



新疆下坂地水利枢纽工程系列丛书

深厚覆盖层 坝基防渗设计与施工

黄小宁 覃新闻 彭立新 王廷勇 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



新疆下坂地水利枢纽工程系列丛书

深厚覆盖层 坝基防渗设计与施工

黄小宁 覃新闻 彭立新 王廷勇 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是“新疆下坂地水利枢纽工程系列丛书”之一，由参与下坂地水利枢纽工程坝基防渗建设的相关专家从工程技术角度出发，对高原寒冷及深厚覆盖层上进行坝基防渗处理所采取的重要设计方案、解决的主要难题进行了系统总结，主要介绍了深厚覆盖层上防渗形式的选择及坝型比选、现场防渗试验方案的论证、85m深防渗墙下接65m深砂砾石帷幕灌浆的施工工艺、质量控制、安全监测设计及成果分析等内容。本书图、文、表、照片并茂，内容丰富，语言平实，着重于工程纪实，对高山峡谷地区深厚覆盖层的防渗处理设计与施工具有重要的参考价值。

本书可供水利水电行业技术人员阅读使用，也可供相关专业的研究人员和相近专业的技术人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

深厚覆盖层坝基防渗设计与施工 / 黄小宁等著. --
北京：中国水利水电出版社，2011.9
(新疆下坂地水利枢纽工程系列丛书)
ISBN 978-7-5084-9054-0

I. ①深… II. ①黄… III. ①覆盖层技术—坝基—防
渗工程 IV. ①TV64

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第203676号

书 名	新疆下坂地水利枢纽工程系列丛书 深厚覆盖层坝基防渗设计与施工
作 者	黄小宁 覃新闻 彭立新 王廷勇 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10印张 237千字
版 次	2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	36.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《深厚覆盖层坝基防渗设计与施工》

编写组

顾问：关志诚 杨晓东

组长：覃新闻

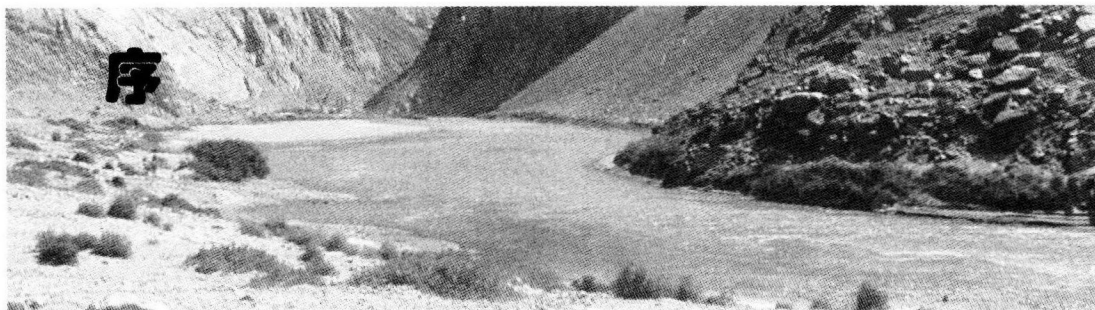
副组长：彭立新 黄小宁 樊曙光 王廷勇

主要撰写人员：黄小宁 王廷勇 杨西林 周春选

龚木金 金益刚 郑亚平 王继柏

陈 斌 戴灿伟 哈德尔·阿布都哈力克

王长征 李阳红



随着我国水利水电工程开发与建设进程，土石坝深厚覆盖层防渗技术已成为许多高坝建设中最可行的实施方案，已经取得的建设成果令世人瞩目。如四川冶勒沥清混凝土心墙砂砾石坝（坝高125.5m）覆盖层深达420m，建设的悬挂式混凝土防渗结构达140m。新疆下坂地水利枢纽工程地处帕米尔高原、高寒缺氧、工程区地震基本烈度达Ⅷ度，其深厚覆盖层厚达150m，与冶勒相比地层构造更为复杂，覆盖层主要以漂石、块石、砂砾石与砂层透镜体组成。该防渗墙施工过程中处理的超大孤石、松散砂层和架空构造在中外坝工坝基处理是极为罕见的，对设计与施工技术水平提出了更高要求和挑战。

针对下坂地水利枢纽工程大坝覆盖层的特点，在前期工程论证方面，设计单位开展了大量勘探和试验工作，对防渗措施进行了多方案论证比选，最终提出并选用了上墙下幕设计方案，获得了国内同行专家的认可。2003年进行的现场试验，在技术上以100m的预埋灌浆管深度、72.7m的接头管起拔深度、102m的墙体深度和160m砂砾石帷幕灌浆深度创下当年四项全国第一。试验过程中在施工设备配置与工艺、灌浆浆液性能，以及验证砂砾层灌浆参数等重大技术难题，取得成功和获得宝贵经验。同时也经历了塌槽、补墙、边坡接触带处理等问题。

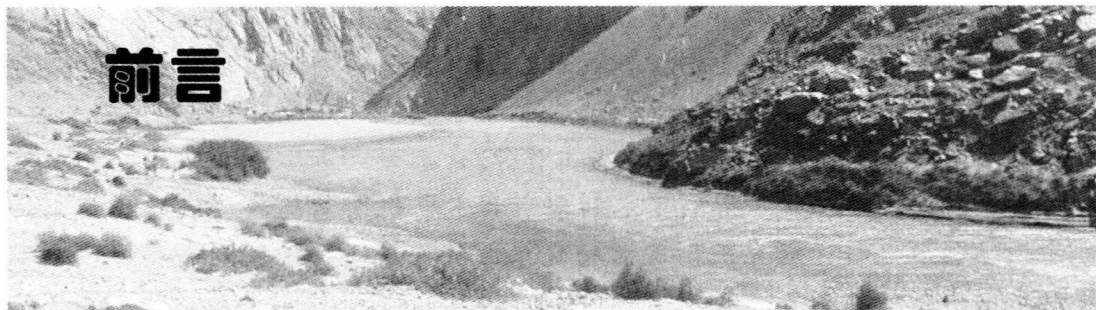
为总结我国坝工建设中复杂地层基础防渗处理建设经验，下坂地水利枢纽工程建设管理局，组织参加下坂地水利枢纽工程建设的设计、施工、监理和科研单位，编写了新疆下坂地水利枢纽工程《深厚覆盖层坝基防渗设计与施工》一书，是一件非常有意义的事，可供目前在建和正在设计过程中的同类工程参考和借鉴。

希望该书的出版，为推动基础处理工程技术发展起到积极有益的作用。

黄云鹄

2011年2月于北京

前言



下坂地水利枢纽工程地处新疆昆仑山南麓帕米尔高原的塔什库尔干河上，工程所在地海拔 3000m，河谷狭窄两岸山高坡陡，年降水量只有 40mm，天然植被稀少，空气含氧量仅为平原的 60%，昼夜气温差值达 20℃左右，河谷瞬间风力达 8 级左右，自然环境十分恶劣。地质条件十分复杂，两岸山体岩石破碎，坝址覆盖层厚度达 150m，且地层结构复杂，被人形象地称为“三高一深”，即高边坡、高海拔、高地震烈度（基本烈度Ⅷ度）、深覆盖层的工程特点。工程距离最近的城镇塔什库尔干塔吉克自治县约 60km，在这种环境下进行水利工程施工，给下坂地水利枢纽工程的建设无论从工程技术还是施工生活条件，都带来了极为罕见的困难。

自 2005 年来，参与下坂地水利枢纽工程建设管理局的精心组织下，经过全体建设者刻苦钻研，在国内首创，在极为复杂的地质结构层上筑成了 150m 的垂直防渗墙（上墙下幕）和在高原寒冷地区修建了碾压式沥青混凝土心墙砂砾石坝，并通过工程实践总结出了一套适应于高边坡、高海拔、高地震烈度的施工组织经验，为今后在同类地区进行拦河大坝深厚覆盖层的防渗处理提供了宝贵经验。

为使从事水利水电行业工程建设的同行们，能较好地参考和借鉴下坂地工程建设的经验教训，下坂地工程建设管理局组织参加工程设计、施工、监理和科研的单位撰写了《深厚覆盖层坝基防渗设计与施工》一书。该书是对国内首个在深厚覆盖层，且极为复杂地质结构层上筑成了 150m 的垂直防渗墙（上墙下幕）的技术总结，希望能为今后在此内地区进行深厚覆盖层防渗处理起到积极的参考作用。参加本书撰写的单位和人员有：第一章、第二章、第三章由陕西省水利电力勘测设计研究院杨西林、周春选撰写；第四章、第五章、第六章由中国水利水电基础工程局有限公司龚木金、金益刚，中国葛洲坝集

团水利水电基础公司王继柏、陈斌，中国水利水电科学研究院郑亚平共同撰写；第七章由新疆水利水电科学研究院戴灿伟撰写；新疆下坂地工程建设管理局黄小宁、王廷勇对全书进行了统稿，哈德尔·阿布都哈力克、王长征、李阳红参与了本书照片的整理和审查工作。

此书在撰写过程中，得到了水利部水利水电规划总院教授级高工关志诚和中国水利水电科学研究院副院长杨晓东、教授级高工的关心和指导，中国水利水电出版社对本书的出版给予了大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

新疆下坂地水利枢纽工程系列丛书编写组

2011年1月

目 录

序

前言

第一章 工程概况	1
第一节 地理位置及水文气象	1
第二节 工程任务及规模	1
第三节 工程特点	3
第二章 工程地质及其特点	4
第一节 区域地质构造	4
第二节 坝址区工程地质条件	5
第三节 工程地质特点	10
第三章 深厚覆盖层防渗设计	12
第一节 防渗形式	12
第二节 防渗形式选定	15
第三节 垂直防渗设计	28
第四节 防渗墙主要设计指标	33
第五节 覆盖层灌浆设计主要指标	34
第六节 结论	36
第四章 坝基垂直防渗试验	37
第一节 试验目的	37
第二节 试验段的布置	37
第三节 防渗墙试验施工	38
第四节 帷幕灌浆试验施工	65
第五节 结论	92
第五章 混凝土防渗墙施工	93
第一节 地质复勘	93
第二节 成槽施工	94
第三节 预埋件施工	98
第四节 接头施工	99
第五节 混凝土浇筑	101
第六节 特殊情况处理	104

第七节	质量检查	106
第八节	结论	111
第六章	覆盖层灌浆	113
第一节	施工设备	113
第二节	泥浆制备	113
第三节	钻孔	117
第四节	灌浆	117
第五节	特殊情况处理	122
第六节	质量检查	123
第七节	成果分析	124
第七章	安全监测	129
第一节	设计原则及目的	129
第二节	监测项目和测点仪器布置	129
第三节	仪器率定和埋设	131
第四节	施工期及初蓄期监测成果分析	136
结束语		149
参考文献		150

第一章 工程概况

第一节 地理位置及水文气象

下坂地水利枢纽工程位于新疆南部的帕米尔高原，在塔什库尔干塔吉克自治县境内的塔什库尔干河中下游，距塔什库尔干塔吉克自治县 60km，距喀什市 315km。

下坂地水库是塔什库尔干河梯级规划中的龙头水库。塔什库尔干河是塔里木河源流叶尔羌河的主要支流之一，全长 298km，总流域面积 9980km²。坝址以上河长 217km，控制流域面积 9570km²，占塔什库尔干河全流域的 95.9%。枢纽工程距叶尔羌河干流控制断面卡群渠首 190km。

塔什库尔干河径流主要由冰雪融水及两岸的地下水补给，河道水量比较稳定，坝址多年平均年径流量 10.89 亿 m³。塔什库尔干河洪水特点是峰不高，量较大，连续出现时间长，洪水过程呈一日一峰。据调查资料最大历史洪水洪峰年流量 680m³/s。100 年一遇洪水洪峰年流量 750m³/s，5000 年一遇洪水洪年峰流量 1310m³/s。河流含沙量较小，含沙量主要集中在汛期 6~9 月，坝址悬移质年输沙量 53.5 万 t，推移质年输沙量 8.03 万 t。

塔什库尔干河河谷周围高山环绕，远离海洋，受帕米尔、喀喇昆仑山及大沙漠的影响，呈典型的大陆性高原气候。流域的气候差异较大，唯有冷暖两季，冬季寒冷漫长，夏季气候温和，气候的年、日变化显著，日温差高达 20℃左右，伴随气温的日变化，出现水位、流量的日变化。流域降水量小，蒸发强烈，空气干燥，降水时空分布不均，多年平均年降水量 68.9mm，主要集中在夏季，多年平均年蒸发量 2272mm，多年平均相对湿度 39.5%。多年平均气温 3.4℃，极端最高气温 32.5℃，极端最低气温 -39.1℃。多年平均最大风速 16.9m/s，最大风速 23m/s。土层冻结期为 9 月到次年 3 月，最大冻土深度 177cm。全年施工期约为 7 个月。

第二节 工程任务及规模

根据喀什地区社会经济发展需要和生态环境条件的制约，下坂地水利枢纽工程是以生态补水和春旱供水为主，结合发电的综合性水利枢纽工程。水库总库容 8.67 亿 m³，有效库容 6.93 亿 m³。电站总装机 150MW，保证出力 35.9MW，年发电量 4.735 亿 kW·h。

下坂地工程属于 II 等水利水电枢纽工程，大（2）型规模，枢纽建筑物由拦河坝、导流泄洪洞、引水发电系统和电站厂房四部分组成。主要建筑物拦河坝、导流泄洪洞、引水发电洞进口都为 2 级建筑物。电站为 III 等工程，引水隧洞、调压井、压力管道、电站厂房为 3 级建筑物。临时性水工建筑物为 4 级。下坂地水利枢纽工程平面布置见图 1-1。

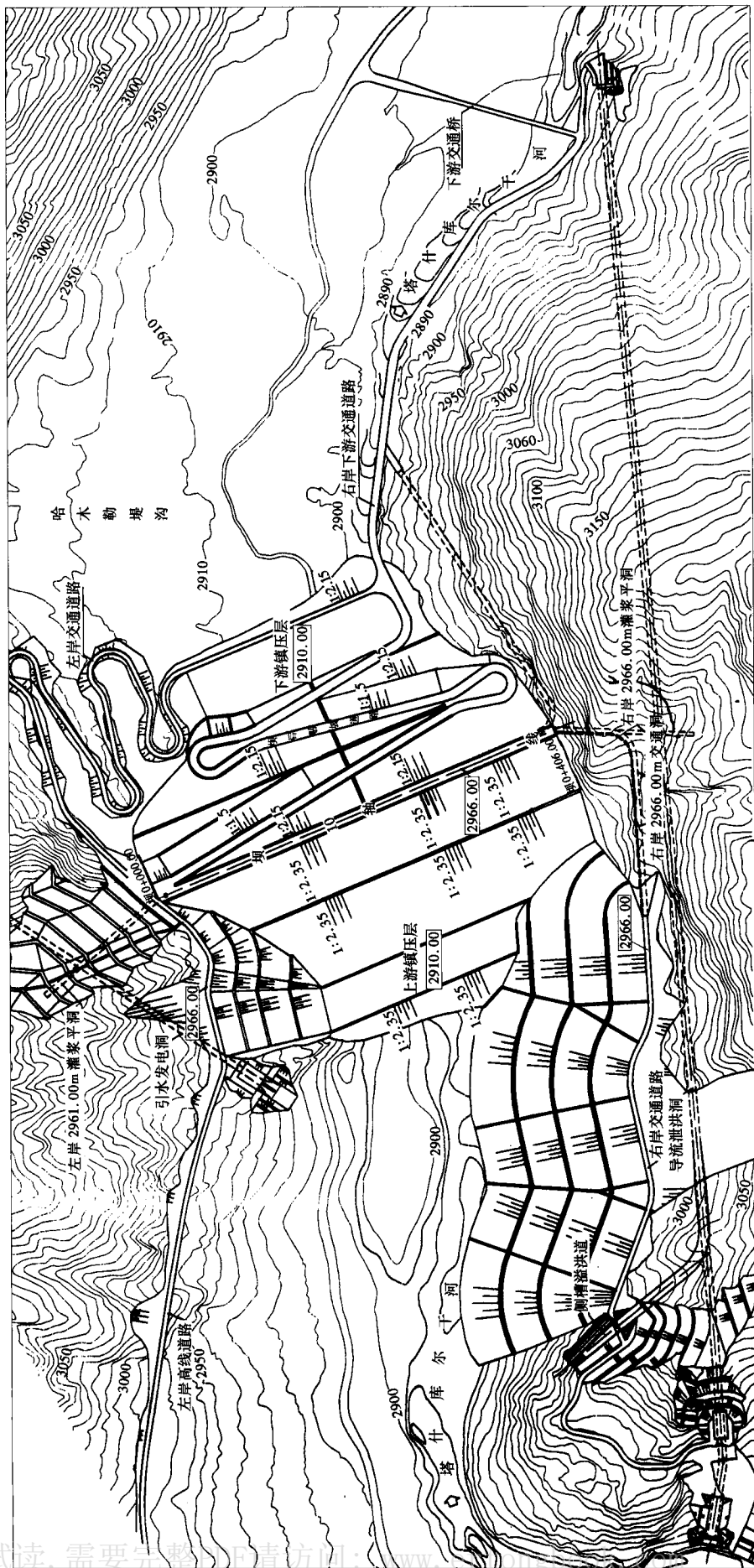


图 1-1 下坂地水利枢纽工程平面布置图

下坂地大坝为碾压式沥青混凝土心墙砂砾石坝。坝体防渗采用碾压式沥青混凝土作为防渗体，坝基防渗采用混凝土防渗墙与砂砾石灌浆帷幕相结合的垂直防渗型式。混凝土防渗墙顶设混凝土基座与沥青混凝土相接。大坝坝顶高程 2966.00m，最大坝高 78m，坝顶宽度 10m，坝顶长度 406m。沥青混凝土心墙顶高程 2964.00m，墙顶厚 0.6m，墙底厚 1.2m。为了便于进行检修维护，方便施工安排，在防渗墙的下游侧设置灌浆廊道（3.5m×5m）。沥青混凝土心墙上下游设置过渡层，厚度 3m。大坝上游坡比为 1：2.35，下游坡比为 1：2.15，坝底最大宽 424m。

第三节 工 程 特 点

1. 自然条件恶劣

下坂地水利枢纽工程位于我国最西端的帕米尔高原海拔 3000m，降雨量少，植被稀疏，风沙大，高寒缺氧，昼夜温差悬殊，交通极为不便，施工所需的全部原材料等需从 320km 外的喀什地区采购。冬季常因大雪封山阻断了对外的通行。夏季随着气温升高，冰雪水融化后常形成泥石流中断交通。大雪封山和泥石流严重影响材料设备的采购和运输，以及建设人员的基本生活保障，加之山区冬季寒冷时间较长，施工期较短，对工程进度造成了很大的干扰。

2. 区域构造稳定性差、地震基本烈度高

工程大地构造单元位于西昆仑褶皱系中部，该褶皱系西南与喀喇昆仑山褶皱系相连，北与南天山褶皱系接壤，东与塔里木地台相邻。

区域属构造稳定性较差地区，工程区位于米亚活动断裂带和喀喇昆仑活动断裂带围限的构造上相对稳定的帕米尔—西昆仑抬升块体内，新构造以间歇性整体抬升为基本特征。

场址区地震基本烈度为Ⅷ度，场地设计谱场地地表峰值加速度采用地表峰值加速度 0.309g。

3. 覆盖层深厚，地质条件复杂

下坂地大坝坝基覆盖层厚度达 150m，成分复杂，主要以漂石、块石、砾石及砂为主，结构杂乱、岩相变化大，最大粒径达 10.0m 以上，其岩性为花岗岩、片麻岩、片岩及灰黑色变质岩。由于覆盖层地层结构松散，无胶结，均一性差，中间夹有砂层透镜体、大孤石及架空现象，渗透性强，这种地质条件在国内外水利水电工程基础防渗处理中是罕见的，其防渗处理技术对设计和施工带来了很大的挑战。

第二章 工程地质及其特点

第一节 区域地质构造

1. 地形地貌

塔什库尔干河流域属西昆仑剥蚀高山区,位于帕米尔高原,受构造和岩性的控制,流经塔什库尔干县附近的塔什库尔干断陷盆地,盆地呈南北向展布,长 250km,宽 10km,高程 3000.00~3800.00m,地形平缓,在县城以北 10 余 km 与由北流来的支流汇合进入高山峡谷区,河流曲折东行 115km 汇入叶尔羌河。峡谷区河谷宽度多为 200~310m,河床高程 1900.00~3000.00m,两岸山峰高程 4000.00~5000.00m,相对高差 2000.00m 左右,山势险峻。坝址处地形地貌见图 2-1。

2. 地层岩性

库坝区及其外围地区地层主要由元古界副变质岩系和古生界华力西期侵入岩以及第四纪冰碛、冰水碛、冲积、洪积、坡积等松散堆积物组成。

元古界岩性主要为角闪黑云二长片麻岩、角闪片麻岩、角闪片岩、云母石英片岩及薄层大理岩等。上古生代早期侵入岩为片麻状黑云斜长花岗岩和片麻状黑云母花岗岩。



图 2-1 坝址处地形地貌图

3. 区域构造稳定性及地震基本烈度

水库枢纽 300km 范围内大地构造分区轮廓如图 2-2 所示。工程大地构造单元位于西昆仑褶皱系中部,该褶皱系西南与喀喇昆仑山褶皱系相连,北与南天山褶皱系接壤,东与塔里木地台相邻。

下坂地水利枢纽工程区域涉及帕米尔—喀喇昆仑—西昆仑抬升区、塔里木断陷和天山抬升区三个一级新构造单元,及帕米尔—喀喇昆仑块体与帕米尔—西昆仑块体两个二级新构造单元,它们之间均分布着强震构造断裂带,新构造变动强烈,地震活动水平较高,且空间分布不均一。区域属构造稳定性较差地区。自 1889 年以来,区域内共发生 7 级以上地震 4 次,6~6.9 级地震 7 次,5~5.9 级地震 37 次,最大地震是 1974 年阿克陶县西北乌赤别里口 7.3 级。在该区邻近的乌恰县于 1985 年 8 月发生过 7.4 级地震,该地震对场址区的影响不大于 VI 度。该区地震以浅源地震为主,无明显的深度优势分布,存在中源地震,最大中源地震为 6.5 级,其震源深度 120.0km。

近场区位于米亚活动断裂带和喀喇昆仑活动断裂带围限的构造上相对稳定的帕米尔—西昆仑抬升块体内,新构造以间歇性整体抬升为基本特征。工程区内存在的断裂主要有安大力塔克断裂及其两侧分支断层、瓦卡河断裂、协力波斯断层,这些断裂从晚更新世(7万~8万年)以来已无明显活动。区内地震活动微弱,未见古地震事件地质记录,有仪器观测以来未记录到6.0级以上的地震,历史地震对库坝区最大影响烈度为Ⅶ度。

鉴于库坝区内地震地质背景较为复杂,未来周围强震区对库坝区的最大影响烈度为Ⅷ度,中国地震局地质研究所2000年12月提交的《新疆喀什下坂地水利枢纽工程场区地震安全性评价报告》的结论认为,场区属于区域构造稳定性较差地区。

下坂地水利枢纽工程场址区地震基本烈度为Ⅷ度,一般场地条件下的概率地震烈度和基岩条件下的概率地震动峰值加速度建议采用250.7gal;按《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203—97)Ⅱ类场地规范谱作为场地设计谱,场地特征周期 T_g 取0.30s为宜,场地地表峰值加速度采用地表峰值加速度0.309g。

4. 物理地质现象

下坂地工程区地质环境复杂,地壳隆起,沟谷深切,构造发育,岩体破碎,在高寒干旱无植被的自然条件下,物理地质作用强烈,表现为滑坡、崩塌、坡积及倾倒体等。

第二节 坝址区工程地质条件

一、坝址区地质概况

下坂地工程坝址位于塔什库尔干河穿过瓦卡谷地后的峡谷段。为近东西走向的“U”形河谷,两岸山峰高程3400.00~4300.00m左右,相对高差540.00~1400.00m,基岩边坡陡峻,坡度45°~80°;坝址河谷宽200.0~310.0m,河床高程2900.00m(坝址),坝址以上河段水流平缓,河流坡降0.1%;坝址以下水流湍急,河流坡降3%~4%。坝址区内河流阶地不发育,高低漫滩(高出河水面0.1~2.0m)、洪积扇、崩坡积裙普遍发育,左岸可见残留有冰碛台地。坝址两岸冲沟不发育,仅在坝址左岸下游发育有哈木勒堤沟,长约10km,沟内冰川地貌特征清楚,沟口有洪积扇分布。

坝址区为单斜构造的近横向河谷,基岩为元古界变质岩(角闪黑云二长片麻岩),片

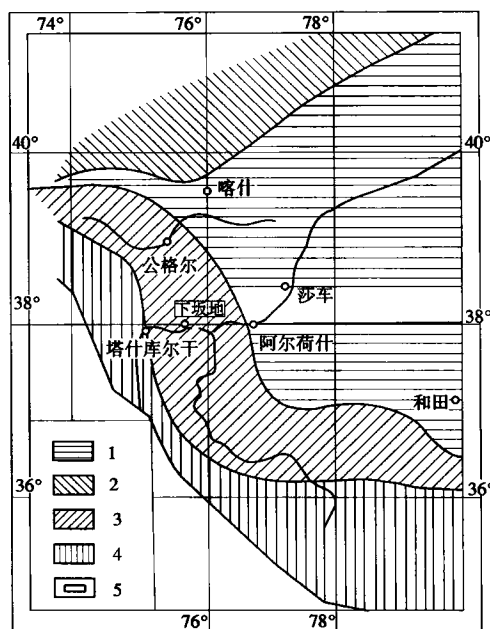


图 2-2 大地构造分区轮廓图

1—塔里木地台; 2—南天山褶皱带; 3—西昆仑褶皱带;
4—喀喇昆仑; 5—水库位置

麻理倾向上游, 倾角 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$, 中厚层状至厚层状, 层间夹有石英岩脉、角闪岩脉及薄层云母片岩。受风化影响, 表层片理间暗色矿物夹层风化剥落严重, 形成多处风蚀小坑。

区内地质构造主要受安大力塔克区域性活断裂和高地震烈度的影响, 断层及构造裂隙较为发育。断层压扭性和张扭性为主, 破碎带宽度 $0.1\sim 5.0\text{m}$; 构造裂隙剪性、张性均较发育。

坝址两岸山体高陡, 物理风化剧烈, 卸荷裂隙发育, 坡面岩体较为破碎。风化卸荷裂隙多呈张开状, 张开 $5\sim 10\text{cm}$, 最大可达 50cm , 裂隙内充填块石、角砾等地表物质, 地表浅层架空明显。

坝址区第四系松散堆积物由冲积、冲洪积、洪积、崩积、崩坡积、湖积、冰碛、冰水积等组成。工程区物理地质作用强烈, 风化剥落现象普遍, 边坡坡脚大部分被崩坡积层掩盖, 其中以坝线上游左右岸及导流洞进口上游最为发育。崩坡积层顶部分布高程一般 $2950.00\sim 3050.00\text{m}$, 最高可达 3300.00m , 厚度 $10.0\sim 70.0\text{m}$ 不等, 规模较大。左岸以崩塌破坏模式为主, 主要为块石、碎石堆积, 粒径粗大; 右岸以风化剥落破坏模式为主, 主要为碎石、角砾堆积, 粒径较细。

河床覆盖层最深达 150m , 物质组成及地层结构较为复杂, 既有两岸崩坡积物, 也有河流冲积沉积物, 还有冰碛物和堰塞湖期沉积下来的湖积相软粘土或淤泥质粘土, 岩性成分杂乱, 粒径大小悬殊, 均一性差, 最大粒径达 10.0m 以上。

坝址区内基岩水文地质条件较为简单, 仅为基岩裂隙水, 主要受高山的冰雪融水及大气降水补给, 在左右岸基岩浅部受深部基岩裂隙水及第四系孔隙潜水的双向补给, 形成了局部段河谷两岸的地下水凹槽, 左岸地下水位在 $2889.90\sim 2890.00\text{m}$ 之间, 右岸在 $2889.60\sim 2893.40\text{m}$ 之间, 低于河床水位。另外在引水发电隧洞部分洞段区受左岸哈木勒堤沟的影响, 施工时见地下水渗出。

河床覆盖层中有承压水分布, 主要在湖积相软粘土或淤泥质粘土分布较连续的区域, 受两层软土层结构的控制, 形成局部承压水; 在两层软土缺失或不连续的地段其承压性质消失并与第四系潜水汇合成为统一的第四系潜水。坝址地层主要由元古界变质岩及第四系松散堆积物组成。

二、坝基覆盖层结构特征

下坂地工程区内地质条件复杂, 坝基第四系覆盖层厚度在 150m 左右。覆盖层地层结构复杂, 据钻孔、竖井勘探显示其岩性成分杂乱, 粒径大小悬殊, 均一性差, 最大粒径达 10m (GZK8 孔) 以上。依据其粒径、颗粒组成、磨圆度、成因等, 坝基覆盖层可分为五层, 下坂地工程大坝轴线地质剖面见图 2-3。

1. 崩坡积块石、碎石层 ($Q_4^{\text{col+dl}}$)

崩坡积层分布在左右两岸边坡及坡脚处, 主要为第四系全新世的产物, 受左右岸边坡岩体结构及风化的影响, 左右岸崩坡积层性状差异性较大。左岸颗粒以块石、碎石为主, 方量约为 40万 m^3 (坝基下伏方量约 22万 m^3); 右岸颗粒以碎石、角砾为主, 方量约为 152万 m^3 (坝基下伏方量约 60万 m^3) 压缩系数 $a_{v1-2}=0.037\sim 0.09\text{MPa}^{-1}$, 属低压缩性土, 直剪试验内摩擦角 $\varphi=41.1^{\circ}\sim 43.6^{\circ}$, 凝聚力 $C=50\sim 130\text{kPa}$, 强度较高。渗透系数在 $10^{\circ}\sim 10^{-1}\text{cm/s}$ 之间, 为强透水—极强透水层。

2. 冲洪积砂卵砾石层 (Q_3^{al} 、 Q_4^{al} , 图 2-3 中地质编号①)

冲洪积层分布在河床、漫滩, 结构复杂, 层位相变较大, 颗粒由砂、粗砾组成, 局部夹粉砂质壤土薄层, 含零星块石, 该层厚度 0.3~29.3m (ZK131 钻孔)。其中 Q_3^{al} 冲积层相对密度 $D_r=0.12$, 属松散层, 渗透系数平均值 $K=17.6\text{m/d}$ 。

3. 湖积淤泥质粘土及软粘土层

软粘土是全新世早期与中期 (Q_4) “堰塞湖”的产物, 它由上下两层软粘土及其间夹一层冲积砾石层组成。总厚度 40~50m。

下层软粘土 (Q_4^{11}): 暗灰色、软塑、干态坚硬, 库区分布较广泛。纵向由坝轴线以上 120m 至库区河床下分布较连续, 厚度 0~31.34m; 横向上一般在河谷较狭窄地段及无较大的崩坡积地段均与两岸基岩直接接触。在河谷两岸坡积物发育的地段, 局部没有与基岩接触而成为“天窗”。坝区围堰处软粘土顶面高程 2883.50~2890.00m, 底面最低高程 2851.60m。纵向上起伏变化不大, 厚度较稳定, 围堰以下逐渐尖灭。

上层淤泥质粘土 (Q_4^{21}): 蓝灰色、均一性差、夹粗砂及砂壤土、流塑, 分布范围较软粘土层小, 两岸多缺失 (坝址区)。除基岩直接出露地段和崩坡积堆积规模小地段与基岩直接接触外 (围堰的右岸), 其余均与其他堆积物接触而尖灭。该层在坝基下伏面积约 26700m², 分布范围为河床右岸坝轴线以上, 其顶板高程在 2898.14~2891.86m 之间, 底板高程在 2895.93~2886.39m 之间, 厚度 1.25~9.70m。下坂地坝基软粘土在坝址区分布见图 2-4。

上层淤泥质粘土为流塑状, 属高灵敏度性土。下层属中等灵敏性土, 压缩试验成果表明, 下层软粘土属高压缩性土。

4. 冰水积砂层 (图 2-3 中地质编号③)

坝基覆盖层中夹有 18~30m 厚砂层透镜体, 砂层自然状态颗粒级配见表 2-1。

表 2-1 砂层颗粒分析试验成果表

层数	统计组数	颗 粒 组 成 (mm)						平均粒径	不均匀系数 C _u	曲率系数 C _c
		砾粒	粗砂	中砂	细砂	粉粒	粘粒			
		>2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005	D ₅₀ (mm)		
		%								
上层	22	1.7	9.6	13.8	35.3	32.4	7.2	0.102	13.6	1.8
中层	38	0.6	6.5	15.3	40.1	31.4	6.1	0.103	10.1	1.8
下层	18	0.1	3.9	9.5	38.9	40.3	7.3	0.078	11.4	2.2

根据野外钻孔抽水、提水试验及自振法试验, 砂层的渗透系数: 上部 (20~50m) $K=7.2\sim12.4\text{m/d}$; 下部 (50~70m) $K=9.6\sim15.9\text{m/d}$ 。与野外抽水试验相比, 室内试验结果渗透系数偏小。砂层透水性基本均一, 属弱~中等透水性。

因场地地震基本烈度为Ⅷ度, 坝基砂土的地震液化问题是坝基的主要工程地质问题之一。因此勘测设计单位对坝基砂层专门进行了详细的野外勘探及室内试验工作。

结果表明: 砂层的上、中、下三层在Ⅷ~Ⅸ度地震作用下, 只有上层有发生地震液化