



Stability Analyses and Slope Consolidation after Tunnel
Collapse in the Right Abutment of Changma Dam, Gansu

侯瑜京 董锋 编著

甘肃昌马水库坝址右岸山体 稳定研究及加固处理



岩土工程问题解
决方案实录丛书



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

岩土工程问题解决方案实录丛书

甘肃昌马水库坝址右岸山体 稳定研究及加固处理

**Stability Analyses and Slope Consolidation
after Tunnel Collapse in the Right Abutment
of Changma Dam, Gansu**

侯瑜京 董锋 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

岩土工程中的地质条件十分复杂,许多地质现象在工程前期勘探时无法充分揭示出来,因此在工程的设计、施工、运行的各个阶段都会出现各种各样的岩土工程问题。本书通过对水利水电工程中发生的岩土工程问题逐一进行研究,将解决问题的思路与方法供有关技术人员参考。

本书以甘肃省昌马水库排砂泄洪洞塌方后引起的坝址区右岸山体稳定为主线,详细介绍了地质调查结果、出险过程和抢险措施,确定节理岩体的抗剪强度、边坡稳定计算方法,以及在研究基础上提出的加固处理措施和稳定观测结果。

本书主要供水利水电和岩土工程技术人员,以及与边坡稳定有关的其他领域建设工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

甘肃昌马水库坝址右岸山体稳定研究及加固处理/侯瑜京,董锋编著. —北京:中国水利水电出版社,2005

(岩土工程问题解决方案实录丛书)

ISBN 7-5084-2682-7

I. 甘... II. ①侯...②董... III. 水库—岸坡—岩体加固—研究报告—甘肃省 IV. TV697.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第007311号

书 名	岩土工程问题解决方案实录丛书 甘肃昌马水库坝址右岸山体稳定研究及加固处理
作 者	侯瑜京 董锋 编著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 11印张 266千字 2插页
版 次	2005年4月第1版 2005年4月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

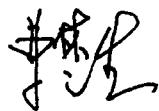
版权所有·侵权必究

序 言

1997年昌马工程右岸排砂泄洪洞正处于开工初期，我作为世界银行的咨询专家，注意到当时施工开挖存在不正常情况，提出应边开挖、边支护、边监测，如出现异常再加强支护。时过一年后的1998年11月昌马水库大坝填筑期间，上述排砂泄洪洞在贯通以后由于地质条件和施工原因发生了塌方冒顶，并且导致右岸山体表面出现多条张裂缝。如果山体失稳，将会严重影响现有枢纽工程，因此整个右岸山体的稳定引起各界的关注。中国水利水电科学研究院与各单位有关专家相互配合，经过系统的研究，用较少的处理费用解决了一个棘手难题，保证了枢纽工程建设的顺利进行，这本书真实记录了当时工程出现的问题，解决问题的方法和研究成果。

科研的目的是服务于生产实践，通过此项研究工作，也使得一些科研方法和手段得到考验。本书采用了极限平衡法、有限单元法和离散单元法分析右岸山体的稳定和变形，由于各种方法各有其优缺点，通过反映问题不同的侧重点，从而有利于全面认识山体变形和稳定的全貌。另外在解决右岸山体稳定的研究和加固过程中，科研、设计、施工和业主单位群策群力，使得研究成果更加有针对性和实用性。这些研究成果和解决问题的方法对其他类似工程建设问题也具有一定的参考价值。

安全监测不仅可以为判断工程的安全和稳定提供依据，同时也是校验各类数值分析方法和加固处理措施的最好手段。右岸山体从发现问题至今已经积累了4年多的观测资料，通过对观测资料的整理分析，说明根据此项研究成果制定的右岸山体加固措施是合理的，也说明本书给出的安全监测方式是成功的。但为保证今后水库长期安全运行，还应对山体渗流、渗压场、变形、应力等不断进行监测分析，并对可能出现的问题做出预报或预测。



2005年1月9日

前言

由于岩土工程中地质条件的复杂性，常会遇到前期勘探无法揭示的地质现象，在设计、施工和工程运行的各个阶段都会出现各种各样的岩土工程问题，其中岩石边坡的稳定是山区筑坝工程经常遇到的问题之一。对此类岩土工程问题常用的技术路线是：①地质调查，查明关键的地质现象和出现岩土工程问题的原因；②材料参数试验，确定各类相关材料的物理力学性质；③数值模拟分析，利用已确定的参数，配合相关的本构模型和数值分析方法进行计算，得出初步结论；④物理模拟分析，在条件允许的情况下进行物理模拟试验研究，比较验证数值模拟计算结果；⑤确定解决岩土工程问题的设计方案和施工措施；⑥对重要的工程部位进行安全观测以及反馈分析；⑦以及其他特殊的相关计算或试验研究。

本书以甘肃省疏勒河昌马水库排砂泄洪洞塌方后，引起的坝址区右岸山体稳定问题为主线，较为详细地介绍了地质调查结果（第2章）、隧洞塌方过程和抢险措施（第3章）以及对岩体结构面进行现场大规模的统计工作；结合断层破碎带土石材料的物理力学性质（第4章），以及岩体质量指标综合评定方法，确定出节理岩体的抗剪强度（第5章）；并采用多种计算方法进行边坡稳定分析（极限平衡法、有限元法和离散元法）（第6章）；在研究分析的基础上提出了右岸山体稳定加固处理措施（第7章），同时给出了右岸山体加固后的变形和稳定观测结果（第8章），以及水库大坝运行后排砂泄洪洞放空试验结果（第9章）。该项研究工作较为系统地分析解决了排砂泄洪洞塌方后引起的右岸山体稳定问题，在隧洞抢险加固措施、山体加固方法和分析研究手段等方面也有其独到之处，因此对于今后解决类似的岩土工程问题具有一定的借鉴意义和参考价值。

参加本书编写的有从事该工程建设研究、设计、施工和管理的多个单位（中国水利水电科学研究院、甘肃省水利水电勘测设计研究院、甘肃水电建筑工程公司、甘肃省河西走廊（疏勒河）农业灌溉暨移民安置综合开发建设管理局，及清华大学等），受编委会的委托，本书由侯瑜京、董锋统编，分章节

编写：第一章（董锋 柴绍豪 刘强）；第二章（王开湘 马为民）；第三章（刘强 唐新民 闫自珍）；第四章（陈祖煜 贾志新）；第五章（王昆耀 侯瑜京）；第六章（张丙印 杨健 侯瑜京）；第七章（赵广玉 董锋 吕生玺）；第八章（侯瑜京 李作成）；第九章（杨健 袁培进）。

限于编者水平，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2004 年 10 月

目 录

序 言

前 言

1	概述	1
1.1	昌马水库枢纽工程概述	1
1.2	昌马水库排砂泄洪洞塌方处理概况	4
1.3	昌马水库右岸高边坡稳定问题及主要研究内容	5
2	昌马水库及坝址右岸边坡工程地质	6
2.1	区域地质概况	6
2.2	坝址区工程地质条件	11
2.3	影响坝址右岸边坡变形的主要因素	25
3	排砂泄洪洞塌方及处理措施	29
3.1	排砂泄洪洞塌方实录	29
3.2	抢险加固措施	30
3.3	管棚法设计施工技术	31
3.4	小结	36
4	右岸断层充填料静动力试验研究	37
4.1	概述	37
4.2	基本物理力学性质试验研究	37
4.3	静力三轴试验	40
4.4	邓肯—张模型参数	43
4.5	动力三轴试验	45
4.6	小结	50
5	岩体结构面及综合抗剪强度	51
5.1	结构面现场统计及其分组	51
5.2	结构面几何参数统计分析	52
5.3	边坡失稳模式初步判断	54
5.4	右岸边坡岩体结构面网络模拟	55
5.5	右岸边坡节理岩体连通率计算成果	56

5.6	层状岩体块体离散及倾倒分析地质概化模型的建立	56
5.7	岩体强度综合分析	57
5.8	小结	61
6	坝址右岸高边坡稳定性分析	63
6.1	边坡平面抗滑、抗倾稳定分析研究	63
6.2	边坡有限单元法分析	68
6.3	边坡离散元法分析	79
6.4	小结	100
7	右岸山体加固及排砂泄洪洞设计修改	102
7.1	加固的必要性	102
7.2	右岸山体加固方案的比选	103
7.3	排砂泄洪洞设计及修改	112
7.4	小结	121
8	右岸边坡监测及资料分析	122
8.1	边坡监测的目的和意义	122
8.2	边坡监测内容	122
8.3	监测仪器布置与埋设	124
8.4	主要监测仪器	128
8.5	边坡监测软件	131
8.6	监测结果分析	134
8.7	小结	145
9	排砂泄洪洞放空试验及分析	146
9.1	主要研究内容	146
9.2	排砂泄洪洞放空试验现场监测	146
9.3	监测成果及分析	148
9.4	排砂泄洪洞放空试验三维有限元数值模拟	153
9.5	排砂泄洪洞放空后现场检查	158
9.6	小结	159
附录 A	边坡稳定分析的改进 Sarma 法	160
参考文献		169



概述

1.1 昌马水库枢纽工程概述

1.1.1 枢纽布置及主要建筑物设计参数

昌马水库位于河西走廊玉门市境内疏勒河昌马峡进口下游 1.36km 处，距兰新铁路玉门镇车站 54km。这是一座以农业灌溉为主，兼顾工业供水、水力发电等多目标的水利枢纽工程。疏勒河为内陆河流，坝址以上流域面积 13250km²。水库总库容 1.934 亿 m³，正常蓄水位库容 1.8 亿 m³，属大（二）型水库。根据 SC252—2000《水利水电工程等级划分及洪水标准》规定，应为 II 等工程，主要建筑物如拦河大坝、排砂泄洪洞及溢洪道按 2 级设计，引水发电洞及发电厂房按 4 级设计。防洪标准为百年一遇洪水设计，洪峰流量 1620m³/s；2000 年一遇洪水校核，洪峰流量 2960m³/s。地震基本烈度为 8 度。

昌马水库是甘肃省河西走廊（疏勒河）农业灌溉暨移民安置综合开发建设项目的龙头工程。疏勒河项目是国家和甘肃省的重点建设项目，由世界银行（贷款 1.5 亿美元）、水利部、甘肃省和地方共同出资建设，总投资 26.97 亿元人民币（其中昌马水库 4.12 亿元人民币），项目的主要任务是将甘肃省中部和南部 11 个贫困县的 20 万贫困人口移至项目区，使他们脱贫致富。为此，在项目区昌马、双塔和花海灌区将新开垦灌溉面积 81.9 万亩，建设配套的渠路林田体系和移民社区服务设施，以及农业技术、良种繁育等服务体系。

水库建成后，与下游双塔水库和跨流域赤金峡水库联合运行，统一调度，能比较充分地调节疏勒河天然径流，提高现有 65.4 万亩的灌溉保证率，同时可新增灌溉面积 81.9 万亩，并提供工业用水 0.8275 亿 m³。水电站装机容量为 14.25MW，年发电量 6609 万 kWh，兼有较好的社会效益及生态效益。

枢纽建筑物包括壤土心墙砂砾石坝、溢洪道、引水发电系统及电站厂房、排砂泄洪洞等。原工程枢纽布置见图 1-1。

拦河大坝为壤土心墙砂砾石坝，大坝断面布置见图 1-2，最大坝高 54.8m，坝顶高程 2004.8m，坝顶长度 365.5m，坝顶宽度 9m。上游坡有两级马道，坝坡自下而上逐级变陡。分别为 1:3.50，1:3.00 和 1:2.75，距坝顶 4m 以上为 1:2.15。下游坡面设有三级马

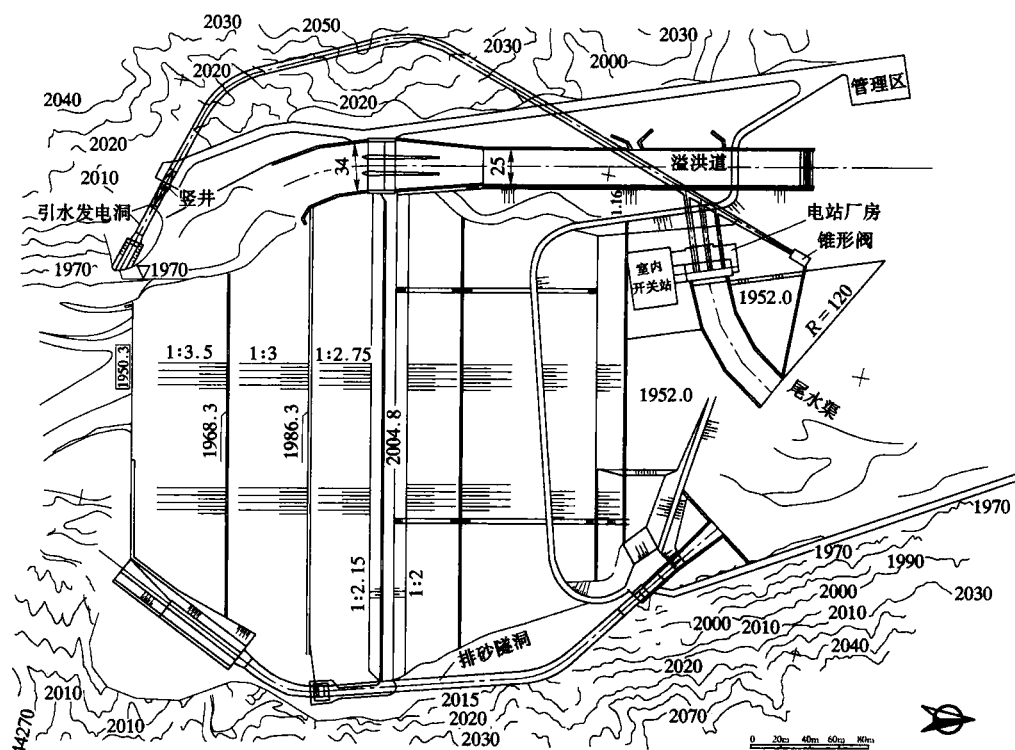


图 1-1 昌马水库枢纽布置图

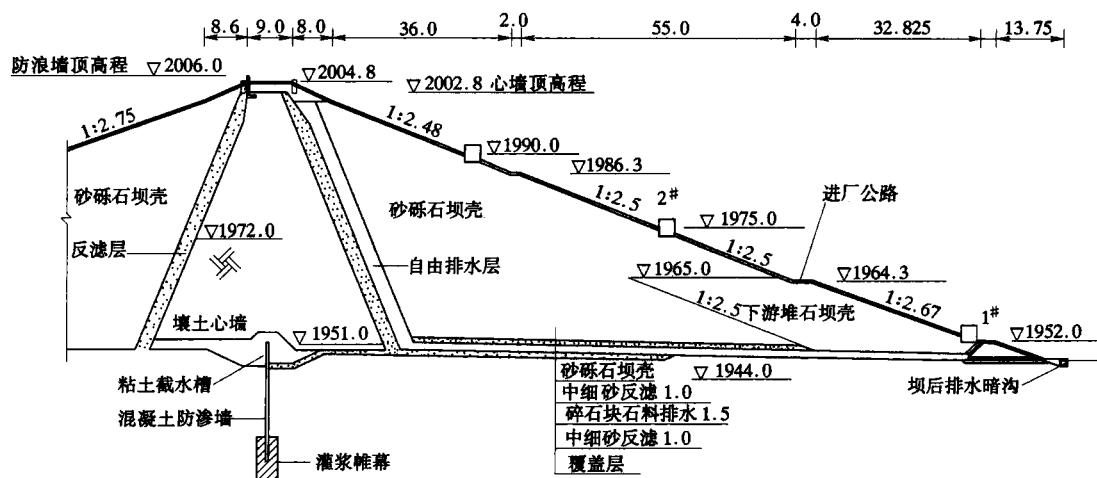


图 1-2 昌马水库大坝断面图 (单位: m)

道,坡比自下而上依次为1:2.75、1:2.63~2.70、1:2.50和1:2.48,距坝顶4m以上为1:2.00。坝顶设有防浪墙,高4.5m,外露部分高1.2m;伸入心墙深度为1.3m。防渗心墙土料为黄土,分类属粉质壤土,少量轻壤土及粉质粘土。根据土料性质及抗震要求,设计采用厚心墙,心墙上游坡为1:0.17~0.40,下游坡为1:0.40。坝壳为河床冲积砂砾石料

及弃料。坝基河床冲积层用机械和人工混凝土防渗墙做防渗处理,基岩布置帷幕灌浆。大坝土石方开挖量约 40 万 m^3 ,填筑量为 245.5 万 m^3 。

溢洪道位于左岸,系开敞式溢洪道,由引渠、WES 溢流堰、池槽及挑流鼻坎等所组成,堰顶高程 1993.3m,堰后池槽长度 306.25m,池槽末端采用挑流消能,最大流速 24m/s,设计及校核洪水泄量分别为 $579\text{m}^3/\text{s}$ 、 $1570\text{m}^3/\text{s}$ 。闸门为弧形工作门,3 孔,尺寸为 $10\text{m}\times 8\text{m}$ (宽 $\times$ 高),卷扬式启闭机操作。按照世界银行专家组建议,在工作闸门前预留了平板检修门槽。

引水发电系统位于左岸,包括进水口、输水洞、检修塔、锥形阀、发电厂房、尾水渠和开关站等。输水发电洞进口高程 1970.0m,洞径 5.5m,为圆形有压洞,洞长 499m,不设调压井,最大输水流量 $65\text{m}^3/\text{s}$ 。发电进水口段由进口固定式拦污栅、隧洞、检修闸门及渐变段组成;事故检修门为平板钢闸门,孔口尺寸为 $4.5\text{m}\times 4.5\text{m}$,采用卷扬式启闭机操作。发电厂房位于坝后左岸河床上,主厂房尺寸为 $40.7\text{m}\times 13.5\text{m}\times 10.6\text{m}$,安装 3 台混流立式水轮发电机组。总装机容量 14.25MW。发电洞末端安装一台直径 2m 的锥形阀,用于机组停运期间,保证灌溉用水的下泄。

排砂泄洪洞布置在右岸山体中,为圆形有压隧洞,洞径 10m,隧洞长 298m,进口高程 1951.0m,出口高程 1947.0m,钢筋混凝土衬砌,最大衬砌厚度 1.2m,隧洞前部设检修闸门,后设工作闸门,设计洪水泄流量为 $392\text{m}^3/\text{s}$,洞出口最大流速 24.2m/s。

1.1.2 工程前期准备及施工过程

昌马水库工程早在 1963 年就开始勘测设计工作,并在 1968 年开工建设,后因故停工。1991 年疏勒河项目作为甘肃省的扶贫项目由世界银行提供低息贷款兴建,昌马水库作为项目的关键工程,按照建设程序重新开始前期准备工作,1992 年提出可行性研究报告,同年 8 月通过水利部规划设计总院审查,根据审查意见补充进行了地质勘探工作,于 1995 年 3 月提出初步设计报告,同年 11 月通过了水利部规划设计总院审查。1996 年随着疏勒河项目的全面开工建设,昌马水库工程作为项目的控制性骨干工程,一直被建设者视为重中之重,根据我国基本建设的有关法规和世界银行的采购指南,昌马水库工程被列为采用国际竞争性招标的发包项目 (ICB)。1997 年 5 月完成招标文件编制,随后按照规定程序完成国际招标工作,并于 1997 年 9 月 30 日正式开工。

根据施工组织设计和招标文件技术规范要求,排砂泄洪洞是昌马水库施工网络中的控制性工程,应首先开始施工,同时填筑右岸围堰,开始右岸基础和坝体施工,在 1998 年 10 月 30 日前,排砂泄洪洞达到过流条件,洞身和检修闸门井衬砌完毕,水下部分完工。截流以后,排砂泄洪洞作为施工导流洞发挥作用。到 1999 年汛期前,左岸基础完工,坝体全断面达到 1986m,即 20 年一遇施工期洪水拦洪高程,2000 年坝体达到设计高程,2001 年 10 月底溢洪道和电站投入运行,昌马水库工程全部建成。

施工过程为:1997 年 12 月排砂泄洪洞开始施工,同时填筑右岸上下游及纵向围堰;1998 年 5 月右岸围堰填筑完成,并完成右岸基础开挖,开始混凝土防渗墙施工,溢洪道亦开始开挖;1998 年 10 月 16 日排砂泄洪洞开挖全线贯通,同时隧洞出口完成洞身全断面钢筋混凝土衬砌 40m,右岸水下混凝土防渗墙完成 1/2 ($0+300\sim 0+225\text{m}$)。1998 年

图 1-3 昌马水库右岸泄洪洞塌方段示意图 (沿洞轴线)

1.2 昌马水库排砂泄洪洞塌方处理概况

根据专家的意见和建议,疏勒河建设管理局结合实际情况提出了处理隧洞塌方治理右岸山体稳定的初步措施。治理措施分为三个步骤:首先由施工单位对未塌方洞段进行抢险加固,从闸门井平台处向塌方体空穴填充混凝土约 2223m^3 ,对塌方洞段两端进行封堵,防止塌方进一步扩大,该项措施自 1998 年 11 月 27 日至 12 月 25 日完成,初步阻止了塌方沿洞轴线向上下游的扩展;第二步采用水泥浆对洞内塌方体进行固结灌浆,局部采用了灌水泥砂浆、现浇素混凝土拱圈、加固钢拱架、喷混凝土、挂钢筋网等抢险措施(1999 年 5 月 10 日至 10 月 10 日完成);待松散塌落岩体具有了一定强度后,采用管棚法和新奥法施工,重新贯通隧洞(1999 年 9 月 16 日至 2000 年 4 月 2 日完成)。

大体积塌方使得原来受多条断层切割的岩体产生松动,更加破碎,破坏了原设计隧洞的围岩条件,原竖井位置右侧的山坡上出现了多条裂缝,直接威胁到井身的安全,因此对于原排砂泄洪洞设计方案需要进行修改,经过设计比较,将原竖井方案修改为在排砂洞进口处修建事故检修塔和工作桥;将洞内塌方段混凝土衬砌厚度由原来的 60cm 改为 100~120cm,混凝土标号由原设计的 C20 和 C50 改为 C60,增加了混凝土内的钢筋用量;增加了洞内固结灌浆,并增设了洞内永久变形观测仪器。修改方案报原审批单位水利部水利水电规划设计总院审批。同时对隧洞塌方后右岸山体的稳定问题,进行分析研究并提出处理方案。

1.3 昌马水库右岸高边坡稳定问题及主要研究内容

泄洪排砂洞的塌方对坝址右岸山体稳定造成很大威胁。右岸山体是否稳定，现坝址能否成立，山体能否进行加固处理且费用如何，诸多问题尖锐地摆到建设者们的面前，为此，在对塌方隧洞进行处理的同时，1999年10月甘肃省疏勒河建设管理局委托中国水利水电科学研究院对右岸山体稳定进行分析研究，并提出对右岸山体的加固处理方案。研究工作内容主要包括：①右岸山体断层破碎带土石材料的物理力学性质；②对岩体结构面进行现场统计工作，应用概率方法总结主要结构面的概型和相应的统计参数；③根据岩体结构面和开挖面倾向的相互关系判断边坡岩体的失稳模式；④按照南非体系对岩体质量指标RMR值进行综合评定，进而应用霍克—布朗准则确定节理岩体的抗剪强度；⑤应用计算机网络模拟技术，分析岩体的连通率，确定节理岩体的抗剪强度；⑥边坡稳定分析（极限平衡法、有限元法和离散元法）；⑦右岸山体稳定加固措施分析研究；⑧观测坝址区右岸山体的变形；⑨排砂泄洪洞放空试验。

经过认真细致的研究工作，2000年8月基本完成了昌马水库枢纽工程坝址右岸边坡稳定和加固措施研究，提交了《大坝右岸排砂洞塌方段岩体加固设计报告》，该成果排除了右岸山体存在大规模深层滑动的可能性，确认了现坝址存在的合理性，提出了对可能出现的山体坡脚滑动的处理措施和方案，即对右岸山体坡脚存在的小型断层、裂隙、溶蚀、空穴等，采用水泥固结灌浆，使该部位的不利结构面得到充填和加固，从而满足稳定要求。从检查孔揭示的水泥结石状况以及观测资料分析结果，证明灌浆加固效果良好，达到了预期的目的。本项研究工作较为详细地记录了在昌马水库建设中由于隧洞塌方引起的工程问题，并从一个侧面反映了参加工程建设的各单位和专家咨询人员群策群力，提出了经济合理的处理方案和措施，从而保证了大坝建设的顺利进行。

昌马水库大坝已经通过蓄水考验，其间排砂泄洪洞及右岸山体经过了多次蓄水及水库放空的循环，初步证明了在隧洞塌方后采取的处理措施行之有效。其中一些研究方法和加固处理措施，可以为今后类似的岩土工程问题所参考借鉴。



昌马水库及坝址右岸边坡工程地质

2.1 区域地质概况

昌马水库坝址右岸山体，位于奥陶系灰岩与凝灰质岩层构成的倾伏倒转背斜的剧烈倒转翼，以及褶皱发育的复合部位。特有的构造条件使岩层扭曲剧烈，层间错动频繁，右坝肩 2055~2090m 高程以下倾向 NE（岸里）、2055~2090m 高程以上岩层倾向 SW（岸外），倾角大于地面边坡角；断层显著发育，个别断层规模较大而且延伸较长，这些复杂的地质构造，构成了坝址右岸的基本地质条件。由于岸坡岩体内部应力释放、风化、岩体自重、冰川、地震（坝址区基本烈度 8 度）等作用，表浅层岩体及断裂受到一定程度的变形破坏，加上地下水的活动及岸坡上的崩坡积堆积物及孤危石等，这些特有的、复杂的地质构造成为造成不良工程地质问题的诱因。排砂泄洪洞塌方以后，使得右岸工程地质条件更加复杂化，因此有必要对昌马水库库区以及坝址右岸的工程地质条件进行详细的调查分析。

2.1.1 区域地质及河谷发展简史

根据大区域勘探资料，前寒武纪末，受构造运动作用，地层褶皱变质，两翼沉降，形成南、北祁连地槽，自寒武纪起，沉积了巨厚的地槽相各时代地层，地壳极不稳定，沉积了灰岩和一套海底喷发的火山碎屑岩建造，相互成层，后期地壳逐渐趋于稳定并上升，沉积了巨厚的碎屑岩（砂岩、页岩）。

昌马河的发生、发展与冰川活动有着紧密联系。由于新构造运动上升与冰雪自重的逐日增大，产生了大型冰川活动，冰川沿断层等软弱地带向两侧运动，结果形成两个相背的大冰斗，冰川的向源侵蚀，切断了山脉，形成昌马峡谷的初态。中上更新世时，气候再度降低，本区又为冰雪沉积的场所，上更新世末期，即间冰期，在冰川的槽谷内水流贯通，形成昌马河。第三期冰川作用的结果，最后造成今日昌马河之景观。

典型的冰斗地形位于硫磺沟内（图 2-1），呈座椅式，长 2000m，最宽处 1900m，而沟口宽则不到 20m，后缘高程 2700m，沟脑与沟口的相对高差达 700m，在宽大的腹部可以看到三次冰川活动的遗迹，第一次冰川活动的规模最大，造成了现在地形的轮廓；第二次活动时产生了三级基岩凹地，以最高的一级较发育，长 900m，宽 300~500m，横坎比凹地的最低处高 20~50m；第三次的规模较小，但保留的较完整，有两条糖葫芦状冲沟，

从沟的纵向看有 4~5 个基岩凹地及横坎,横剖面呈 U 形,在沟壁及沟底的基岩上见磨光面和顺沟向的冰川刻痕。硫磺沟冰斗的西侧为昌马峡上段冰斗,其间为高而且窄长、象墙壁一样陡立的鳍脊。

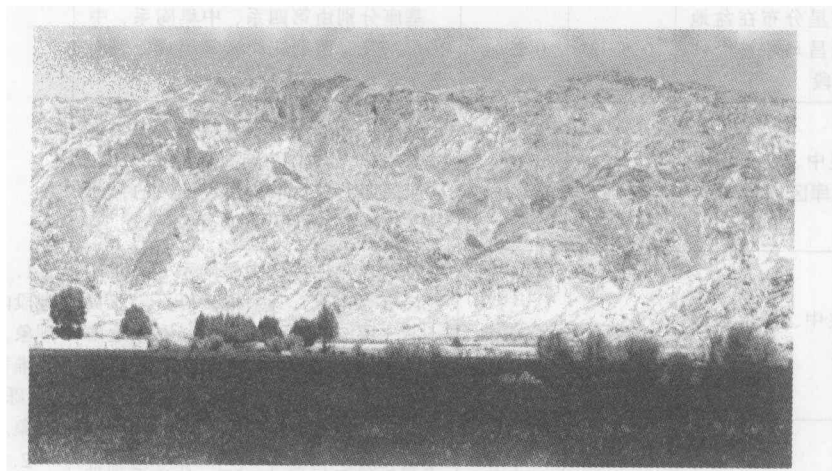


图 2-1 昌马水库坝址区右岸硫磺沟冰斗全貌

2.1.2 地貌及物理地质现象

本区地貌单元,按成因类型可分为盆地区和中山峡谷区。前者在地形上为良好的蓄水盆地,后者提供了筑坝的天然条件。该区属新生代的昌马断陷盆地,主要由白垩系、第三系、第四系地层所组成,岩性为砂岩、砾岩及页岩等。地形坡度一般小于 15° ,海拔在 1950~2300m,相对高程 100m 以上。该区发育有 IX 级阶地,但冰川刨蚀地形常与河流阶地混淆。各级侵蚀堆积阶地见表 2-1。

本区的各系地层均经历了多次构造运动的影响,褶皱及断裂极其发育,岩体被切割而破碎,新构造运动及地震又强烈地改造着地形地貌,加之第四纪以来冰川的拖曳与刨蚀、河流的冲切及地表岩层的风化,原始地形改造较剧烈,促使了物理地质现象的发育。

2.1.3 地层岩性

库区南~北 230km,东~南 250km 范围出露的地层从老到新有:前震旦系、寒武系、奥陶系、志留系的变质岩,石炭系、侏罗系、白垩系、第三系沉积岩和第四系松散堆积物。本区还有加里东期、海西期的火成岩活动(图 2-2)。坝址区出露奥陶系的地层,为浅变质的碳酸盐岩及火山碎屑岩。

加里东期侵入岩主要分布于鹰嘴山、青山、昌马峡出口处。早期有较大规模的海底火山喷发,中、晚期则有岩浆侵入活动。岩性有斜长花岗岩、闪长岩、闪长闪长岩、石英闪长岩等。海西晚期侵入岩主要分布于照壁山北麓及节子沟一带,沿阿尔金山北麓断裂(F_3)侵入于石炭系、志留系中。主要岩性有石英闪长岩、花岗岩、花岗闪长岩等。侵入岩中见有石英脉、花岗岩脉及伟晶岩贯入。

表 2-1

河流阶地特性表

阶地 级数	分布位置	相对河床高度(m)		阶地结构组成物及特征	备 注
		台面	侵蚀面		
I	零星分布在盆地区及昌马峡整个峡谷地段	0.5~3	0.2~1	基座分别由第四系、中奥陶系、中志留系及海西期花岗岩等组成, 表面有小于 0.5m 的砂砾石层	1. 侵蚀面在局部地段内有向岸内倾斜现象。砂砾石底部往往堆积巨大的块石、或砾石被压碎等现象。 2. 侵蚀面起伏不平, 特别是 II、IV 级阶地, 往往在同级阶地内部形成 2~5m 的台坎。 3. 台面大部分地段内堆积了坡洪积物, 因而造成同级阶地台面高差较大
II	峡中、峡上段右岸及库区	7~14	5~10	基座由第四系、中奥陶系、中志留系等组成, 其上砂砾石层厚 2~4m, 由于后期洪积物堆积使近山区的台面显著增高, 基岩侵蚀面起伏不平	
III	峡中、峡上段及库区	7~18	16~24	基座由第四系、中奥陶系、海西期花岗岩等组成, 其上覆砂砾石层及黄土状土厚 2~6m, 该级阶地在盆地内广泛发育, 台面平坦, 但局部高差很大	
IV	主要分布在昌马峡左岸及库区	31~38	27~30	基座由中奥陶系及中志留系组成, 上覆砂砾石层厚 4~8m。在选定坝址右岸, 该阶地地形提供天然的溢洪道位置, 基岩侵蚀面起伏不平, 可见几级小台坎	
V	昌马峡	34~43	32~37	基座由中奥陶系、中志留系组成, 上覆砂砾石层厚 2~4m	
VI	昌马峡中及峡出口	56~65	50~60	基座由中奥陶系及中志留系、少许海西期花岗岩组成, 砂砾石层厚 2~6m	
VII	昌马峡中及峡出口	73~78	68~77	基座由中奥陶系、中志留系组成, 上覆砂砾石层厚 3~10m	
VIII	昌马峡口及坝址左岸上部山头	122~155	120~155	基座在峡进口段及选定坝址为中奥陶系, 峡中至出口段右岸为中志留系组成, 砂砾石层厚 0~2m	
IX	昌马峡进口左岸	209	208	基座为中奥陶系组成, 上部有厚度小于 0.5m 的砾	

2.1.4 地质构造及地震

从大地构造单元上看, 本区属北祁连山加里东期褶皱带西段。本区整体构造运动比较活跃, 主要表现为整体升降运动的垂直差异活动和老构造线部分地段的继承性活动, 形成走廊凹陷区、祁连山断块隆起区和昌马山间断陷盆地及继承性断裂的发育特征 (表 2-2)。

本区在各期构造运动的作用下, 断裂活动相当发育。加里东期多形成北西向断层。而海西期、燕山期、喜马拉雅期断裂发育方向趋于一致, 多为近东西向断层。老断层在后期构造运动的影响下, 复合、改造、叠加, 呈继承性活动, 使本区断层、岩层更趋于多样化和复杂化。

表 2-2 区域断层发育特征表

分组	产 状	各组断层简述	主要代表性断层	分布位置	距坝址 区距离	延伸情况 及长度 (km)	破碎带宽度及充填物
一	NW320°~345° NE/65°~85°	主要分布于 F ₁ 、F ₂ 断层间,在坝址区最发育,一般顺河延伸,构成岩层分界线	河床 F ₃₀ 、F ₂₅ ,左坝肩 F ₈₀ ,右坝肩 F ₁₂₁ ,均属逆断层	坝址区		向上游交于 F ₁ ,长 1~4km	一般宽 2~4m,最宽 15m 左右,最窄 0.1m,见有糜棱岩,角砾岩及断层泥
二	NW275°~295° NE/35°~80°	该组断层主要为区域性,控制性多发性大断层,与此同时相平行的次一级断层也相继形成	F ₁ 断层在 100 余米以下倾角变缓,为逆掩性质的断层,总体走向 NW275°	东起青山顶大口,西经照壁山南麓,水峡口中段,穿过库区	1.36km	波状延伸长 24km	宽 10m 左右,最宽 50~70m,充填断层角砾岩、岩块、岩屑与黑色、杂色断层泥
			F ₂ 工作区附近走向北西西,断层与 F ₁ 直交	西经照壁山,黑大板山,车路沟山,石人子山北麓至巴个峡附近	2.9km	由 NW325° 转 NE85° 延伸长 41km	一般宽 5~10m,最宽 40~50m,充填断层角砾岩、糜棱岩及红色断层泥
			F ₃ 断层总体走向近东西,表现出直滑兼逆冲性质	距坝址较近的是红口子煤窑~赤金堡断层段	6km	延伸长约数百公里	宽 8~20m,最宽 30~40m,充填角砾岩、糜棱岩及断层泥
			F ₅ 断层属北祁连山断裂系西段北支带,为左旋直滑为主兼有逆冲	断层西起子沟山东麓,东经香毛北麓,至大泉向东奥柳沟	17km	NW295° 波状延伸 126km	一般宽 4~10m,充填钙质角砾岩,黄、绿、白糜棱岩,局部有煤线及石膏
三	NE40°~70° NW/51°~80° 或 SE/60°~80°	以平推断层为主,逆冲断层次之,分布于峡区或库区老地层之中	F ₇ 产状 NW290° SW/420~700,为河西走廊南缘断裂成员	东起早峡沟,西至柳沟煤矿为 F ₃ 断层所截	7.2km	波状延伸长 32km	宽 600m,糜棱岩、角砾岩,构造透镜体及断层泥
			F ₄ 昌马河东岸,断层出露较多。延伸长 3km、NE25° NW/70°~80°	北与 F ₁ 断层斜接,南至西湾北	2.6km	NE55°,舒缓波状延伸长 17km	宽 10~15m,其中强烈挤压片理化宽 1~1.5m 伸近断层附近,砾石定向排列。断层面平直、光滑
四	NE5°~20° NW (或 SE) /35°~80°	为逆断层或正断层	F ₆ 一般产状 NE38°~62° NW/36°~54°,该断层的北端交于 F ₁ 之上	该断层位于昌马水库坝址西南	3.3km	由 NE46° 转 NW334°,从南向北东突出的弧形延伸 7km	宽 15~20m,充填断层角砾岩、糜棱岩及紫红色断层泥
			分布数十条断层,规模较小	分布于库区周围古老岩层之中		延伸不长	宽 0.2~1m