

岩质高边坡稳定分析方法与软件系统

陈 祖 煜

(中国水利水电科学研究院, 北京, 100044)

关键词 高边坡 稳定分析 软件系统 岩质边坡 数据库 “八五”科技攻关专题

摘 要 我国水电建设面临一系列高边坡稳定问题, 通过在岩质边坡分类、滑坡机理、抗剪强度参数和稳定分析及软件系统等方面开展的全面分析研究, 并结合具体的已建工程地质稳定分析, 初步建立了水利水电边坡工程的分类体系, 建成我国水电系统的滑坡和边坡数据库, 建成水电工程岩体抗剪强度参数数据库, 开发边坡稳定分析的方法和软件系统, 初步形成了适用于我国水利水电边坡稳定分析和优化设计理论系统和软件工程。

建国以来, 我国水电工程中多次发生滑坡, 并造成了重大的经济损失和人身伤亡。在“九五”和更长一段时期, 我国的水电建设将继续面临一系列高边坡稳定问题。在现代岩土工程和科学技术的新成就的支持下, 建立一个适合我国水电建设实际的岩质边坡稳定分析的系统工程, 是摆在水利水电工程技术人员面前的任务。

1 高边坡的失稳机理和分析方法研究

1.1 结构分类

岩体结构是决定岩质边坡的稳定性和可能失稳模式最直接和最重要的因素。谷德振曾将岩体分为块状、层状、碎裂和散体 4 大类。由于岩体结构面和边坡开挖面的产状相互关系直接影响边坡的稳定性, 本次攻关在对水利水电工程中遇到的大量边坡工程实例的调查分析的基础上, 提出了如表 1 所示的边坡岩体结构分类体系。

对层状同向结构边坡的失稳机理研究报告指出, 层状结构岩体边坡可分为两大结构类型: 一是以沉积岩为代表的, 主要为与原生建造有关的原生层状结构; 一是以变质岩为代表的, 主要为与构造成因有关的板裂层状结构。层状岩体边坡按边坡走向与层面或板裂面走向关系可分为: 平行坡、斜切坡、横向坡和水平岩层的无定向坡。岩体中的原生结构面和断裂结构面控制着岩体的变形和稳定。

对层状反向结构边坡的失稳机理的报告提出, 岩层走向与边坡走向夹角小于 25° , 倾向与边坡倾向相反的层状结构岩质边坡为反倾向层状结构岩质边坡。通过对国内外 26 个较为典型的反倾向层状结构岩质边坡变形破坏实例资料的整理分析, 对其

边坡变形破坏特征获得以下认识:

(1) 倾角小于 30° 的层状结构岩体构成的缓倾岩层反倾向边坡, 在自重作用下岩层向临空面产生的弯矩小, 这类反倾向边坡一般没有弯曲变形发生。

(2) 岩层倾角大于 30° 的反倾向层状结构岩质边坡, 弯曲倾倒变形是这类边坡变形破坏的主要型式。

块状结构岩体主要由以下各岩组岩石构成: 沉积碳酸盐岩组的巨厚层、厚层至中厚层状的石灰岩、白云岩及其过渡岩类等; 沉积砂砾岩组的巨厚层、厚层至中厚层状的砂岩、砾岩及其过渡岩类; 岩浆侵入岩组的花岗岩、闪长岩及辉绿岩等; 火山岩组的流纹岩、鞍山岩及玄武岩等; 变质岩组的混合岩、片麻岩、大理岩及石英岩等深变质岩。块状结构岩体的主要特征为:

(1) 岩体主要由单一的或强度相近的硬岩 (湿抗压强度大于 60 MPa) 构成;

(2) 岩体不被区域性断裂 (I 级结构面) 所切割;

(3) 岩体可被长几百米至 1 km, 宽几十厘米至 2~3 m 的断层 (III 级结构面) 切割, 岩体中普遍发育的是长几十米至几百米, 宽几十厘米的小断层 (IV 级结构面) 和各类节理 (V 级结构面);

(4) 岩体完整性好, 主要节理组的节理间距一般 $\geq 30\text{ cm} \sim 50\text{ cm}$ 。根据岩体的完整程度可将块状结构岩体划分为整体状、块状和次块状。块状岩体通常构成较稳定的岩质边坡。各种岩体结构都可能形成碎裂或散体结构。岩体内存在各种的构造影响

收稿日期: 1998-01-26

表 1 边坡岩体结构分类

岩体结构类型	岩体种类	岩石类型	岩体特征	边坡稳定性特征
块状结构		岩浆岩、中深变质岩、厚层沉积岩	岩体呈块状或厚层状,结构面不发育,间距在 50 cm~ 100 cm 以上,多为刚性结构面,贯穿性软弱结构面少见 参照指标: $K_V = 1 \sim 0.4$ $R_{QD} > 50\%$	边坡稳定条件好,易形成高陡边坡,失稳形态多沿某一组结构面崩塌或沿结构面滑动。滑动稳定性受结构面抗剪强度与岩石抗剪断强度控制
层状结构	层状同向		边坡与层面向向,岩层倾向与边坡倾向基本相同,夹角小于 30° ,岩体多呈互层状,结构面发育,软弱夹层和层间错动带常为贯穿性软弱结构面 参照指标: $K_V = 0.3 \sim 0.7$ $R_{QD} > 25\% \sim 80\%$	层面或软弱夹层,形成滑动面,坡脚切断后易产生滑动,倾角较陡时易产生溃屈或倾倒,稳定性受岩层走向、夹角大小、坡角与岩层倾向组合关系顺坡向软弱结构面的发育程度及强度所控制
	层状反向	各种厚度的沉积岩、层状变质岩和复杂、多次喷发的火山岩	岩层倾向与边坡倾向基本相反其夹角应大于 150° ,岩体呈层状或二元结构,结构面发育 参照指标: $K_V = 0.3 \sim 0.7$ $R_{QD} > 25\% \sim 80\%$	岩层较陡时易产生倾覆弯曲松动变形,坡脚有软层时上部易拉裂,局部崩塌滑动,稳定性受坡角与岩层倾向组合、岩层厚度、层间结合能力及反倾结构面发育与否所决定
	层状斜交		层状岩石组成的边坡,岩层倾向与边坡倾向斜交,其夹角在 $30^\circ \sim 150^\circ$ 之间 参照指标: $K_V = 0.7 \sim 0.3$ $R_{QD} > 25\% \sim 80\%$	边坡稳定条件较好,不受层面及夹层控制
碎裂结构		各种岩石的构造影响带、破碎带、蚀变带或风华破碎岩体	岩体结构面发育,多短小无规则分布,岩块间存在咬合力 参照指标: $K_V = 0.3 \sim 0.7$ $R_{QD} < 25\%$	边坡稳定性较差,坡角取决于岩块间的镶嵌情况和岩块间的咬合力
散体结构		各种岩石的构造破碎带及其强烈影响带、强风化破碎带	由碎屑泥质物夹大小不规则的岩块组成,软弱结构面发育成网 参照指标: $K_V = 0.1$	边坡稳定性差,坡角取决于岩体的抗剪强度,滑动面呈圆弧状

带、破碎带、蚀变带或风化破碎岩体都是构成碎裂散体结构的主要特征。本次攻关在岩体分类时将岩体弹性波作为判断碎裂散体结构的主要指标。碎裂结构完整性系数小于 0.3,散体结构则小于 0.2

1.2 结合李家峡水电站左岸边坡的研究

李家峡水电站装机容量为 2 000 MW。该工程坝址区岩体由混合岩层面和 $F_{18} \sim F_{24}$ 等多条断层切割,完整性差,要在这样困难的地质条件下修建高 150 m~ 170 m 的左岸人工边坡,具有很大的风险。在研究中发现,在该条件下,平面滑动和非对称楔体滑动破坏都伴随有不同程度的平面旋转现象。当层状结构面横切滑体时,常常发生解体滑动,即滑体沿这种横切面拉裂解体。针对边坡破坏的这一机理,提出先固后挖的手段。同时合理确定边坡的支护数量和锚索参数,提出了各重要部位的边坡处理措施,使左岸边坡顺利开挖到设计高程,经过一年多的蓄水考验,证明左岩边坡的治理是成功的。

1.3 结合龙滩水电站左岸边坡的研究

龙滩水电站装机容量 5 400 MW,大坝左岸将建成一个高 310 m,宽 200 余米的人工开挖边坡。而这个大型边坡恰好是建在典型的层状反倾向地质区域。当山体开挖成如图 1 标“2”所示的剖面后,边坡的倾覆变形成为关注的课题。在攻关中,采用了离散元、有限元、极限平衡等方法分析左岸边坡

倾覆破坏的可能性,并且采用了基底摩擦试验和大型离心模型试验来验证各种数值分析方法的可行性。中国水利水电科学研究院 4 500 g/kN 的土工离心模型试验机成功地将重达 15 kN 的左岸山体模型加速到 150 g,达到了原型的比尺,成功地实现了边坡加载破坏的现象。离心模型试验揭示了边坡沿双折线滑裂面倾覆变形的机制,这在国内外文献中从未有记载。将试验成果和现有的理论分析对比,发现只有考虑了顺坡向节理对抗折强度的断裂削弱,数值方法才能获得比较符合实际的成果。根据这些综合试验分析,设计单位提出了边坡优化设计

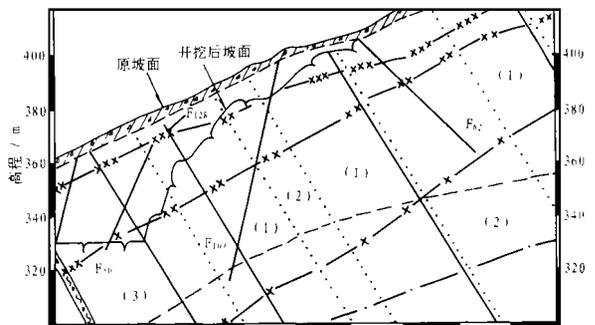


图 1 龙滩 7号机组工程地质剖面
(1) 泥板岩与砂岩、粉砂岩互层; (2) 砂岩粉砂岩层夹泥板岩; (3) 泥板岩夹粉砂岩

的方案,并最终被业主和世界银行特别咨询团采纳,为龙滩工程“G-9”方案的可行性提供了坚实的科学依据,这一方案可使电站提前1年发电,可创造156亿kW·h电量,经济效益显著。

2 边坡岩体的抗剪强度

2.1 经验方法

在确定边坡工程的岩体抗剪强度时,工程师的经验判断往往起重要作用。为此,应用现代科学技术发展的成果,提高工程师经验判断的能力,是当前解决岩体抗剪强度问题的一个方向。本次攻关在以往工作的基础上,开展了一项收集和建立岩体抗剪强度试验成果大型数据库的工作。该工作覆盖到全国各省水利水电勘测设计单位承担的大中型水利水电工程,并最终建成了一个包含117个工程1100组抗剪强度资料的岩体力学参数数据库。数据库的分类统计见表2。

表2 边坡岩体抗剪强度数据库

类型	代码	性态	组数
软弱夹层	A1	粘泥型	90
	A2	含泥屑型	60
	B	碎屑型	125
	C	碎石碎屑型	85
节理	II	硬岩平直结构面	60
	III	硬岩粗糙结构面	55
	IIII	软弱结构面	185
完整岩石	E1	坚硬、新鲜岩石	10
	E2	微风化坚硬岩石	28
	E3	新鲜软岩至弱风化岩	30
	E4	弱风化节理发育	25
	E5	强风化	12

2.2 理论分析方法

根据蒙特卡罗原理模拟节理岩体技术:由于岩体的节理分布服从一定的统计规律,可以应用计算机生成一个岩体的模拟节理网络,在这一网络上,可以进行诸如节理岩体连通率等一系列问题的研究。图2为三峡大坝3坝段地质剖面简图,坝基建

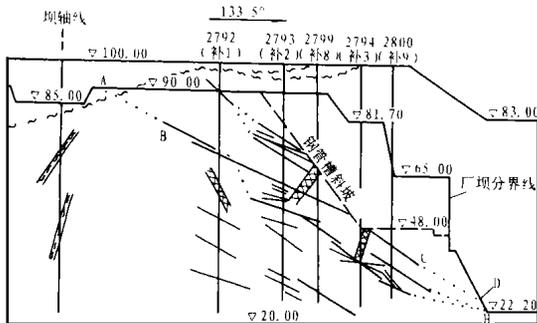


图2 三峡大坝3坝段地质剖面

基面高程为90m,开挖到高程22.20m。从钻孔资料中已确认闪长花岗岩体中存在第一组倾向下游的节理,其中一部分节理为长、大连续裂缝,如图2中粗线所示。通过计算机生成的裂隙网络,可以获得大坝在其重量和库水推力作用下,可能出现的转移路线,如图3中A, B, C, D所示。其中虚线为岩桥。根据岩桥和裂缝长度的比例,确定沿这一转移路线的连通率,并最终确定这一转移面上的抗剪强度指标。

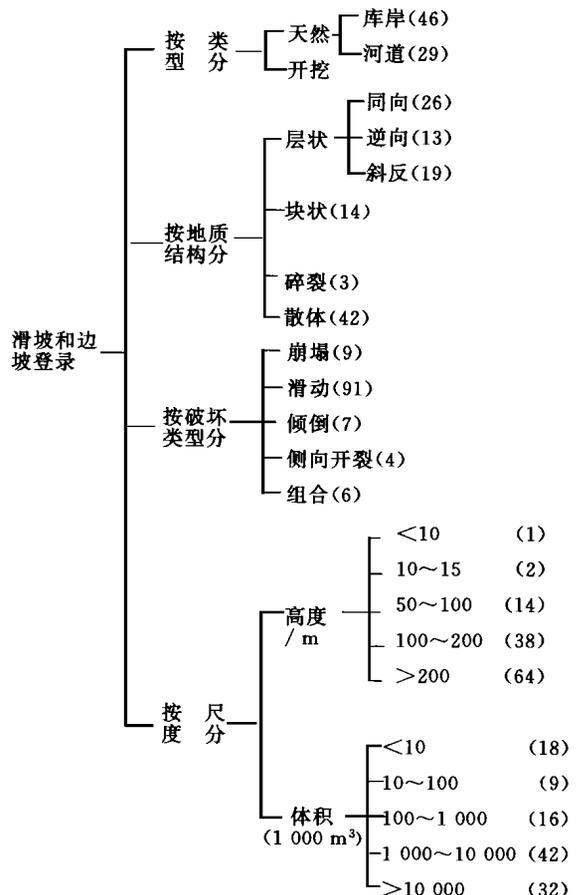
3 滑坡和边坡登录及数据库

登录按照统一的规定和表格有以下8个部分:

- ① 概述;
 - ② 地质;
 - ③ 岩土力学特性;
 - ④ 设计;
 - ⑤ 施工;
 - ⑥ 监控;
 - ⑦ 滑坡描述;
 - ⑧ 参考文献。
- 为便于计算机信息处理,对所有项目均进行了编号。如果需要进行文字描述,则要求提供关键词。经过5年的努力,边坡征集范围涉及到21个省,建成了117个边坡工程,总计1620页的水利水电工程文件和相应数据库,主要分类见表3。

在收集大量成功和失败的岩质边坡实例的基础上,建立了岩质边坡分类和质量评定的CSRMB

表3 滑坡和边坡登录成果分类



系。这个体系是在 SMR基础上进行的,并结合我国水电边坡工程实例,评价 SMR体系的可行性,对 SMR体系作了一些修正,主要是增加了坡高因素的修正;对结构面方位修正时视结构面的性质不同(断层或夹泥层、层面、节理)取不同的结构面条件系数。使用这个分类体系,可以对工程中遇到的岩质边坡可能发生的破坏模式和稳定性作出初步判断和评价。有关详细内容可参见文献

4 边坡稳定分析方法和软件系统

本攻关项目的主要目标是建立一套理论先进、使用方便的岩质边坡稳定分析方法以及相应的计算机软件系统。这个系统包含地质资料分析处理,边坡失稳模式判断,岩体结构面网络模拟,各种边坡失稳模式的稳定分析等多种功能。

4.1 岩体结构面极点统计和边坡失稳模式判断程序 YCW

岩体结构面产状是控制边坡稳定性的决定因素。应用赤平投影方法对边坡结构面的几何特性进行统计分析,并判断边坡失稳模式,可以方便地通过 YCW 程序实现。其主要功能为:结构面产状的极点投影和统计,绘制极点等密度图和直方图;进行结构面大圆切割分析计算;进行香港土木工程署“Geotechnical Manual for Slopes”建议的边坡失稳模式判断。使用 YCW 程序判断洪家渡工程左、右岸坝肩、溢洪道和地下厂房进、出口高边坡在这样一个特定的地质条件下分别可能出现的破坏模式,认为该边坡出现倾倒破坏的可能性不大。

4.2 平面和弧面滑动分析程序 EMU

根据这一成果开发和边坡稳定分析程序 EMU 可用于任意形状滑裂面,可模拟岩体内部的软弱结构面,土条倾斜侧面等;可以进行锚索、抗滑桩的加固设计;并可以推广到具有埋深、倾斜荷载和分层的地基承载力计算。

4.3 岩质边坡倾倒分析

结合龙滩水电站边坡工程开发了倾倒分析的简化计算机程序。本程序可计算边坡岩体台阶底滑面的倾倒破坏安全系数,确定滑动区、倾倒区和稳定条块范围。图 3 为对图 1 所示的龙滩边坡应用本程序进行倾倒稳定分析的计算图。

4.4 岩质边坡楔体稳定分析

本程序可以进行具有 2 个滑面, 1 个后缘拉裂面的楔体稳定计算;可以考虑拉力缝部分或全部充水;可以计算最佳锚固方向和锚固力,按要求的安全系数设计锚固力或锚固力方向。图 4 为三峡船闸

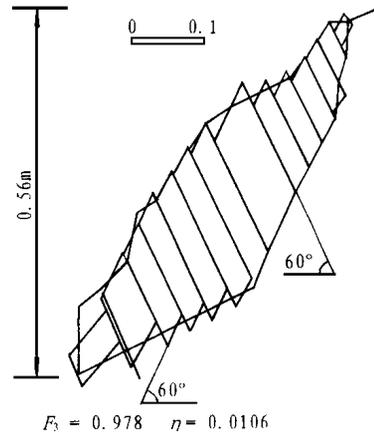


图 3 龙滩水电站左岸边坡倾倒分析

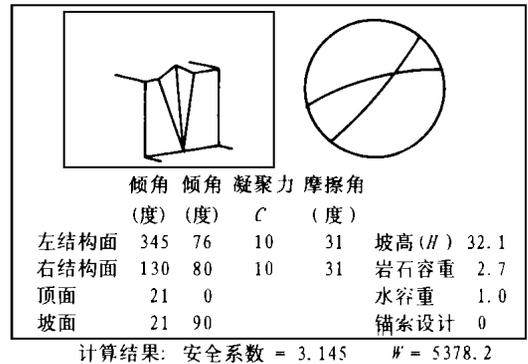


图 4 三峡船闸三闸室中心墩北边坡楔体稳定分析

三闸室中心墩北边坡楔体稳定的计算机图形分析及计算

5 参考文献

- 1 谷德振. 岩体工程地质力学基础. 1979
- 2 陈祖煜. 边坡稳定的塑性力学上限解. 中国土木工程学会第七届土力学及基础工程学术会议论文集, 中国建筑工业出版社, 1994
- 3 孙东亚, 陈祖煜, 杜伯辉, 曹永成. 边坡稳定评价方法体系及其修正. 岩石力学与工程学报, 1997
- 4 陈祖煜, 张建红, 汪小刚. 岩石边坡倾倒破坏稳定分析的简化方法. 岩土工程学报, 1996

闽江局中标棉花滩电站大坝工程

闽江工程局以 18 885.313 2 万元中标,福建省重点建设项目的棉花滩水电站大坝工程,授标及合同签字仪式 2 月 13 日在福州举行。副省长黄小晶参加了仪式。

棉花滩水电站位于福建省永定县境内峰市乡汀江干流棉花滩峡谷河段中部。是以发电为主,兼有防洪、航运等综合效益的水电枢纽工程,总库容 20.35 亿 m^3 ,调节库容 11.22 亿 m^3 ,属不完全年调节水库,电站装机 4 台,总装机容量 60 万 kW。工程的主要建筑物有:碾压混凝土重力坝、地下厂房系统、配电装置、控制楼、升船机道和副坝等。

(阅文)