 仵彦卿. 岩体水力学概述[J]. 地质灾害与环境保护, 1995, 1(6): 57-64.
- [3] Lewis R W, Bettess P, Hinton E. Numerical methods in coupled systems[M]. Chichester: Wiley, 1984.
- [4] 孙广忠. 论地质工程的基础理论[J]. 工程地质学报, 1996, 4(4): 1-6.
- [5] 汪明武. 区域稳定性智能评价与控制的模型[D]. 南京: 南京大学, 2000.
- [6] 蒋建平, 章杨松. 优势结构面理论在岩土工程中的应用[J]. 水利学报, 2001, (8): 15-20.
- [7] 周创兵, 孙万和. 白水峪水电站右岸坝下游边坡岩体的RMR-SMR分类及稳定性评价[J]. 工程地质学报, 1997, 3(5): 224-230.
- [8] 包惠明, 胡长顺. 基于ANN下的岩质路堑深边坡稳定性评价[J]. 交通运输工程学报, 2002, 3(2): 52-56.
- [9] 卢才金, 胡厚田. 改进的BP网络在岩质边坡稳定性评判中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 3(18): 303-307.
- [10] Johnson K L. Contact Mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [11] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [12] 王思敬. 坝基岩体工程地质力学分析[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [13] 饶运章, 侯运炳. 神经网络方法在围岩稳定性分级评价中的应用[J]. 黄金, 2001, 10(22): 15-17.
- [14] 刘 军, 张倬元. 四川某公路边坡缓侵角层状岩体结构面分级及成因分析[J]. 成都理工学院学报, 1999, 3(26): 279-282.
- [15] 张 勤, 陈志坚. 岩土工程地质学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996.
- [16] 陈昌彦, 王思敬. 边坡岩体稳定性的人工神经网络预测模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 2(23): 157-161.
- [17] 裘军良, 夏永旭. 人工神经网络在公路隧道围岩判别中的应用[J]. 广西交通科技, 2003, 4(28): 15-18.
- [18] 陈昌富. 仿生算法及其在边坡和基坑工程中的应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.
- [19] DL 5108-1999, 混凝土重力坝设计规范[S].
- [20] SL282-2003, 混凝土拱坝设计规范[S].
- [21] 陈振乾, 施明恒. 复杂环境条件下土壤非饱和区热湿迁移的研究[J]. 东南大学学报, 1994, 11(24): 63-67.
- [22] 胡小刚. 数据挖掘中决策树分类算法的研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2002.
- [23] 史忠植. 知识发现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [24] Mehmed Kantardzic. 数据挖掘-概念、模型、方法和算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [25] 汝乃华, 姜忠胜. 大坝事故与安全(拱坝)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [26] 姜弘道. 水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序[M]. 南京: 河海大学出版社, 1992.
- [27] 章杭惠. 混凝土拱坝病险及加固仿真分析[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [28] 赵海涛. 基于ANSYS的拱坝可视化建模和有限元仿真分析[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [29] 中国长江三峡工程开发总公司科技管理部. 三峡工程1#~5#坝段厂坝稳定科研成果(下)[R]. 宜昌: 长江三峡工程开发总公司, 2000.
- [30] 任青文, 余天堂. 三峡大坝左厂3号坝段稳定性的数值分析和试验研究[J]. 中国工程科学, 1999, 3(1): 41-45.