

文章编号: 1000-7598 (2009) 03-0603-10

基于设计安全系数及破坏模式的边坡 开挖过程动态变形监测预警方法研究

张振华^{1,2}, 冯夏庭¹, 周 辉¹, 张传庆¹, 崔 强³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 宜昌 443002; 3. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004)

摘 要: 由于地质和结构特征的不同造成的边坡变形破坏机制存在差异以及同一边坡在不同施工开挖阶段的变形规律和量值也存在差别, 采用工程类比方法获得的单一的静态的边坡监测预警指标无法表达某一边坡在施工开挖过程中动态的变形规律和特征, 针对该问题提出了基于设计安全系数和破坏模式的边坡开挖过程中动态变形监测预警指标的研究思路和方法, 并将其应用于糯扎渡水电站溢洪道消力塘边坡 755~740 m 开挖过程变形监测预警指标的确定, 通过与现场监测结果的对比分析表明, 该边坡开挖过程中是稳定的, 分析与工程实际是相符的。研究表明, 基于设计安全系数和破坏模式的边坡开挖过程动态监测预警指标的研究思路和方法用于边坡在开挖过程中动态变形监测预警是可行和有效的。

关 键 词: 边坡; 开挖; 设计安全系数; 破坏模式; 预警指标

中图分类号: TU457

文献标识码: A

Research on dynamic early warning method of slope deformation monitoring during excavation based on designed safety factor and failure mode

ZHANG Zhen-hua^{1,2}, FENG Xia-ting¹, ZHOU Hui¹, ZHANG Chuan-qing¹, CUI Qiang³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Different geological structure characteristics of slopes lead to different deformation regulations and failure mechanisms of slopes; deformation regulation and magnitude of the same slope are different due to different excavation stages of slope; simple and static early warning index of slope monitoring obtained by engineering analogism is difficult to express the dynamic deformation features and slope regulations during excavation. A new study through and corresponding method to obtain adequate dynamic early warning indexes of slope monitoring during excavation are put forward, which are based on designed safety factor and failure mode of slopes. The study thought and method are applied to obtain the early warning index of left bank slope of plunge pool of spillway during excavation from 755 m to 740 m at Nuozadu Hydropower Station; and by comparing the value of early warning index obtained by the study thought and method with the value of field deformation monitoring, it is shown that the slope is stable during the excavation, which is in concordance with actual engineering so as to prove that the study thought and method are feasible and effective.

Key words: slope; excavation; designed safety factor; failure mode; early warning index

1 引 言

边坡监测的主要目的是了解坡体的演变过程, 为边坡所处的安全状态和边坡失稳的预测预报提供

可靠的数据信息和科学依据。而边坡监测预警的目的是在获取边坡监测信息的基础上, 了解边坡岩土体变形的范围和发展趋势, 预测边坡可能发生破坏的时间和空间, 以便于及时地采取措施, 达到防止

收稿日期: 2008-01-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 50579091); 国家自然科学基金面上项目 (No. 50579070); 国家十一五支撑计划项目 (No. 2006BAB04A06); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (No. KJCX2-YW-L01)。

第一作者简介: 张振华, 男, 1977 年生, 讲师, 博士研究生, 从事边坡稳定性分析理论与数值模拟方法的研究。E-mail: zenithzhang@sina.com

或减轻边坡破坏所带来的灾害损失。要达到边坡监测预警的目的,对边坡监测预警指标进行确定是前提,亦即在确定边坡的预警指标后,根据所获得的监测信息来判断边坡所处的安全状态。

目前,国内外学者提出了 10 余种用于判断斜坡所处安全状态的预警指标,如稳定性系数、可靠概率、变形速率、位移加速度、塑性应变率、蠕变曲线切线角、位移矢量角、声发射参数、分维值等,其中工程上用得最普遍的监测预警指标为变形速率。目前所普遍采用边坡监测预警指标存在以下两方面的不足:监测预警指标的不充分性和单一指标的局限性。以变形速率为例,监测预警指标的不充分性主要表现在用同一个变形速率和某一范围的变形速率去对所有的斜坡进行预警,结果往往会遇到根据同一信息得到不同判断结果的情况,如新滩滑坡滑前的变形速率为 116 mm/d,而黄腊石滑坡滑前变形速率仅为 2 mm/d,产生这种差异的主要原因在于不同斜坡地质和结构上的差异引起岩体变形机制的差异,不同的坡体失稳前没有统一的运动行为,也无法用统一的曲线来表征这种行为,加上降雨、地震、人类活动以及其他随机因素干扰,实际上大多数情况下的位移历时曲线都具有不同程度的波动和起伏,其形态各种各样^[1]。因此,对边坡的预警指标值很难给出一个客观标准,对于不同的边坡其监测预警指标应该有其各自的不同指标值。监测预警单一指标的局限性主要表现在采用某种预警指标来对整个边坡进行预警存在一定的片面性,如抚顺西露天矿斜坡在 1987 年 2 月 21 日~22 日,3 号测点的位移速率高达 418 mm/d 以上,坡上出现 100 m 长的裂缝,位移-时间曲线角接近 90°,到现场考察的绝大多数专家和工程师都坚信即将发生滑坡,但至今 20 年了,该斜坡并未发生整体破坏^[2]。

从现有的文献资料来看,监测预警指标的确定大多是根据已有的工程监测实例分析总结得到的,而这种方法获得的监测预警指标值只能用于边坡结构、地质条件和所处环境条件非常类似同类工程的类比,因此,用该方法获得的监测预警指标仍表现出其不充分性。由于地质和结构特征的不同造成的边坡变形破坏机制存在差异,以及同一边坡在不同施工开挖阶段的变形规律和量值也存在差别,采用工程类比方法获得的单一的静态的边坡监测预警指标无法表达某一边坡在施工开挖过程中动态的变形规律和特征,为了确定边坡在开挖施工期监测较为合理的监测预警指标,很有必要对地质和结构特征不同的边坡在不同施工阶段动态监测预警指标的

确定方法进行研究。随着岩土工程专业数值计算软件的广泛应用,结合边坡现场监测,将数值模拟方法应用于监测预警指标值的确定成为可能。本文针对所研究的某一特定开挖边坡对象,考虑该边坡的地质条件特征和边坡结构特征,对边坡在施工开挖过程中的变形破坏过程进行动态数值模拟,求得边坡在每个开挖步不同安全状态下对应的变形速率、位移加速度、位移矢量角等监测预警指标值,为边坡在施工期的警戒等级进行动态定位,以便于及时采取措施来防止或减轻边坡开挖引起的破坏所带来的灾害损失。

2 边坡设计安全系数

目前判断边坡安全状态的指标主要有监测点位移大小、位移速率、位移矢量角和安全系数。其中,监测点位移大小、位移速率和位移矢量角可以通过变形监测获取,但判断边坡安全与否的阈值是很难直接获得的;边坡的安全系数是判断边坡安全与否的有效指标,它可以通过极限平衡法、强度折减法等方法获得,而且它是目前工程设计安全标准的主要指标,在边坡工程中被广泛应用和认可。如果能将边坡安全系数与边坡变形监测位移大小、位移速率和位移矢量角的关系建立,就可以依据边坡开挖工况下所要求的正常使用安全系数的下界——设计安全系数 F_{sd} 和极限平衡状态的安全系数 ($F_s = 1.00$) 所对应的监测位移大小、位移速率和位移矢量角对边坡的安全状态进行判别,进而从边坡变形监测角度对边坡开挖过程进行监测预警。

对于某一具体水电工程边坡而言,按其所属枢纽工程等级、建筑物级别、边坡所处位置、边坡重要性和失事后的危害程度,可以划分其所属的边坡类别和安全级别,具体依据见表 1。根据某一具体边坡所属的类别和安全级别,结合边坡所处的工况,可以确定工程边坡所应达到的设计安全系数,具体依据见表 2。

表 1 水电水利边坡工程类别和级别^[3]
Table 1 Types and classes of slopes of hydropower engineering

级别	A 类 枢纽工程区边坡	B 类 水库边坡
I	影响 1 级水工建筑物安全的边坡	滑坡产生危害性涌浪或滑坡灾害可能危及 1 级建筑物安全的边坡
II	影响 2 级、3 级水工建筑物安全的边坡	可能发生滑坡并危及 2 级、3 级建筑物安全的边坡
III	影响 4 级、5 级水工建筑物安全的边坡	要求整体稳定而允许部分失稳或缓慢滑落的边坡

表2 水电水利工程边坡设计安全系数^[3]
Table 2 Designed safety factor of slopes of hydropower engineering

级别	A 类			B 类		
	枢纽工程区边坡			水库边坡		
	持久状况	短暂状况	偶然状况	持久状况	短暂状况	偶然状况
I	1.30~1.25	1.20~1.15	1.10~1.05	1.25~1.15	1.15~1.05	1.05
II	1.25~1.15	1.15~1.05	1.05	1.15~1.05	1.10~1.05	1.05~1.00
III	1.15~1.05	1.10~1.05	1.00	1.10~1.00	1.05~1.00	≤1.00

3 考虑开挖卸荷效应的安全系数计算方法

边坡在施工开挖过程中的几何形态是不断变化的,如果采用传统的极限平衡方法进行每个开挖步所对应的安全系数的计算,就不能够反映边坡开挖引起的卸荷作用对边坡安全系数的影响。鉴于此,进行边坡开挖后的安全系数计算本必须选用考虑开挖卸荷效应的安全系数计算方法,而目前被广泛用于边坡的考虑开挖卸荷效应的安全系数计算方法——强度折减法能够考虑这种影响,并且能够寻找出边坡在开挖过程中最可能的滑动面或崩塌底界,为边坡整体破坏模式的判断提供依据。

通过不断降低边坡岩土体强度的方法来使边坡达到极限破坏状态,从而得到边坡的破坏滑动面及相应的安全系数,这就是边坡稳定极限分析的强度折减法^[4]。Duncan^[5]认为,边坡安全系数可以定义为边坡刚好达到临界破坏状态时,对土的剪切强度进行折减的程度。将边坡岩土体抗剪强度参数(凝聚力和内摩擦角)按式(1)逐渐降低,直到其达到极限破坏状态为止,此时数值计算程序可以自动根据其弹塑性数值计算结果得到边坡的破坏滑动面,同时得到边坡极限状态下的安全系数 F_s ^[4,6]。

$$c' = c / \omega, \quad \tan \phi' = \tan \phi / \omega \quad (1)$$

式中: c 和 ϕ 为岩土体的凝聚力和内摩擦角, c' 和 ϕ' 为折减后的岩土体的凝聚力和内摩擦角; ω 为每次计算的折减系数,临界状态的折减系数 ω_{sr} 为边坡的安全系数 F_s 。

4 开挖边坡岩体物理力学参数与边坡安全系数 F_s 关系的确定

由于岩质高边坡开挖支护施工过程是复杂的多空间难度自增殖系统^[7],这种难度自增殖系统在开挖深度的增加和开挖尺寸的增大等各种情况下将表现得更为复杂,开挖引起的岩体的物理力学参数(凝聚力 c 、内摩擦角 ϕ 、重度 γ 等)的变化与边

坡安全系数 F_s 之间的变化关系很难用显式数学表达式来描述。为了能够很好地表达边坡岩体的物理力学参数的变化与边坡安全系数之间的非线性关系,本文采用在处理小样本和处理多输入与单输出映射关系方面存在优势的支持向量机模型 SVM (Support Vector Machine)^[8]来描述边坡岩体物理力学参数与边坡安全系数之间的非线性映射关系,以代替大规模的数值计算。采用具有算法简单、实现容易同时又有深刻的智能背景、收敛速度快、需要调整参数少、全局寻优能力强等优点的粒子群优化算法 PSO (Particle Swarm Optimization)^[9]搜索全局最优的支持向量参数,减少人为选择的盲目性,提高支持向量机的推广预测能力,即本文将基于粒子群优化算法的支持向量机方法(简称 PSO-SVM 方法)用于岩体的物理力学参数的变化与边坡安全系数之间的复杂非线性变化关系的确定。

边坡岩体的凝聚力 c 、内摩擦角 ϕ 、重度 γ 等物理力学参数的变化与边坡整体安全系数之间的非线性映射关系用支持向量机 SVM (X) 来描述:

$$\text{SVM}(X): R^n \rightarrow R^m \quad (2)$$

$$Y = \text{SVM}(X) \quad (3)$$

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n), Y = (y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (4)$$

式中: $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 SVM 的输入信息,即岩质边坡开挖与支护方案对应的不同的物理力学参数组合。 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ 为 SVM 的输出信息,这里只有单输出,即开挖岩质边坡的安全系数 F_s 。SVM 模型表达的映射关系见图1。

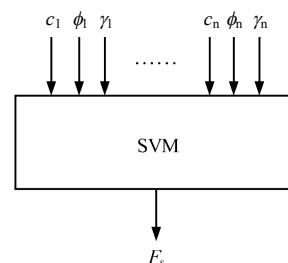


图1 n 输入1输出的 SVM 模型

Fig.1 SVM model with n input and 1 output

采用 SVM 作为求解器替代大规模数值计算能够大大地缩短计算分析的时间,但与此同时,为了保证计算分析结果的精度,重要的是需要保证 SVM 很好地推广预测能力。支持向量机的参数(核参数和惩罚因子 C)对算法的效率和推广预测能力有很

大的影响。支持向量机在实际应用中,关于参数选择的问题仍然没有得到很好地解决。鉴于支持向量机参数选择的问题目前没有得到很好地解决,本文采用基于粒子群优化算法的支持向量机方法(简称 PSO-SVM 方法),即采用粒子群算法搜索全局最优的支持向量参数,减少人为选择的盲目性,提高支持向量机的推广预测能力^[10-12]。

5 开挖边坡监测预警指标研究思路

为了克服采用工程类比方法获得的单一的静态的边坡变形监测预警指标是无法表达某一边坡在施工开挖过程中动态的变形规律和特征的不足,本文提出了基于设计安全系数和破坏模式的边坡开挖过程动态变形监测预方法,该方法的技术思路见图 2,其实现步骤简述如下:

(1) 根据开挖边坡所属水电枢纽工程等级、建筑物级别、边坡所处位置、边坡重要性和失事后的危害程度确定该边坡的类别和级别,根据该类别和级别,确定该边坡所处开挖施工工况(短暂工况)的设计安全系数 F_{sd} ,并根据设计安全系数和极限平衡状态下的安全系数 1.00,确定边坡开挖监测预警安全系数范围为: $(1.00, F_{sd})$ 。

(2) 根据开挖边坡的地质特征与分区、反演获得的边坡岩体初始地应力场、设计的边坡开挖分区及通过现场测试、室内试验等手段综合获得的边坡岩体物理力学参数;采用智能位移反分析方法,通过试验洞实测位移反演获得岩体变形模量;建立考虑开挖卸荷效应的数值计算模型。

(3) 根据考虑开挖卸荷效应的边坡安全系数计算方法和 PSO-SVM 方法相结合的综合分析方法,确定某一开挖步施工过程中安全系数值 F_s 与边坡岩土体物理力学参数之间的复杂高度非线性映射关系。

(4) 利用所确定的安全系数与边坡岩土体物理力学参数之间的映射关系,获得一系列岩体物理力学参数组合对应的安全系数;根据所获得的一系列安全系数对应的岩体物理力学参数进行边坡开挖过程的数值模拟计算,获得这些安全系数对应监测点的计算变形量大小、变形速率和位移矢量角等变形值,进而建立边坡安全系数与变形的关系。

(5) 通过监测点的计算变形量大小、变形速率和位移矢量角等变形量对安全系数的变化敏感性分析;同时,根据边坡的地质特征对边坡在开挖过程中的可能变形破坏模式(滑移破坏或崩塌倾倒破坏)进行分析,采用考虑开挖卸荷效应的安全系数计算方法(基于有限单元法、有限差分法或离散单元法

的强度折减法)进行边坡潜在滑动面或崩塌底界进行搜索,综合确定水平位移、垂直位移、位移矢量角何者或几者作为监测预警指标;根据监测预警指标与安全系数的变化关系曲线,进行监测预警等级划分,并获得各监测预警指标的预警值。

(6) 判断该步开挖施工现场所揭露的地质特征与原地勘报告是否相符,如果不符,则应修正地质模型,返回步骤(2)修正数值计算模型,并重复步骤(3)~(5);如果该步开挖施工现场所揭露的地质特征与原地勘报告相符,则执行下一步操作。

(7) 根据该步开挖完的监测结果,对边坡的安全状态进行判别。

(8) 根据边坡在该步开挖完后的实际安全状态,对基于变形监测预警等级的边坡稳定性判别是否正确进行判断,若不正确,则返回步骤(1)对原边坡的初始应力场、原始物理力学参数等的正确性进行反馈,修正边坡的初始地应力场和原始物理力学参数,并重复步骤(2)~(7);若基于变形监测预警等级的边坡稳定性判别与边坡在该步开挖后的实际安全状态相符,则执行下一步操作。

(9) 对边坡开挖是否结束进行判断,若未结束,则采用智能位移反分析方法获得边坡在该步开挖后的变形模量,重复执行(3)~(8);若开挖结束,则边坡施工开挖阶段的整体变形监测预警工作结束。

6 实例研究

糯扎渡水电站为澜沧江中下游河段两库 8 级水电的第 5 级。枢纽区的主要建筑物包括:拦河大坝、左岸地下厂房、左岸开敞式溢洪道、左右岸两条泄洪隧洞以及 5 条导流隧洞。坝址区河道顺直,河谷呈“V”字型,两岸冲沟发育,坝址岩性主要为中细粒花岗岩,并具有花岗斑岩、角砾岩、砂岩和泥岩等多种岩性分布的特点。溢洪道消力塘部位主要位于地质条件较好的 F_1 断层影响带下游部位的花岗岩体分布区,仅左侧开挖边坡上部位于工程地质条件一般的左岸 T_{2m}^1 沉积岩的分布区。溢洪道消力塘平面呈梯形,长为 401.5 m,底部长约 310 m,底宽为 151.5~178.622 m,底板高程为 575 m,出口坎顶高程为 608 m^[13]。该地段地形总体为倾向澜沧江河谷的山坡,左侧开挖边坡规模较右侧大。左侧边坡与挑流鼻坎段及下游冲刷区的边坡构成一整体边坡,边坡开挖规模大,最大开挖坡高达 235 m,边坡顺水流长度最大达 700 余米,开挖坡面走向为 $N14^\circ W$,倾向为 SW,溢洪道消力塘左侧 740 m 高程以上边坡平面布置图见图 3。

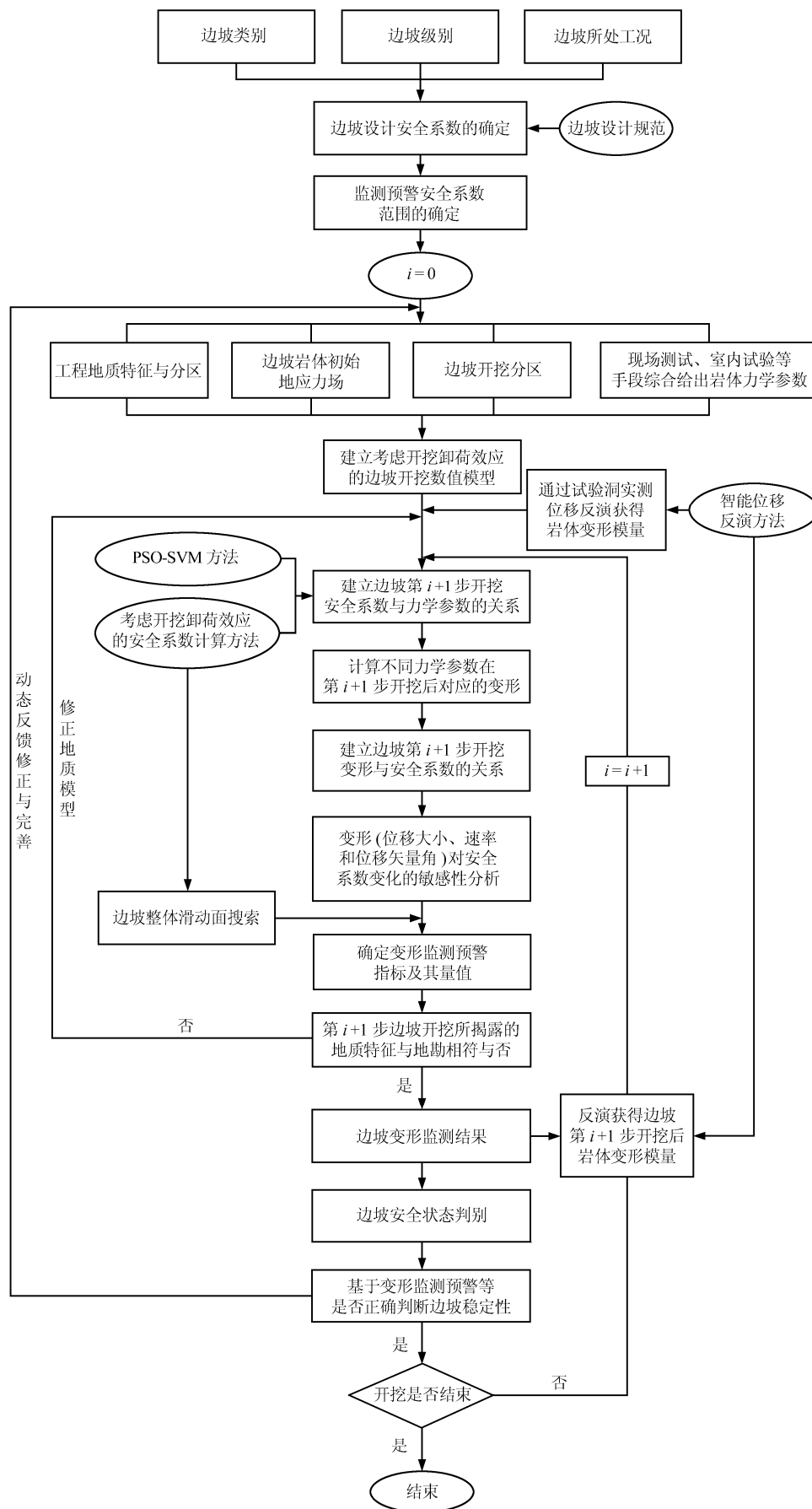


图2 开挖边坡变形监测预警方法研究技术路线图

Fig.2 Sketch of study route of early warning method of slope monitoring during excavation

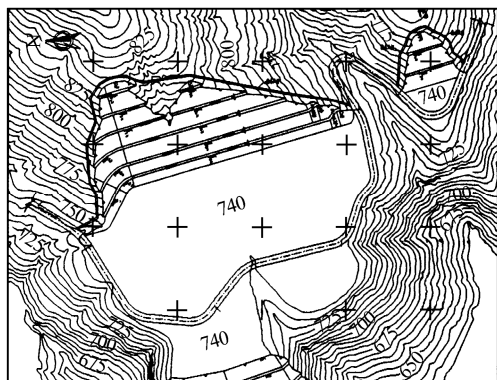


图3 溢洪道消力塘左侧 740 m 高程以上边坡平面布置图
Fig.3 Plane sketch of left bank slope above 740 m of plunge pool of spillway

采用本文确定的开挖边坡监测预警指标研究思路与方法对溢洪道消力塘左侧边坡在 755~740 m 高程开挖过程中的监测预警指标进行确定,以验证上述思路和方法的可行性。选取溢洪道消力塘左侧边坡开挖平面图的 2-2 剖面进行分析(具体位置见图 3),该剖面 740 m 高程以上边坡开挖过程中有测值的监测设施布置图见图 4。

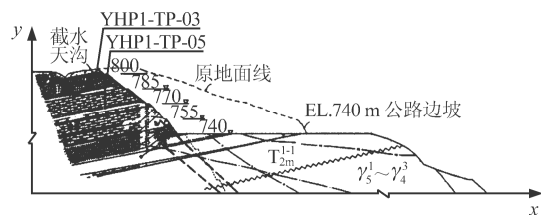


图4 溢洪道消力塘左侧边坡 2-2 剖面 740 m 高程以上监测设施布置图

Fig.4 Layout of monitoring devices of 2-2 longitudinal profile of left bank slope above 740 m of plunge pool of spillway

6.1 监测预警安全系数范围的确定

溢洪道消力塘边坡位于枢纽区且该边坡的失稳将直接影响 1 级水工建筑物溢洪道的安全,根据表 1 可以确定溢洪道消力塘边坡属 A 类 I 级边坡。根据溢洪道消力塘边坡的类别和级别,溢洪道消力塘边坡在施工过程中的设计安全系数为 A 类 I 级坡在短暂工况对应的安全系数,结合表 2 可以确定溢洪道消力塘边坡在施工过程中的设计安全系数范围为 1.20~1.15,则安全系数在 1.00~1.15 之间为该边坡在开挖过程中的监测预警安全系数范围。

6.2 安全系数与各岩层岩体凝聚力关系的确定

边坡某一状态对应的安全系数 F_s 主要受岩体的凝聚力 c 、内摩擦角 φ 和重度 γ 的影响,那么 F_s 可以表示为岩体的 c 、 φ 和重度 γ 的函数,具体地可以表示为

$$F_s = f(c_1, \varphi_1, \gamma_1, c_2, \varphi_2, \gamma_2, c_3, \varphi_3, \gamma_3, \dots, c_n, \varphi_n, \gamma_n) \quad (5)$$

式中: $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ 分别为材料编号为 1, 2, 3, $\dots$, n 的岩体凝聚力; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n$ 分别为材料编号为 1, 2, 3, $\dots$, n 的岩体内摩擦角; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n$ 分别为材料编号 1, 2, 3, $\dots$, n 的岩体重度。

由于岩体的重度 γ 在边坡施工过程中和后续的运行中变化很小,可以认为岩体重度为常数,并且该常数根据地质勘察报告给的建议值取值。鉴于此,对于某一具体边坡而言,边坡安全系数的变化可以归结为由受凝聚力和内摩擦角的变化引起,式 (5) 可以改写为

$$F_s = f(c_1, \varphi_1, c_2, \varphi_2, c_3, \varphi_3, \dots, c_n, \varphi_n) \quad (6)$$

岩质边坡在开挖过程中主要引起边坡岩体的拉剪破坏,具体而言就是由于边坡的开挖卸荷作用使得边坡岩体的裂隙由于张拉作用而扩展,并沿着结构面出现剪切破坏。进行边坡在开挖过程中的监测预警指标研究,主要研究边坡在发生失稳前的变形破坏阶段的监测量的变化特征,在该阶段边坡岩体强度参数变化主要表现为由于开挖引起岩体张拉作用而使岩体的凝聚力值的降低,而其内摩擦角几乎不发生变化。孙钧^[14]描述的 Patton 通过石膏的抗剪断的剪切试验,说明了峰值强度的摩擦角和残余强度的摩擦角大致相等,从一个侧面佐证了岩石在破坏前后其摩擦角几乎保持不变,并且建议岩石的内摩擦角值不因塑性应变的软化而变化,其屈服强度的降低取决于凝聚力值塑性应变增大而减小的程度。鉴于上述分析,笔者认为,岩质边坡的开挖主要引起岩体的凝聚力值的降低,因而式 (6) 可以改写成下式:

$$F_s = f(c_1, c_2, c_3, \dots, c_n) \quad (7)$$

为了确定溢洪道消力塘边坡施工开挖过程安全系数与边坡各岩层岩体对应的岩体凝聚力的复杂非线性关系,可以采用大幅度降低试验工作量,又能全面控制所有可能出现的试验组合的均匀设计方法^[13]设计边坡各岩层岩体不同凝聚力的组合,根据所设计的组合采用基于 FLAC 方法的强度折减法分别计算每组组合所对应的安全系数,根据计算所获得的样本,采用基于粒子群优化算法的支持向量机方法确定边坡各岩层岩体凝聚力边坡安全系数 F_s 之间的高度复杂非线性映射关系。

(1) 计算样本构造

根据溢洪道消力塘左侧边坡 755~740 m 高程开挖过程中所涉及的岩层为三叠系中统忙怀组下段

(T_{2m}^1) 砂泥岩全风化层、强风化层、弱风化上层、弱风化下层和微新岩体, 且结合开挖扰动区范围确定的结果, 可知华力西晚期~印支期花岗岩体($\gamma_4^3 \sim \gamma_5^1$) 的各风化层岩体未受该步开挖的扰动, 为此在确定溢洪道消力塘边坡 755~740 m 开挖过程中各岩体凝聚力与对应的安全系数的关系时, 仅考虑开挖所涉及的岩体为三叠系中统忙怀组下段(T_{2m}^1) 砂泥岩全风化层、强风化层、弱风化上层、弱风化下层和微新岩层岩体凝聚力的变化对边坡安全系数 F_s 的影响。对 755~740 m 开挖所涉及的岩体为 T_{2m}^1 砂泥岩全风化层、强风化层、弱风化上层、弱风化下层和微新岩体凝聚力值与安全系数进行敏感性分析, 确定溢洪道消力塘边坡 755~740 m 开挖过程中 T_{2m}^1 砂泥岩各风化层岩体用于监测预警指标确定的凝聚力值的取值范围, 具体见表 3。其他的物理力学参数取值参照文献[13]进行取值。

表 3 开挖扰动区岩体凝聚力 c 取值范围
Table 3 Range of rock mass cohesion values of excavating disturbed zone

(kPa)				
全风化	强风化	弱风化上层	弱风化下层	微新岩体
2~25	25~50	50~100	100~350	350~550

对开挖扰动区岩体的凝聚力分别取 6 个水平, 依据均匀设计原理^[15], T_{2m}^1 砂泥岩各风化层类岩体凝聚力 5 个参数的 35 种组合, 采用基于 FLAC 方法的强度折减法分别计算每组组合所对应的安全系数, 计算结果见表 4 (篇幅所限, 本文只列出部分试验组合), 以前 30 个作为训练样本, 后 5 个为测试样本。

表 4 均匀设计样本试验组合方案及其计算结果
Table 4 Sample tests by uniform designs and calculation results

方案	c / kPa					安全系数
	全风化	强风化	弱风化上层	弱风化下层	微新岩体	
1	14	25	80	350	500	0.98
2	8	50	60	280	350	1.34
3	14	25	60	220	400	0.97
...	...	...	...	...	...	...
33	25	42	50	280	500	1.36
34	14	37	70	220	450	1.32
35	8	250	50	160	550	1.36

(2) 边坡岩体凝聚力与安全系数之间复杂非线性关系的确定

以溢洪道消力塘边坡 T_{2m}^1 砂泥岩全风化层、强风化层、弱风化上层、弱风化下层和微新岩体的凝

聚力 c 作为输入信息, 以 755~740 m 开挖过程边坡的安全系数为 SVM 的输出信息, 利用训练样本 (表 4 中前 30 个样本) 对 SVM 进行训练, 然后对测试样本 (表 4 中最后 5 个样本) 进行预测, 以最小预测误差作为适应值, 用 PSO 搜索 SVM 的最优参数, 这样就建立各岩层凝聚力与 755~740 m 开挖过程的安全系数之间的映射关系。边坡开挖过程各层岩体凝聚力与安全系数之间复杂非线性关系确定步骤如下:

① 进行 PSO 算法的参数初始化设定 (一个粒子代表一组核参数和罚参数的值): $c_1 = c_2 = 2.0$, 粒子最大飞行速度 $V_{\max} = 1$, 粒子种群数 $i = 10$, 最大迭代步 $t_{\max} = 100$, SVM 参数的搜索区间为 $c = 0 \sim 1000$, $\sigma^2 = 0.01 \sim 10$; 确定支持向量机参数的全局搜索空间;

② 随机产生一组粒子群 (一组核参数和罚参数的值);

③ 利用 SVM 预测每个粒子个体的适应值 (综合指标);

④ 对进化历史上所有粒子的适应值进行比较, 得到当前进化历史上的最优粒子 (当前核参数和罚参数);

⑤ 若最优粒子适应值或迭代步数不满足收敛条件要求, 对粒子群进行 PSO 进化操作, 产生下一代粒子群 (一组新的核参数和罚参数的值), 返回步骤③, 否则, 停止计算。

经过 100 步的迭代计算, 搜索到最优的支持向量机参数为: $c = 925.18$, $\sigma^2 = 2.282 \ 3$, 最小适应值为 0.002 9。

6.3 边坡破坏模式分析及监测预警指标的确定

采用基于 FLAC 方法的强度折减法对溢洪道消力塘边坡在 755~740 m 开挖过程中的失稳破坏模式进行分析, 认为该边坡在 755~740 m 开挖过程中主要表现为 740 m 以上边坡呈圆弧和折线的复合滑移变形破坏 (见图 5), 且其失稳变形主要表现为水平位移的增大, 为此将水平位移增量指标作为监测预警指标。

6.4 边坡预警指标量与边坡安全系数之间的敏感性分析

根据表 3 确定的溢洪道消力塘左侧边坡 755~740 m 开挖所涉及的 T_{2m}^1 砂泥岩全风化层、强风化层、弱风化上层、弱风化下层和微新岩体凝聚力值取值范围, 按照每种岩体同步长等比例下降原则, 对开挖扰动各岩层岩体的凝聚力按表 5 的方案进行组合, 并利用 PSO-SVM 方法计算各组合对应的安

全系数, 计算结果见表 5。利用溢洪道消力塘开挖边坡监测预警安全系数的范围 1.15~1.00, 选取表 5 中方案 5~方案 16 中各岩层岩体的凝聚力作为计算参数, 采用 FLAC 方法分别计算溢洪道消力塘边坡由于 755~740 m 高程开挖引起的位移变化量, 并通过多项式拟合的方法整理出该步施工开挖引起的各测点(测点如图 4 所示)水平向位移的增量与安全系数的敏感关系曲线(见图 6 和图 7)。

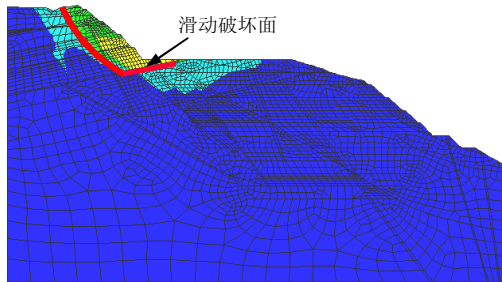


图 5 溢洪道消力塘左侧边坡 2-2 剖面 755~740 m 高程开挖破坏模式图

Fig.5 Sketch of failure mode of 2-2 longitudinal profile of left bank slope of plunge pool of spillway during excavation from 755 m to 740 m

表 5 岩体凝聚力 c 的组合及其安全系数计算结果

Table 5 Assembly of rock mass cohesion c and calculation results of safety factor

方案	c / kPa					安全系数
	全风化	强风化	弱风化上层	弱风化下层	微新岩体	
1	2	25	50	100	350	0.979
2	2.92	26	52	110	358	0.985
3	3.84	27	54	120	366	0.992
4	4.76	28	56	130	374	0.998
5	5.68	29	58	140	382	1.001
6	6.6	30	60	150	390	1.003
7	7.52	31	62	160	398	1.005
8	8.44	32	64	170	406	1.016
9	9.36	33	66	180	414	1.022
10	10.28	34	68	190	422	1.034
11	11.2	35	70	200	430	1.045
12	12.12	36	72	210	438	1.087
13	13.04	37	74	220	446	1.104
14	13.96	38	76	230	454	1.127
15	14.88	39	78	240	462	1.149
16	15.8	40	80	250	470	1.186
17	16.72	41	82	260	478	1.229
18	17.64	42	84	270	486	1.256
19	18.56	43	86	280	494	1.312
20	19.48	44	88	290	502	1.343
21	20.4	45	90	300	510	1.351
22	21.32	46	92	310	518	1.372
23	22.24	47	94	320	526	1.386
24	23.16	48	96	330	534	1.396
25	24.08	49	98	340	542	1.423
26	25	50	100	350	550	1.449

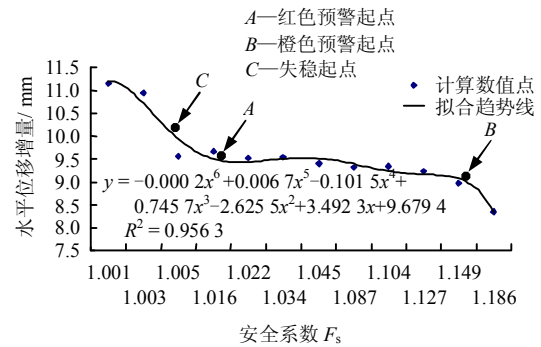


图 6 测点 YHP1-TP-03 水平位移增量与安全系数变化关系

Fig.6 Horizontal displacement increment vs. safety factor curve of monitoring point YHP1-TP-03

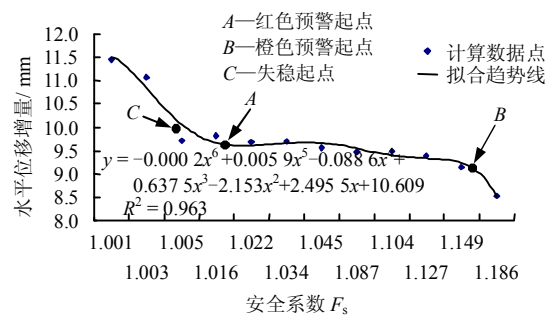


图 7 测点 YHP1-TP-05 水平位移增量与安全系数变化关系

Fig.7 Horizontal displacement increment vs. safety factor curve of monitoring point YHP1-TP-05

6.5 变形监测预警指标建议值的确定

采用高等数学方法求得各测点在高程 755~740 m 开挖过程中水平位移增量与安全系数变化的敏感关系曲线上斜率变化较大的关键点, 并根据曲线的趋势确定影响各曲线变化趋势最大的那个关键点对应的水平位移增量值(见图 6 和图 7 点 A), 确定安全系数 1.15 对应的另一个数值点(见图 6 和图 7 点 B), 确定位于 A 点之后水平位移增量随安全系数减小变化率逐渐增大至稳定的数值点(见图 6 和图 7 点 C), 各点对应的水平位移增量值见表 6。根据表 6 确定界限安全系数 1.150 对应的各测点的水平位移增量值为橙色预警指标值(橙色预警起点 B), 界限安全系数 1.017 所对应的各测点的水平位移增量值为红色预警指标值(红色预警起点和橙色预警终点 A), 界限安全系数 1.005 所对应的各测点的水平位移增量值为边坡不稳定的指标值(红色预警终点 C)。根据所确定的橙色预警指标值及红色预警指标值, 以溢洪道消力塘边坡在 755~740 m 开挖过程中水平位移增量为监测预警指标的边坡警戒等级划分建议见表 7。

表6 界限安全系数及其对应的测点水平位移增量
Table 6 Boundary safety factor and corresponding horizontal displacement increment of monitoring points

测点号	水平位移增量/mm			界限安全系数		
	A	B	C	A	B	C
YHP1-TP-03	9.6	8.9	10.2	1.017	1.150	1.005
YHP1-TP-05	9.8	9.1	10.4	1.017	1.150	1.005

表7 警戒等级划分建议
Table 7 Suggestion of dividing warning grades

测点号	水平位移/mm			
YHP1-TP-03	<8.9	8.9~9.6	9.6~10.2	>10.2
YHP1-TP-05	<9.1	9.1~9.8	9.8~10.2	>10.2
警戒等级划分	安全	橙色预警	红色预警	不安全

6.6 溢洪道消力塘左侧边坡 755~740 m 开挖过程监测安全状态判别

溢洪道消力塘左侧边坡 755~740 m 开挖后岩层揭露信息与原地质勘察报告一致,因此,可以采用上文确定的变形监测预警指标值作为该步开挖边坡整体变形安全状态的判别。比较溢洪道消力塘左侧边坡 755~740 m 开挖过程中测点 YHP1-TP-03 和 YHP1-TP-05 的水平位移增量监测值与监测预警值(见表8),可以看出,溢洪道消力塘边坡在 755~740 m 开挖过程中测点的水平位移增量均小于预警值,说明在目前的计算条件下,边坡在 755~740 m 开挖过程中处于稳定状态,应用基于 FLAC 方法的强度折减法计算得到该边坡在 755~740 m 开挖过程中的安全系数系数为 1.87,这也说明该边坡在 755~740 m 开挖过程中是稳定的,实际工程在 755~740 m 开挖施工过程中边坡也处于稳定状态(见图8),这与工程实际是相符的。

表8 测点监测值与预警值对比
Table 8 Comparison between monitoring horizontal displacement value and early warning index value

测点号	水平位移增量	预警值范围
	/mm	/mm
YHP1-TP-03	2.1	8.9~10.2
YHP1-TP-05	1.5	9.1~10.2

7 结 论

针对采用工程类比方法获得的单一的静态的边坡监测预警指标无法表达某一边坡在施工开挖过程中动态的变形规律和特征的问题,提出了基于设计安全系数和破坏模式的边坡开挖过程动态监测预



图8 溢洪道消力塘左侧边坡 755~740 m 高程开挖完成后实景图

Fig.8 Picture of left bank slope of plunge pool of spillway after excavation from 755 m to 740 m

警指标的研究思路和方法,并将该思路和方法应用于糯扎渡水电站溢洪道消力塘边坡 755~740 m 开挖监测预警指标的确定,通过与现场监测结果对比分析表明,该边坡在 755~740 m 开挖过程中是稳定的,这与工程实际是相符的。该实例的研究结果表明,基于设计安全系数和破坏模式的边坡开挖过程动态监测预警指标的研究思路和方法用于边坡在开挖过程中动态监测预警是可行和有效的。

参 考 文 献

- [1] 李秀珍, 许强, 黄润秋. 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.
- [2] 凌荣华, 陈月娥. 塑性应变与塑性应变率意义下的滑坡判据研究[J]. 工程地质学报, 1997, 5(4): 346—350.
LING Rong-hua, CHEN Yue-e. Slope sliding criteria considering plastic strain and plastic strain rate[J]. Journal of Engineering Geology, 1997, 5(4): 346—350.
- [3] 中华人民共和国电力行业标准. DL/T 5353—2006 水电水利工程边坡设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [4] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡和岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381—3388.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. Chinese

- Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3381—3388.
- [5] DUNCAN J M. State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, 1996, 122(7): 577—596.
- [6] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(3): 387—403.
- [7] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [8] VAPNIC V N. The Nature of Statistical Learning Theory [M]. New York: Springer-Verlag, 1995.
- [9] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995: 1942—1948.
- [10] 苏国韶. 高地应力下大型地下洞室群稳定性分析与智能优化研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
- [11] 姜诤男. 基于 PSO-SVM 非线性时序模型的隧洞围岩变形预报[J]. 岩土力学, 2007, 28 (6): 1176—1180.
- JIANG An-nan. Forecasting nonlinear time series of surrounding rock deformations of underground cavern based on PSO-SVM[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28 (6): 1176—1180.
- [12] 姜诤男. 基于智能反分析的水布垭电站地下厂房机窝施工方案优化[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1372—1376.
- JIANG An-nan. Optimizing generator socket construction scheme of Shuibuya Underground Powerhouse based on intelligent back analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1372—1376.
- [13] 黄润秋, 许模, 王文远, 等. 澜沧江糯扎渡水电站枢纽区高边坡工程地质特性及其稳定性研究(第一阶段研究报告)[R]. 成都: 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 2007.
- [14] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [15] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

上接第 602 页

- [4] 潘岳, 张勇, 王志强. 煤岩突出中单个煤壳突出前兆阶段的能量分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1500—1506.
- PAN Yue, ZHANG Yong, WANG Zhi-qiang. Energy analysis for premonitory phase of outburst of a single coal shell in coal-rock outburst[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(6): 1500—1506.
- [5] 贾乃文. 粘塑性力学及工程应用[M]. 北京: 地震出版社, 2000: 51—52.
- [6] VARDOULAKIS I. A gradient flow theory of plasticity for granular materials[J]. **Acta Mechanica**, 1991, 87: 197—217.
- [7] 凌复华. 突变理论—历史、现状和展望[J]. 力学进展, 1984, 14(4): 389—403.
- LING Fu-hua. History, present and advances of the catastrophe theory[J]. **Advances in Mechanics**, 1984, 14(4): 389—403.
- [8] JEGER J C, COOK G W. Fundamentals of rock mechanics[M]. London: Chapman and Hall Press, 1979: 466—470.
- [9] 程五一, 刘晓会, 王魁军. 煤与瓦斯突出冲击波阵面的传播规律的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 57—60.
- CHENG Wu-yi, LIU Xiao-yu, WANG Kui-jun. Study on regulation about shock-wave-front propagating for coal and gas outburst[J]. **Journal of China Coal Society**, 2004, 29(1): 57—60.