

水电建设中的高边坡工程

陈祖煜 汪小刚

(中国水利水电科学研究院, 北京, 100044)

关键词 边坡稳定 控制爆破 预应力锚固 高边坡工程

摘要 我国许多水电工程的工程地质条件比较复杂。有些工程在施工中, 多次发生滑坡灾害并造成了重大的经济损失和人身伤亡。为了治理滑坡灾害, 我国水电科技人员针对关键技术开展科技攻关, 从岩质高边坡的失稳机理和分析方法研究, 到边坡工程的控制爆破技术、高边坡的加固工程等问题进行了系统研究, 并形成了一整套水电高边坡工程勘测、设计和施工的新技术, 从而成功地建成了包括三峡、小浪底工程在内的一批规模巨大的高边坡工程。

我国水电建设的科技人员在与滑坡灾害作斗争的过程中, 认真吸取教训, 针对关键技术开展科技攻关, 逐渐总结了一整套水电高边坡工程勘测、设计和施工的新技术, 成功地建成了包括三峡、小浪底工程在内的一批规模巨大的高边坡工程。本文简要回顾了这些新技术。

1 岩质高边坡的失稳机理和分析方法研究

了解边坡失稳的机理, 采用先进的勘测、设计方法, 这是建设水电高边坡工程的首要课题。这一领域的科技进步主要反映在以下方面。

1.1 工程地质勘探新技术

水电工程高边坡通常修建于工程地质条件极为复杂的岩体中。了解岩体结构的地质特征, 查明潜在的薄弱结构面, 是认识边坡可能的失稳机理和风险, 作出经济、合理的边坡设计的基本前提。在“八五”“九五”期间, 开发了以了解岩体软弱结构面为核心的一系列工程地质勘探新技术。主要是:

(1) 钻孔彩色电视成像和直接量测结构面产状的技术。长委会开发的这套技术在三峡船闸高边坡和坝基的勘探中获得广泛应用, 较好地解决了可能影响岩体稳定的长大节理裂隙的定位问题。

(2) 摄影(象)图象技术。长委会开发的这套快速摄影微机地质素描成图技术, 实现了地质现场编录素描自动化, 为最大限度地记录、保存现场边坡开挖揭露的地质资料提供了有力的手段。

(3) 近坝库岸安全量测技术。采用光电测距交会, 三角高程测量等技术, 实现高精度、远距离报警, 如RS-94型全自动滑坡量测报警系统。这些

技术在龙羊峡、李家峡等工程中得到应用, GPS系统也在滑坡监测中得到了应用。

1.2 岩质高边坡结构分类和失稳模式判断

岩质边坡破坏模式包括滑动、倾倒、楔体失稳等, 而岩体结构是决定岩质边坡的稳定性和可能的失稳模式最直接和最重要的因素。在“八五”攻关中, 在对水利水电工程中遇到的大量边坡工程实例进行调查分析的基础上, 提出了边坡岩体结构分类体系。中国水利水电科学研究院(以下简称水科院)开发的YCW软件, 可以协助设计人员快速判断岩质边坡可能的失稳模式。

1.3 边坡岩体的抗剪强度

岩体的抗剪强度是分析评价岩质高边坡稳定的一个重要问题。我国工程界逐渐形成了一套建立在经验判断, 室内、外试验和理论分析等综合手段基础上的确定节理岩体抗剪强度的方法。

对岩体的软弱面进行抗剪强度试验, 通常不能较好地控制剪切速率, 因而难以获得有效应力的强度指标。在“七五”攻关中, 黄委会自制伺服控制大剪设备, 对小浪底工程的泥化夹层进行现场大剪试验, 剪切速率可以控制在 0.076 mm/min 以下。水科院开发的现场取原状样, 在MTS设备上室内中剪试验, 可以将剪切速率控制在 $0.02 \sim 0.002 \text{ mm/min}$ 。这些技术为准确把握岩体结构面的抗剪强度提供了有效的手段。

在“八五”攻关中, 建立了一个包括117个工程1100组抗剪强度资料的岩石力学参数数据库。

收稿日期: 1999-10-08

同时,开发了一套依据蒙特卡洛原理模拟节理岩体,进而确定岩体节理面的连通率和抗剪强度综合指标的方法,在小湾、三峡等工程中得到了应用。

1.4 边坡稳定分析方法和软件系统

作为“八五”攻关的一项重要成果,岩质高边坡稳定分析的软件系统包括以下常用的设计分析程序。

- (1) YCW,对节理面进行统计分析以及对边坡可能的失稳模式进行判断;
- (2) EMU,对岩质边坡进行二维 Samma 法平面和弧面滑动稳定分析;
- (3) TOPPLE,进行边坡倾倒稳定分析;
- (4) WEDGE,进行边坡楔体稳定分析。

图1为使用 EMU 程序对小浪底工程出口边坡进行稳定分析的示例,边坡采用抗滑桩和预应力锚索加固,程序最终找到了上部通过 F236 断层,中部通过软弱夹层的临界滑裂面 ABCD。

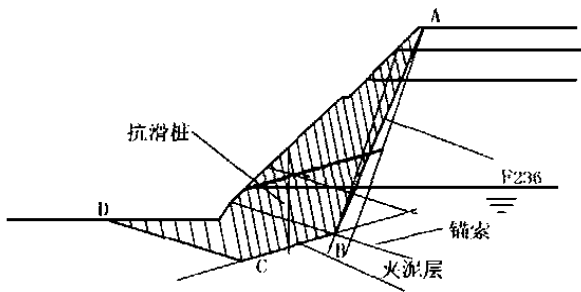


图1 采用 EMU 程序对小浪底出口边坡进行稳定分析

2 边坡工程的控制爆破技术

近年来,在我国水电工程边坡开挖施工中,广泛采用控制爆破技术,最大限度地减少爆破振动对边坡岩体的破坏,主要包括以下几种手段。

2.1 采用高效炸药

目前,在我国水利工程爆破开挖中,常用的炸药品种是 2 号岩石硝铵炸药和乳化炸药,由于炸药密度高、临界尺寸较大 (≥ 20 mm),爆速也高 ($\geq 3\ 600$ m/s),会对岩体产生破坏,不利于岩体稳定。在国家“八五”攻关科研工作中,曾结合李家峡左岸边坡工程,对 XDG 和 GB-A-8 两种类型的低爆压炸药进行了系统的试验。XDG 炸药传爆速度为 1 500~2 000 m/s,药卷直径较小,在李家峡工程两岸灌浆和排水洞光面爆破、边坡开挖试验及两岸洞室开挖中,均获得了良好的爆破效果。

2.2 优化控制爆破设计参数

孔深、孔径、孔距、钻孔精度等基本参数对爆

破效果具有重要影响。预裂孔孔径由钻孔器具的类型和规格而定,风钻为 42 mm,潜孔钻为 80~120 mm。预裂孔孔距一般取为孔径的 8~15 倍,孔径大、边坡岩体较差时取下限,反之取上限。

在李家峡工程边坡开挖中为提高预裂孔钻孔精度,采用了样架钻孔和预留台阶钻孔等方法,取得了较好的效果。

2.3 采用合理的装药结构

在控制爆破中,采用不耦合装药和间隔装药降低爆压可以有效地防止爆破孔周围岩石的挤压破碎、后冲破裂,并减小地面震动。

在李家峡工程的边坡开挖中,预裂爆破采用了间隔不连续装药结构,底部 1 m 采用连续装药。根据装药量将标准药卷或自行自制的小药卷按一定间隔捆扎在导爆索上,并一起绑在竹片上或小竹竿上,放入孔内。同时还采用了另一种新型的装药结构,即空气层间隔装药结构。当梯段高度为 10 m、孔深为 12 m 时,空气层结构与药卷装药相比可减少钻孔量 20%,与无空气层装药相比,振速可降低 15%以上。当钻孔孔径为 42 mm 时,采用 $\phi 20$ mm 的特制小药卷;孔径为 85 mm 和 120 mm 时,采用加工成 $\phi 32$ mm 的药卷。不耦合系数一般为 2~4。爆破后,预裂孔残孔岩石内壁未受破坏,半孔率达 90%以上。

2.4 控制单响药量

单响药量是边坡开挖的重要控制指标。李家峡右岸高边坡工程预裂爆破采用分段起爆,每段 5~7 孔。控制的标准为:距设计边坡 20 m 以外,单响药量不超过 250 kg; 8~20 m,不超过 150 kg; 8 m 以内,不超过 75 kg。

2.5 采用微差、梯段爆破

非电微差梯段爆破段间合理时差的确定应从梯段爆破机理及对保留岩体影响最小两方面来考虑。“七五”期间,曾根据梯段爆破机理的分析,认为合理时差为 10~18 ms,考虑到我国毫秒雷管生产的现实情况,主要采用 25 ms 的时差。实践中一般认为时差 15~35 ms 比较合适。李家峡现场爆破测试结果表明,当距预裂面 $R < 15$ m,时差 $\Delta t \geq 25$ ms, $R < 35$ m,时差 $\Delta t \geq 45$ ms 时,可避免爆震迭加。

2.6 采用先进的控制爆破技术

(1) 减震爆破。通过对爆破孔网的最后一排参数的改变,以减小抵抗线、孔距和装药量,限制爆破的地面冲击。

(2) 缓冲爆破。即沿着预先设计的开挖界线呈

线状布孔, 少量装药, 并在主生产爆破孔爆破之后起爆。缓冲爆破的目的是要从边帮上削平或修整多余的岩石, 以提高它的稳定性。

(3) 深孔梯段爆破, 采用 80~150 mm 的孔径, 6~12 m 的台阶进行爆破, 采用微差爆破技术并辅助以预裂或光面爆破。大型岩质边坡采用这样一种台阶型的开挖方式时, 绝大多数钻孔为垂直孔, 因此, 采取深孔材料爆破不仅大大提高了工效, 而且易于控制轮廓, 已成为我国水利水电边坡开挖的主要方式。

(4) 预裂爆破。常用于开挖轮廓的控制和对已有建筑物或基岩的保护, 这种爆破方法是在预先设计的开挖界线上打一排密间距炮孔, 装以适量炸药, 于主冲击波抵达之前起爆, 形成一条为散逸生产爆破产生的膨胀气体所必须的张开裂缝, 以有效的隔离和减弱爆破震动的影响, 一般可削减振动能量的 30%~70%。

(5) 光面爆破。类似于预裂爆破, 它也是沿设计开挖线布置一排密距小孔径钻孔, 孔径 5.1~7.6 cm, 孔距为孔径的 2~4 倍, 目的是要构成一个弱面, 使产生的爆破破坏截此为止。

3 高边坡的加固工程

下面各种高边坡的加固措施, 均在水利水电工程中得到广泛的使用。

3.1 减载、压坡

在有条件的情况下, 减载压坡总应该是优先考虑的加固措施。天生桥二级厂房发生大规模的滑移时, 卸载约 22.2 万 m^3 , 使安全系数增加 65% 左右, 边坡变位速率明显降低。

3.2 排水

由于降雨, 库水入渗等原因, 坡内孔隙水压力有可能增加, 因此, 在坡内按一定高程布置排水廊道, 已是水电高边坡工程中广泛采用的加固手段。三峡工程船闸高边坡总高度为 150 m, 共设置了 6 个不同高程的廊道 (图 2)。小浪底出口边坡处于断层交汇、层面顺层发育有软弱夹泥等极不利条件, 在 115 m 布置了一条排水廊道后, 每小时抽水量达 240 m^3 , 使地下水降低 10 余 m, 保证了边坡在开挖过程中的稳定。

3.3 锚固

通常对岩质边坡进行表面系统锚固。必要时使用预应力锚索对边坡进行整体锚固。

和地下工程一样, 对岩质边坡的坡面进行系统的喷锚, 对提高边坡的稳定性十分有利, 但水电工

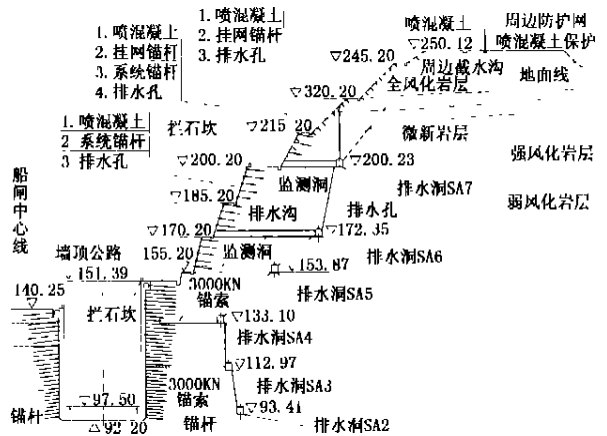


图 2 三峡工程船闸高边坡加固示意

程中广泛采用的砂浆锚杆存在着施工中难以检查注浆饱满、密实程度的缺点。近年来, 在柴石滩等工程中采用了自钻式注浆锚杆。这类锚杆本身即为钻头, 成孔后不再拔出, 并保证了每一根锚杆都在一定的压力下与浆材结合, 是一个值得推广的新技术。

预应力锚索的结构可分为 3 部分, 即内锚头、锚索和外锚头。内锚头置于稳定岩体中, 通过水泥浆材和岩体紧密接合, 对不稳定岩体提供锚固力。预应力锚索通常由高强度钢索组成, 它一端联结内锚头, 一端连接外锚头。外锚头是对岩体施加张拉力实现锚固的机械装置。

按锚索结构分, 预应力锚索又分为有粘结和无粘结锚索两种。无粘结锚索的钢绞线周围带有胶套, 中有防腐油剂, 钢绞线可以在胶套中自由滑移。在施工时内锚头和钢绞线周围的水泥浆材是一次灌入的, 浆材凝固后再张拉。这样, 可以减少一道工序, 提高工效。同时, 在锚索外还增加了一个塑料护套。小浪底是我国首次大规模使用这一类锚索的工程。图 3 为这类锚索的结构图。无粘结锚索最重要的优点是, 大部分钢绞线都得到防腐油剂和护套的双重保护。并且可以重复张拉。但此类锚索造价较高。

近期, 一些工程采用对拉锚索, 将内锚头放在山体内部的排水廊道中, 如三峡船闸工程 (图 2)。这样, 内锚头不再是灌浆锚固端, 而是置于廊道上的墩头锚或双向施加张拉的预应力锚。这类加固方案将排水和锚固结合起来, 同时减少了约占锚索长度 1/3~1/4 的内锚固段, 是一种理想的加固形式。

内锚固段的胶结材料常采用纯水泥浆或树脂材料, 要求具有快凝、早强, 对钢材无腐蚀等性能。胶结材料的强度不应低于 30 MPa。

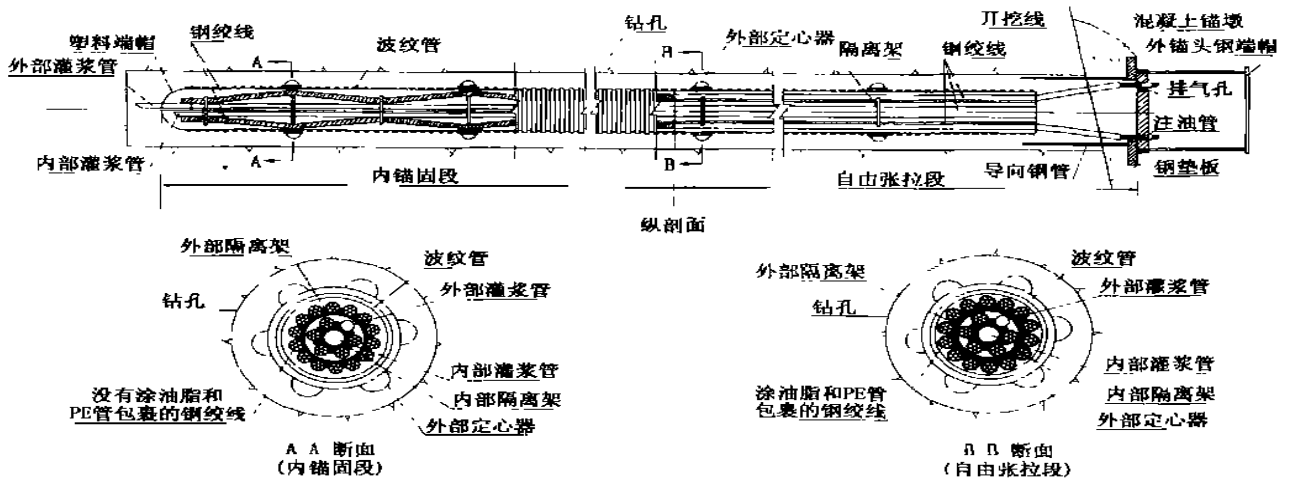


图3 小浪底工程采用的无粘结3 000 kN预应力锚索

内锚固段长度是预应力锚索设计的一个重要指标,直接影响工程造价。在岩质边坡中,吨位在1 000 kN至3 000 kN的锚索的锚固段长度在6~12 m范围。但漫湾、三峡等工程的现场拉拔试验表明,内锚固段长仅1m,锚索仍不首先在此破坏。在这方面,极有必要开展进一步的试验研究工作。

当前,预应力钢材的发展趋势是高强度、粗直径、低松弛和耐腐蚀。可分为钢丝和钢筋两大类。国家标准《预应力用钢丝》(GB5223-35)对预应力钢丝的外观与力学性能作出了规定,其抗拉强度一般要求达到 $150 \sim 170 \text{ N/mm}^2$ 。我国水利水电规范则要求钢丝或钢绞线的极限抗拉强度不小于1 400 MPa。钢绞线一般用7根钢丝在绞线机上以一根钢丝为中心螺旋拧合而成。目前,我国水电工程中采用的预应力钢绞线通常用于1 000 kN、1 200 kN和3 000 kN的预应力加固工程中。

3.4 混凝土抗滑结构

我国水电和铁道建设中,经常使用抗滑桩、抗剪洞、锚固洞等混凝土结构加固边坡,并取得较好的效果。特别是遇到风化破碎岩体时,预应力锚索不能有效地提供抗滑力,更需考虑使用抗滑桩等混凝土结构。

开挖水平洞然后回填混凝土,即形成抗剪洞或锚固洞。这些结构施工方便,因而造价低,但是,洞顶混凝土回填的质量不易保证,1989年漫湾水电站左岸发生滑坡后,发现大部分锚固洞洞顶存在空洞,施工质量难以保证。因而使用这种水平锚固

洞的工程日趋减少。垂直开挖的抗滑桩可以确保混凝土和周围岩体紧密结合,提供较大的抗滑能力,但是当桩深超过30 m后,施工难度增加,特别是在地下水位较高、岩体较破碎时,尤为困难。在漫湾电站左岸滑坡后对进口的边坡加固工程中曾采用了组合洞桩的结构。由于锚固洞具有一定的倾斜度,防止了混凝土与洞壁接合不实的可能性,同时这种组合结构受力条件远较传统悬臂结构合理,可望提供较大的抗力。

十三陵抽水蓄能电站上池西坡采用了预应力锚索和抗滑桩组合结构,即在抗滑桩的顶部设置锚索,使抗滑桩成为两端都具有固定端的结构,以提高其承载能力。

混凝土抗滑结构通常承受很大的荷载,因此钢材的配筋量较大。在天生桥二级厂房边坡的抗滑桩中,曾配以 15 kg/m 的轻轨。

4 参考文献

- 1 电力工业部西北勘测设计研究院. 岩质高边坡开挖及加固措施研究. 1995
- 2 中国水利水电科学研究院. 李家峡层状岩质高边坡控制爆破技术及减震措施研究. 1995
- 3 中国水利水电科学研究院. 李家峡层状岩质高边坡开挖爆破安全判据和控制标准研究. 1995
- 4 陈祖煜. 岩质高边坡稳定分析和软件系统. 水力发电. 1998, (1)
- 5 范中原. 岩质高边坡勘测及监测技术方法研究. 水力发电. 1998, (1)