

文章编号:0559-9342(2007)02-0081-03

水电工程边坡设计及施工技术综述

周建平,陈观福,赵全胜

(中国水电工程顾问集团公司,北京 100011)

关键词:水电工程;边坡;稳定分析;加固处理;信息化设计

摘要:水电工程高陡边坡的工程地质、水文地质条件复杂,受施工干扰较大。当边坡规模较大、稳定安全性较差时,往往对项目决策、工程建设和运行安全影响很大。为此,论述了边坡工程地质条件对边坡稳定安全性的影响,阐明了确定边坡设计安全标准的原则,归纳了边坡常见的变形破坏模式及其分析计算方法,明确了边坡的开挖和加固处理的施工技术要求,并指出边坡勘察、设计、施工、管理一体化是目前边坡工程领域的热点课题和未来发展方向。

Summary on Slope Design and Construction for Hydropower Projects

Zhou Jianping, Chen Guanfu, Zhao Quansheng

(China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Beijing 100011)

Key Words: hydropower project; slope; stability analysis; strengthening treatment; information design

Abstract: High steep slopes of Chinese hydropower projects have the characteristics of complex geological conditions and large scale, their stability plays a great role in decision-making, construction and operation safety of projects, and they are one of key technical issues for most of the hydropower projects in China. On the basis of analysis and review for reconnaissance, design, construction and operation experience of the slopes, author summarized the effects of geological conditions on slope stability and treatment, clarified the principle when deciding the safety criteria for slope stabilities, concluded the usual failure patterns of slope and the popular numerical simulation approaches for slope stability, put forward actual requirements for slope excavation and treatment construction, pointed out the integrity of reconnaissance, design, construction and management of slope is the pop issue at present and is the development trend in the future. Author hopes that the viewpoint and suggestion in this paper can provide useful information for the study, analysis, design and construction of slopes located in Chinese hydropower projects.

中图分类号:TV222

文献标识码:A

0 引言

我国许多水电工程边坡高陡,规模较大,工程地质和水文地质条件复杂,边坡稳定安全性对项目投资决策、工程建设和运行安全影响很大。水电工程边坡岩体的结构、性状及其所承受的作用各不相同而且极其复杂,边坡治理施工程序、施工方法、施工措施和工艺技术等对边坡的稳定安全也有很大影响,对这些因素带来的影响均难以准确地进行数值描述,采用概化模型进行边坡稳定性分析,实际上只能起到辅助设计的作用。因此,边坡设计离不开工程类比、工程实践总结和设计人员的经验判断。在边坡施工中,设计人员还需要根据施工地质条件,不断完善边坡工程地质力学模型,结合监测资料分析,进一步复核边坡稳定安全性,适时优化调整设计参数和施工方案。随着地质勘察技术、数值分析方法、计算机技术、网络技术和信息技术的发展,水电工程边坡的

设计和施工正在加速信息化进程,多专业协同、三维可视化、动态设计与施工、精细计算和快速反馈,使得水电工程边坡勘察设计施工管理一体化成为可能。水电工程边坡设计和施工因此而成为多学科交叉、多专业协同和现代计算机技术应用最活跃的领域之一。信息化是边坡工程设计和施工的发展方向,它对提高勘察设计效率、保证勘察设计质量、指导工程施工和管理都将起到积极的推动作用。

我国水电工程边坡设计和治理的基本原则是“安全适用、经济合理、技术先进、确保质量”。为贯彻执行这一基本原则,边坡工程设计和施工应遵循以下基本思路:①采取综合

收稿日期:2006-10-20

作者简介:周建平(1962—),男,湖南常德人,教授级高工,中国水电工程顾问集团公司总工程师,主要从事水电、风电工程设计、研究和管理工作的。

勘探技术,由表及里,由浅入深,不断加深对边坡工程地质条件和物理力学特性的认识,建立和完善边坡工程地质力学模型和物性参数数据库;②采取岩体质量分级和边坡工程分类标准,分析边坡变形条件、稳定条件,评价边坡稳定安全性和关键影响因素;③依靠工程类比和设计者经验,选择合适的边坡体形和边坡加固处理措施;④采取控制爆破技术进行开挖,尽量减轻对岩体的损伤,适时支护加固,保证施工安全和运行期安全;⑤利用开挖揭示的地质条件和监测信息,进行实时动态反馈分析,优化调整边坡设计参数和施工方案,使其具有更好的针对性和适应性。

1 边坡工程地质条件

岩体岩性、结构面(断层、节理、裂隙)、风化、卸荷、地应力、地下水、地形地貌等诸多地质元素,以及重度、孔隙率、含水量、透水率、强度、温度等物性参数,都是边坡稳定安全性的影响因素。因此,需要运用工程地质勘察技术、岩土测试技术,查明边坡工程地质、水文地质条件,取得岩土体物理力学性质参数,通过分析预测边坡工程地质问题,为工程设计提供地质资料和依据。

边坡工程地质条件和水文地质条件不仅是地质历史演变的结果,同时也受人类活动的影响。边坡岩体受施工干扰,如开挖卸荷、爆破振动、施工用水、风化剥蚀等,将在一定程度上改变边坡岩体的结构状况、强度特性和受力条件,在这种情况下,边坡稳定安全性有时会显著降低。因此,在边坡工程地质条件、水文地质条件的评价中,要考虑人类活动的直接或间接影响。

在边坡岩体质量分级的基础上进行边坡工程分类,是边坡稳定安全性评价的重要方法。根据工程地质和水文地质条件,考虑边坡成因类型、组成物质、岩层产状、岩体结构、稳定状态、破坏类型、滑坡特征等因素,水电边坡工程稳定状态划分为稳定边坡、潜在不稳定边坡、变形边坡、不稳定边坡和滑坡。常见的边坡变形破坏类型有6类,即崩塌、滑动、倾倒、溃屈、拉裂和流动,其中以滑动最为常见。根据对水电工程边坡破坏的统计,边坡滑动破坏占80%以上。因此,本文所指边坡稳定分析主要是抗滑稳定分析。

笔者认为,影响边坡稳定安全性的本质因素是边坡岩体的结构。边坡岩体结构类型不同,稳定安全性差异很大,特别是岩体结构面的发育程度、结构面的性状和组合关系基本决定了边坡的稳定安全性。水电工程稳定性分析和加固治理设计中,客观地描述和模拟结构面,尤其是软弱结构面的空间分布、水理特性、力学性质是边坡稳定分析的基础,也是工程地质和岩土试验工作的重点。在边坡岩体结构中,控制边坡稳定状况的关键性边界是倾向坡外的底滑面,而连通率、倾角、滑面组成物质及其物理力学性质又是影响底滑面的关键因素,掌握了边坡底滑面的倾角、夹泥与否和地下水状况,便可对边坡稳定安全状况作出基本判断。

2 水电工程边坡设计安全标准

建筑物的安全性是由地基、边坡、结构自身的安全性共

同决定的。从经济合理的角度考虑,建筑物地基、边坡和结构构件应具有基本一致的,并与工程等别、建筑物级别相匹配的安全度或可靠度。水工建筑物地基、边坡及其结构构件自身,在其设计使用年限内应具有足够的安全度,并应满足正常使用的功能要求。

根据 DL5180—2003《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》的规定,边坡的安全级别通常与相应建筑物的安全级别一致;对于失事后仅对建筑物正常运行有影响而不会危害建筑物安全和人身安全的边坡,经权衡边坡加固费用和建筑物可能的修复费用及运行损失后,级别可降低一级;近坝库岸边坡,通过安全监测可以预测预报其稳定状况的变化,并能够采取有效措施对其失稳危害进行防范时,安全级别可降低一级。实际上,水电工程边坡的安全级别系根据边坡所影响的建筑物的重要性,边坡失事对建筑物的危害程度和可能产生次生灾害严重程度,建筑物破坏后果的严重性所确定。DL5180标准对不同安全级别的边坡,提出了最小抗滑稳定安全系数(见表1)。

表1 水工建筑物边坡最小抗滑稳定安全系数

边坡分级	最小抗滑稳定安全系数		
	基本组合	特殊组合Ⅰ	特殊组合Ⅱ
1级	1.30~1.25	1.20~1.15	1.10~1.05
2级	1.25~1.15	1.15~1.05	1.05
3级	1.15~1.05	1.10~1.05	1.00

注:水电工程边坡稳定分析中,应区分不同的作用组合或运用状况。采用极限平衡方法中的下限解法作为基本求解方法时,安全评价适用本表。

由于边坡岩体的稳定状况是持续变化的,随着时间的推移,各种作用的变化、岩体性质的变化、加固措施效果的变化等都可能导致边坡岩体稳定状况的变化,而这些变化通常是趋于不利的,因此在边坡工程勘察设计和施工中留有适当安全储备是必要的。

3 边坡稳定分析方法

工程地质分析一般只是定性方法,反映为边坡整体稳定性评价意见。通常只是针对重要建筑物边坡、潜在不稳定边坡和变形边坡进行必要的定量分析计算,重点针对影响工程运行安全和建筑物安全的边坡治理方案进行研究。

为了掌握在自然状况下、施工过程中和长期运行期间边坡的变形规律和稳定安全性状况,需要开展各种作用组合或运行工况下的边坡变形稳定分析。边坡变形稳定分析计算中,要研究分析的因素很多,多数影响因素是随时间和环境变化的,少数因素是相对不变的。因此,在边坡的变形稳定分析中,大多数变量不是定值而是随机变量和随机函数。然而在目前的边坡设计中,绝大多数设计人员仍然习惯采用定值法设计。即将颁布实行的《水电工程边坡设计规范》中,列出了定值设计法和可靠度方法,可供设计者选用。

通常只有较为准确地把握边坡岩体结构、滑动类型、基本力学参数、边界条件,采取恰当的计算分析模型时,才能较为准确地分析判断边坡变形和稳定状况。由于计算模型的假

设条件与客观实体的差异,任何一种计算分析方法都有其局限性。《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》和《水电工程边坡设计规范》要求,应根据边坡滑移类型,合理选取计算模型、岩土参数和计算方法进行边坡抗滑稳定安全系数计算。刚体极限平衡中的下限解法是边坡抗滑稳定安全系数计算的基本方法。对于 1、2 级工程边坡,应采取其他多种计算方法,包括有限单元法等进行验算,综合分析评价边坡变形与稳定安全性。

将基于均匀介质的传统土力学稳定分析方法用于岩质边坡的稳定性分析评价是不妥当的,应重点研究特定结构面对边坡抗滑稳定安全性的影响,分析在边坡内可能形成的规模不等的潜在不稳定岩体或块体。在有多组结构面的情况下,要首先分析由软弱结构面、软弱层带和贯穿性结构面组合形成的确定性块体;其次分析软弱结构面、软弱层带和贯穿性结构面与成组节理或层面裂隙组合构成的半确定性块体;在无软弱结构面和贯穿性结构面的岩体内,应分析由成组结构面或层面裂隙构成的随机块体。

对层状结构的岩质边坡,应根据层面产状与边坡坡面的相对关系,划分层状岩体边坡结构类型,判断其可能发生的变形与破坏形式。在滑动破坏类型的块状结构和层状结构岩质边坡中,应按平面型滑动、楔形体滑动、复合平面型滑动等滑动模式选取相应的抗滑稳定计算方法进行稳定分析。对碎裂结构的岩质边坡,除对上述三种滑动模式进行分析外,还应对应弧面型滑动形式进行分析。

边坡刚体极限平衡分析的下限解法包括 Morgenstern-Price 法、Chen-Morgenstern 法、Spencer 法、Swedish 法、Janbu 法、Modified Bishop 法、传递系数法。上限解法包括能量法(EMU 法)和分块极限平衡法(Sarma 法、潘家铮法)。常用的数值分析方法包括有限元法、离散元法和块体运动解法。《水电工程边坡设计规范》推荐的刚体极限平衡方法有 Modified Bishop 法、Morgenstern-Price 法、传递系数法以及能量法(EMU 法)和 Sarma 法。

三维稳定分析在很多情况下具有特别重要的意义,常用的三维极限平衡分析方法有三维楔形体法、三维上限解法等。对于重要的或工程地质条件复杂的边坡,可假设为连续介质或非连续介质,采用三维数值方法计算分析边坡的变形、稳定和运动形式,如三维有限元法、三维离散元法、块体元法、有限差分法、流形元法等。

除上述分析方法的研究和应用外,水电工程边坡研究中,设计人员和学者在认识岩体变形破坏本质和描述本构关系方面也取得了一些新进展,改进了弹塑性模型、断裂模型、流变模型、损伤模型、流变~损伤耦合模型、渗流~损伤耦合模型,并应用于三峡船闸高边坡、龙滩水电站左岸进水口边坡等。一些学者还专门研究了爆破对边坡稳定的影响,边坡锚固作用机理和开挖卸荷机理等。

基于复杂模型的数值分析中存在计算模型、参数的不确定性和网格剖分的随意性,普遍认为,过于追求精细计算是没有必要的,精细计算难以弥补计算条件不确定性所带来的误差。笔者认为,由于数值分析方法可以模拟较复杂的边界

条件、介质力学特性、结构轮廓和实际施工与运行过程;可以模拟岩体内不同级别结构面的影响;可以考虑与渗流场、温度场的耦合;可以模拟综合加固的机理进行加固结构的优化设计,因此获得了广泛应用并具有很强的生命力。与传统的极限平衡法相比较,数值分析方法能给出岩体内应力分布和变形过程的详细信息,有助于工程师做好边坡开挖支护设计。近期发展的虚拟现实技术就是利用数值模拟方法对岩体工程进行仿真分析,揭示出一些新的应力应变变化规律,为边坡治理设计提供了理论依据。

4 边坡工程施工技术要求

边坡加固处理措施较多,如削坡减载、预应力锚固、喷锚支护、防渗排水、抗滑桩、抗剪洞、锚固洞和混凝土支挡结构等。但是,不恰当的施工方法可能导致稳定边坡的失稳,甚至导致施工安全事故的发生。对处于临界稳定条件的边坡,更需要采取适当的施工程序、施工工艺、施工措施才能确保施工安全。因此,边坡设计研究除需进行必要的方案比较、计算分析和安全评价外,还需对所使用的材料、施工程序和措施、工程质量、运行维护等提出相应的控制和检验要求,这些要求应符合勘察、设计、施工、管理及维护等标准的有关规定。

在岩质边坡的开挖施工中,尽量缓解或减少爆破振动对边坡岩体的影响是保证边坡稳定的重要环节。通过优化爆破参数,采用预裂爆破、光面爆破、减振爆破等控制爆破技术,以及合理地设定爆破振动的安全判据和控制标准,可以达到良好的爆破减震效果。

就喷锚支护而言,选择和把握合理的支护时机是非常重要的。边坡稳定状况不同,开挖锚喷支护的施工顺序也有差别。对于尽量小心开挖(风镐或人工撬挖)或采取严格控制爆破后仍然可能导致边坡失稳的,要采取预加固措施,在开挖爆破之前,加固潜在不稳定岩体。对于不良地质岩体、局部稳定性差的边坡,支护加固措施应及时跟进。对于地质条件尚好,边坡能够维持一定自稳时间的,可采取实时支护。通常在考虑施工条件、施工进度并在保证边坡岩体稳定安全的情况下,选择支护时机。对于高边坡,通常要求自上而下,边开挖边支护,支护完成时间滞后开挖不超过 2 个梯段;对于地质条件好、开挖边坡缓,能够保持长期稳定的边坡,通常不支护或仅随机支护,支护时机的选择具有较大的余地。

对于稳定性较差的边坡,坡顶外边缘要先形成排水沟,甚至要先完成排水洞、排水孔幕的施工之后,才能进行开挖。边坡开挖要尽量避免在雨季施工,并力争一次处理完毕。雨季施工时应采用临时封闭措施。排水孔、排水洞可能导致边坡岩体局部渗透梯度增大,不利于破碎岩体的渗透稳定性,为此,在排水孔、排水洞等相应部位要设置必要的反滤保护措施。

当边坡的开口线和坡脚位置已经确定,无法放缓坡度时,常采用悬臂桩进行边坡加固。某水电站堆积体的悬臂抗滑桩规模大,悬臂高达 30 m,桩身布置有预应力锚索,预应力锚索对改善桩体应力条件和保证边坡稳定起到了重要作用。

值得提到的是,当需要对边坡坡面以下 (下转第 90 页)

对电网经济运行产生了如下作用:

(1)从电网调峰运行角度分析,可满足2001年所缺调峰电量0.279 0亿kW·h,其余峰、腰荷电量均可由常规火电机组提供。抽水蓄能电站按年设计运行1 291.7 h(发)/1 677.5 h(抽),上网电量2.583 4亿kW·h,抽水电量3.690 5亿kW·h。抽水蓄能电站按经济运行,上网电量0.489 0亿kW·h,抽水电量0.694 5亿kW·h。

(2)从强迫125 MW等级火电机组停运出力台次来看,抽水蓄能电站投运后强迫停运火电台次明显低于不建设抽水蓄能电站的系统,这也说明抽水蓄能电站具有双重调峰作用。

(3)抽水蓄能电站具有一定的节煤效益。基本运行方式的全网总燃料费用为38.204亿元,运行方式二的为37.861亿元,运行方式三的全网总燃料费用最小,为37.831亿元,其原因是调峰电站采用经济运行方式,充分发挥了其容量效益,明显改善常规火电机组的运行工况,从而较大幅度节省了燃煤费用。

3 结论

本文通过对安徽省电网的模拟计算,分别分析了原有电网的运行情况和新建新的抽水蓄能电站后、两种不同工作状

(上接第83页)的岩体进行钻孔、爆破时,尤其要注意避免对边坡岩体的损伤。坡面上开洞,要先做好锁口,采取短进尺弱爆破掘进,或由内向外,短进尺弱爆破掘出。采用混凝土回填方法治理边坡,在坡体内开挖形成大洞室,如措施不当,对边坡的危害甚至大于加固处理的效果,可能得不偿失。当边坡坡脚岩性软弱、易于风化或受到水力冲刷时,应研究设置适当的坡脚支挡结构或抗冲刷保护措施,以保持坡脚的稳定性。

5 边坡的信息化设计

边坡工程前期设计研究成果仅用于宏观总体控制,要预测和解决工程施工过程中可能出现的问题,还必须充分掌握施工地质信息,密切关注工程地质条件和岩土参数的变化。因此,施工期开展边坡地质分析、进行变形监测非常重要。设计人员应根据监测数据和补充地质分析成果进行边坡变形和稳定的反馈分析,评价开挖、支护、加固等作用效应,预测预报进一步施工过程中边坡岩体性状、变形和稳定的可能变化趋势,按照保证施工安全、施工进度并且经济合理的原则,通过专家信息系统判断是否需要调整设计参数和施工方案,针对异常情况,提出并实施最恰当的处理方案。

随着每个梯段开挖支护的施工循环,可以不断地积累地质信息、工程信息和监测信息,通过在线实时分析,随时掌握边坡稳定安全状况及其变化发展趋势,提出下一个循环的开挖爆破和支护设计方案。边坡工程信息化设计与施工是随着计算机技术、信息技术和网络技术发展起来的新的勘测设计理念 and 设计思想,系三维可视化软件、工程边坡计算分析软件、综合信息系统管理软件的集成应用。边坡工程勘察设计施工管理一体化、信息化、数字化、理性化,是边坡工程领域

态下(按设计水平和经济水平运行)的运行情况,模拟计算的结果表明:由于抽水蓄能电站具有调峰填谷的双重调峰能力,在减少常规125 MW火电机组压出力停机方面的作用突出,减少了常规125 MW等级火电机组压出力停机的台次,有效地降低了常规125 MW火电机组的疲劳损失。与不建设新的抽水蓄能电站的电力系统相比,建设新的抽水蓄能电站具有节煤效益,其中当抽水蓄能电站采用经济运行方式的节煤效益更为明显。

参考文献:

- [1] 张挺,张平. 抽水蓄能电站的电量效益[J]. 水力发电,2001(1):14-16.
- [2] 常工. 抽水蓄能技术的发展趋势[J]. 国际电力,1998,2(1):27-29.
- [3] 王海曙. 抽水蓄能电站综述[J]. 水利水电科技进展,1998,18(6):21-23.
- [4] 梁海波,马吉明,谷兆祺. 加快我国抽水蓄能工程建设[J]. 水电能源科学,1997,15(1):47-51.
- [5] 罗绍基. 美国 Summit 抽水蓄能电站的效益评价及经营的调查分析[J]. 中国电力,1997,30,(7):55-58.
- [6] 刘树昌. 十三陵抽水蓄能电厂在电网中的作用[J]. 水力发电,1997,(12):5-7.
- [7] 罗绍基. 抽水蓄能电站的经济评价[J]. 水力发电,1995,(8):1-10.

当前的热点,也是未来的发展方向。

6 结语

与公路边坡、铁路边坡、矿山边坡、民用建筑物边坡相比,水电工程边坡有其特殊的复杂性。水电工程高陡边坡的地质环境复杂、规模大、影响大,是其他行业边坡工程难得一见的。水电工程边坡勘察、设计、施工和运行维护中积累了丰富的经验和教训,值得认真研究和总结。笔者根据工作经历和学习其他工程经验,概述了边坡工程地质条件及其稳定性评价方法,阐明了确定边坡设计安全标准的基本原则,归纳了常见的边坡变形破坏模式和目前流行的分析计算方法,对边坡开挖、排水、喷锚支护和其他加固处理措施的施工提出了具体要求,指出边坡工程勘察设计施工管理一体化是目前的热点课题和未来的发展方向。笔者希望文中诸多观点能够对我国水电工程高边坡问题的研究、分析、设计和施工提供有益的借鉴。

参考文献:

- [1] DL5180—2003,水电枢纽工程等级划分及设计安全标准[S].
- [2] 陈祖煜,汪小刚,杨健,等. 岩质边坡稳定分析——原理 方法 程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [3] 李瓚,陈飞,郑建波,等. 特高拱坝坝址分析与重点问题研究[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [4] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京:中国水利出版社,1980.
- [5] 周维垣,杨强. 岩石力学数值计算方法[M]. 北京:中国电力出版社,2005.