

王建武 柳锋波 等 著

SHUIGONGCHENG SHIGONGQI
JISHU YANJIU YU YINGYONG

水工程施工期 技术研究与应用



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水工程施工期 技术研究与应用

王建武 柳锋波 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书由直接参与工程建设和管理的技术人员撰写。全书以燕山水库枢纽工程为实例主要从工程综述、大坝工程施工、大坝工程施工技术研究、泄洪及发电建筑物施工、泄洪及发电建筑物施工技术研究、安全监测与自动化、生态水工技术研究与应用等方面进行了论述。在全面综述该工程施工组织和技术特点的基础上,主要介绍了各建筑物的施工技术和管埋,并对其中的一些专项技术问题的研究和创新作了重点论述。

本书内容丰富,实用性强,有较多创新,可供水利水电工程施工和管理的技术人员及大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工程施工期技术研究与应用 / 王建武等著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2011.2
ISBN 978-7-5084-8435-8

I. ①水… II. ①王… III. ①水利工程—工程施工—施工技术 IV. ①TV52

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第028301号

书 名	水工程施工期技术研究与应用
作 者	王建武 柳锋波 等 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 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	涿州市星河印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 34.25印张 812千字
版 次	2011年2月第1版 2011年2月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	138.00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

前言



燕山水库枢纽工程位于河南省平顶山市叶县境内（沙颍河的上游），是1991年国务院确定的19项治淮骨干工程之一，是淮河流域规划确定的沙河流域防洪工程体系的重要组成部分。燕山水库是一座以防洪为主，兼顾供水、灌溉、发电的大（2）型水利工程。它的建设对控制沙河流域的洪水、保护河南、安徽两省800万亩农田、600万人口以及京广铁路、京港澳高速公路、101国道的安全具有极为重要的作用。

2003年12月工程前期准备工程开工，2006年3月18日主体工程开工，同年10月20日成功截流，2008年6月下闸蓄水，2008年12月主体工程全面完工并提前发挥效益，在2007年汛期淮河流域性大洪水中发挥了极大的防洪效益，直接防洪减灾效益达2.8亿元。2010年9月5日～9日，坝址以上平均降雨115.9mm，最大降雨量达179.0mm，入库流量为3590m³/s，在本次洪水过程中，经科学调度，削减洪峰89%，确保了澧河安全，经估算防洪减灾效益达4.5亿元。

燕山水库枢纽工程的建设，工期紧、任务重，涉及大坝提前截流，各项工程施工计划、技术方案的调整，基础处理与大坝填筑的交叉施工以及河槽段地质条件复杂等多项技术难题，在如此短的工期内，切实实现了当年开工、当年截流、第二年发挥防洪效益。这一成绩的取得除了与“建管一体”的新型建设管理体制和顺利的移民迁安保证外，还与广大参建工程技术人员的科学安排、精心设计和施工、坚持科学创新，加大工程科技含量密不可分。

在建设燕山水库过程中，广大工程技术人员坚持科研指导施工，科研服务工程，结合工程开展了10余项课题研究，其中一些科技成果基本达到了国际、国内领先水平，如：①大坝坝体协调变形关键技术研究；②大坝护坡抗风浪试验研究；③大坝堆石体附加质量法实验研究；④大坝施工、运行期渗流场及应力变形数值模拟研究；⑤燕山水库建筑物工程安全监控理论及预警系统研究；⑥泄洪建筑物混凝土结构施工、运行期全过程数值模拟与防裂措施研究；⑦燕山水库防渗墙及帷幕灌浆质量检测技术研究；⑧建设管理信息自动化技术研究等。此外，广大工程技术人员坚持科技创新、提高工程科技含量，采用了10多项新技术、新工艺、新材料，如：①水库工程建设史上第

一次在开工伊始就针对白蚁对土石坝工程的危害性制定了防治措施。本着“以防为主、防治并重”的原则从设计、施工各个环节采取科学的防治手段；②水库建设史上第一次通过一系列科学试验在坝体迎水坡采用了联锁式混凝土预制块大坝护坡技术；③综合温度场理论抑制大体积混凝土裂缝技术；④“针梁式全断面钢模台车”浇筑隧洞混凝土技术；⑤电站调压井混凝土滑模施工技术；⑥大坝基础混凝土防渗墙的“两钻一抓”成槽工艺；⑦钢筋纹套管连接技术；⑧混凝土拉筋孔封堵技术；⑨TBS植被混凝土绿化和生态膜袋岩石边坡护坡技术；⑩HBPU（沥青聚氨酯）水工混凝土填缝止水材料等。这些新技术、新材料、新工艺的应用大大地加快了工程建设速度，保证了工程建设质量、特别是外观质量。达到了精心设计、精心施工、精品工程的目的。

为总结燕山水库枢纽工程施工技术，特别是施工阶段技术与管理方面的经验与教训，丰富水利工程建设与管理的宝库，并为水利施工和技术管理人员提供参考，项目法人组织参建工程技术人员编写了这本书。本书分工程综述、大坝工程施工、大坝工程施工技术研究、泄洪及发电建筑物施工、泄洪及发电建筑物施工技术研究、安全监测与自动化、生态水工技术研究与应用，共七章。在综述工程施工组织和取得的成就的基础上，主要介绍了各单位工程的施工技术，特别针对一些专业技术问题或技术创新作了重点介绍。

本书由河南省燕山水库建设管理局组织编写。第一章由王建武、柳锋波、翟渊军、陈满圈撰写；第二章由李永江、刘文生、何心望、朱建军、曹先升、古小辉、宋玉才撰写；第三章由柳锋波、蔡正银、李永江、何杰、李宗坤、赵海生、薛云峰、潘军宁、赵建仓、张志敏撰写；第四章由王建武、石世魁、曹宏亮、吴昊、马全力、丁来阁、王长生撰写；第五章由王建武、柳锋波、李永江、袁群、张国锋、李玉娥、戚世森撰写；第六章由马福恒、于宗泉、郭伟、李成林、刘成栋、赵彦增撰写；第七章由王建武、柳锋波、田国行、何瑞珍、夏振尧撰写；王建武、柳锋波对全书进行了审稿。雒福顺教授级高级工程师为本书的编写做了大量工作，在此表示感谢。

限于撰写者的水平，书中不妥之处，恳请读者批评、指正。

作者

2010年12月

目录



前言

第一章 工程综述	1
第一节 工程设计	1
一、大坝工程	1
二、泄洪洞工程	7
三、溢洪道工程	8
四、输水洞及电站工程	14
第二节 施工组织设计	17
一、施工基本条件	17
二、施工总布置	19
三、施工总进度	22
第三节 施工期技术问题综述	28
一、施工期遇到的技术难题	28
二、技术创新及新技术应用	34
第二章 大坝工程施工	36
第一节 坝体结构及施工特点	36
一、大坝结构特点	36
二、大坝施工特点	38
第二节 大坝工程施工布置	39
一、基本条件	39
二、大坝施工总体布置	39
第三节 坝基开挖与基础处理	41
一、坝基开挖	41
二、基础处理	43
第四节 坝体填筑	92
一、土、石料的开采	92
二、填筑作业技术	99
三、大坝填筑施工质量	103
第五节 大坝施工进度	109
一、进度计划和实施结果	109

二、大坝施工进度控制措施·····	111
第六节 大坝防浪墙施工·····	115
一、防浪墙特征·····	115
二、施工工艺·····	115
三、质量保证措施·····	120
第三章 大坝工程施工技术研究 ·····	122
第一节 大坝提前截流方案论证·····	122
一、提前截流提出的缘由·····	122
二、截流方案的选定·····	122
三、导流标准和导流方案·····	127
四、大坝土石方平衡·····	128
五、征地移民·····	128
六、实施效果·····	129
第二节 坝体白蚁防治技术研究·····	129
一、专家咨询·····	129
二、普查情况·····	129
三、防治措施·····	132
第三节 大坝协调变形关键技术研究·····	133
一、项目的意义及作用·····	133
二、研究方法与技术路线·····	134
三、主要研究内容·····	134
四、离心模型试验·····	135
第四节 大坝渗流场及应力变形数值模拟研究·····	156
一、研究的背景及意义·····	156
二、燕山水库坝体应力变形仿真分析·····	157
第五节 基础防渗墙及帷幕灌浆质量检测技术研究·····	176
一、研究的背景及意义·····	176
二、研究内容和方法·····	177
第六节 大坝堆石体密度快速检测试验研究·····	201
一、前言·····	201
二、主攻目标及技术路线·····	202
三、工作量及测点布局·····	202
四、模型及方法研究·····	203
第七节 大坝上游联锁式混凝土预制块护坡技术研究·····	218
一、设计方案的选取·····	218
二、抗风浪试验研究·····	219
第八节 孔口封闭灌浆法在燕山水库低压无盖重灌浆中的应用·····	234

一、工程基础处理概况·····	234
二、孔口封闭灌浆法施工·····	235
三、孔口封闭法的优点·····	236
四、孔口封闭灌浆法适用的范围·····	236
五、帷幕灌浆质量检查·····	237
六、灌浆资料分析·····	237
七、结论·····	238
第九节 微波炉法快速测定土料含水率试验研究·····	238
一、对比性试验的条件与方法·····	239
二、对比试验的结果·····	239
三、结语·····	242
第十节 特殊上坝材料的研究及应用·····	243
一、粘土质砂砾岩开挖料·····	243
二、粘土质砂砾岩力学性质研究·····	243
三、粘土质砂砾岩施工·····	246
第十一节 坝基顺河流断层带渗透稳定性研究·····	247
一、绪论·····	247
二、研究区工程地质条件·····	247
三、坝基松散岩土体抗渗强度·····	253
四、坝基渗流场特征数值模拟·····	259
五、各透水层渗透系数建议值·····	271
六、坝基渗透稳定性评价·····	280
七、结论和存在的问题及建议·····	283
第四章 泄洪及发电建筑物施工 ·····	285
第一节 施工布置·····	286
一、施工场内交通·····	286
二、施工用电·····	287
三、施工用水·····	287
四、通信·····	287
五、堆料场和弃料场·····	287
六、营地和办公场地·····	288
第二节 施工进度·····	289
一、工程总体进度计划·····	289
二、施工进度的管理依据和管理方法·····	289
第三节 施工方法·····	290
一、开挖支护工程·····	290
二、混凝土工程·····	299

三、灌浆工程·····	303
第四节 施工质量·····	308
一、施工质量保证体系·····	308
二、施工过程质量控制·····	308
第五章 泄洪及发电建筑物施工技术研究 ·····	311
第一节 大体积混凝土结构应力数值模拟与防裂措施研究·····	311
一、基本资料·····	311
二、混凝土闸墩结构施工过程分析·····	315
三、闸墩底板混凝土浇筑方案研究·····	317
四、闸墩结构冷却水管施工效果分析·····	325
五、闸墩运行期初次过水混凝土开裂研究·····	329
六、过水表面保温防护研究·····	333
第二节 溢洪道底板闸墩温控及防裂技术研究·····	338
一、溢洪道工程概况·····	338
二、预防裂缝的综合措施·····	340
三、底板闸墩混凝土的温度应力仿真计算·····	342
四、温度控制要求和温度控制措施·····	345
五、溢洪道混凝土温度控制实际效果分析·····	347
第三节 预应力闸墩张拉施工的质量控制措施·····	348
一、概述·····	348
二、预应力锚索施工工艺控制·····	348
三、理论分析·····	352
四、几个关键问题·····	353
五、结语·····	354
第四节 溢洪道尾水渠高边坡膨胀土处理技术·····	354
一、膨胀土的物理性质·····	354
二、膨胀土的膨胀性试验 ·····	355
三、干湿循环无侧限抗压强度试验·····	356
四、结论和实施方案·····	357
第五节 输水洞混凝土全断面衬砌技术研究与应用·····	358
一、施工技术方案的研究与制定·····	358
二、针梁式全圆钢模台车研制·····	358
三、混凝土配合比设计·····	359
四、施工过程·····	360
五、施工技术关键控制点·····	360
六、施工中应注意的问题·····	360
七、结论·····	361

第六节 电站调压井开挖爆破施工技术·····	361
一、施工方案设计·····	361
二、爆破参数设计·····	362
三、施工技术及难点处理·····	364
四、爆破效果·····	365
第七节 电站调压井混凝土衬砌滑模施工技术应用·····	365
一、施工方案的制定·····	365
二、滑模的研制·····	366
三、滑模荷载分析计算·····	367
四、滑模安装·····	367
五、混凝土配合比设计·····	368
六、滑模施工·····	368
七、施工中应注意的问题·····	369
八、结论·····	369
第八节 岩石边坡 TBS 植被护坡技术研究及应用 ·····	369
一、燕山水库输水洞岩石边坡概况·····	370
二、植被护坡技术的选择·····	370
三、两种植被护坡专利技术的具体实施·····	371
四、两种植被护坡专利技术的效果·····	373
五、结论·····	374
第六章 安全监测与自动化 ·····	376
第一节 大坝安全监测及预警系统·····	376
一、大坝监测系统设计·····	376
二、主要监测仪器设备技术指标·····	380
三、主要安全监测仪器安装埋设技术·····	381
四、大坝安全实时监控预警系统研制开发·····	388
第二节 基于 WEB 技术的燕山水库综合自动化系统集成方案 ·····	396
一、概述·····	396
二、系统总体结构·····	397
三、系统配置与功能·····	397
四、结语·····	401
第三节 工程建设管理信息系统的研发与应用·····	401
一、系统建设目标与设计思路·····	401
二、系统业务功能设计·····	406
三、经验总结·····	418
第四节 水文自动化系统在工程防汛中的应用·····	420
一、燕山水文自动化系统建设的意义·····	421

二、水文自动化遥测系统·····	421
三、洪水预报调度系统·····	422
四、水文自动化系统技术特点·····	423
五、应用情况·····	424
第五节 燕山水库综合自动化技术应用·····	425
一、概况·····	425
二、系统建设原则·····	425
三、总体要求·····	426
四、自动化系统建设内容·····	426
五、总结·····	444
第六节 大坝安全监测新技术分析及运用·····	445
一、大坝安全监测技术发展综述·····	445
二、土石坝三维变形监测关键技术研究·····	450
三、野值诊断技术在燕山水库施工期监测资料分析中的应用·····	454
四、盲数理论在燕山水库大坝安全评判中的应用·····	458
第七章 生态水工技术研究与应用 ·····	468
第一节 扰动边坡的生态修复技术研究与应用·····	468
一、概述·····	468
二、主要研究内容·····	469
三、扰动边坡生态修复手段的比选和应用·····	469
四、实施应用效果·····	471
五、生态效益、护坡效应和水土保持效应分析和研究·····	471
六、总结·····	480
第二节 生态及水源地保护与可持续发展途径研究与应用·····	480
一、概述·····	480
二、主要研究内容及技术路线·····	481
三、环境污染现状·····	482
四、主要生态环境问题·····	484
五、流域尺度上生态景观数据库的建立与生态安全分析评价·····	486
六、水库消落带生态功能分区及健康性评价指标体系的确定·····	492
七、库区生态系统服务功能评价·····	509
八、水体环境保护和监测能力建设·····	521
九、水资源保护及污染防治工程措施·····	526
参考文献 ·····	531

第一章 工程综述

第一节 工程设计

燕山水库主体工程由大坝、泄洪（导流）洞、溢洪道、输水洞及电站组成（见图 1-1）。

一、大坝工程

（一）坝型选择

根据坝址区地形地质条件、天然建材分布和储运条件，燕山水库挡水建筑物基本坝型采用土石坝。

燕山水库工程坝体填筑工程量约为 400 万 m^3 ，如全部采用粘性土料，按土区开采深度 2m 考虑，仅料区占地就需 4000 亩左右。为减少对下游人口稠密的平原地区农业生产带来不利影响，应尽可能使用水库上游淹没范围内的土料，而已查明上游 Q_3 低液限粘土（中重粉质壤土）储量只有 406 万 m^3 ，尚不能满足“规范”要求的两倍的储量要求。使用单一土料使均质坝虽然便于施工，但不符合少占耕地、尽量取用上游库区土料的原则，且大量的工程开挖料按挖填平衡原则应尽量使用，所以不宜全部采用均质土坝。因此，除左岸台地桩号 2+700.00 以左坝高较低坝段采用均质土坝坝型外，主河槽和左岸台地坝较高坝段采用分区坝坝型。

对心墙坝和斜墙坝而言，作为防渗体的 Q_3 中重粉质壤土储量均可基本满足要求。由燕山水库特定的洪水和地形条件确定，围堰高度按 20 年一遇洪水标准，围堰堰顶高程为 107.40m，围堰最大高度为 24.3m，围堰土石方填筑工程量约 53 万 m^3 ，且由于没有在坝体范围之外布置围堰的地形条件，必须考虑和坝体结合。按照挖填平衡原则并考虑天然砂砾料较为缺乏、土料较为丰富的坝料条件，心墙坝和斜墙坝方案在合理利用工程开挖的风化石渣料和第三系粘土质砂砾岩开挖料的条件下拟定断面型式。

就分区坝而言，从坝体与围堰结合和河槽段截流后工期控制等方面考虑，斜墙坝坝型较心墙坝坝型优势更加明显，且斜墙坝方案投资略少，因此，选用斜墙坝作为燕山水库主坝坝型，其代表坝型见图 1-2 和图 1-3。

（二）坝轴线的选择

初步设计阶段选择一坝线、二坝线、三坝线 3 条坝线进行坝线比较。根据地形地质条件、工程布置、移民、施工及工程量和投资综合分析比较，最终选定二坝线为选定坝线。

大坝坝轴线左端控制点坐标为： $x=3700300.00$ ， $y=384354480.00$ ；右端控制点坐标为： $x=3696352.00$ ， $y=38438154.00$ 。坝轴线走向为 $145^\circ 53' 24''$ 。大坝长度（包括防浪墙）为 4070m，起止桩号为 0+650.00~4+720.00。

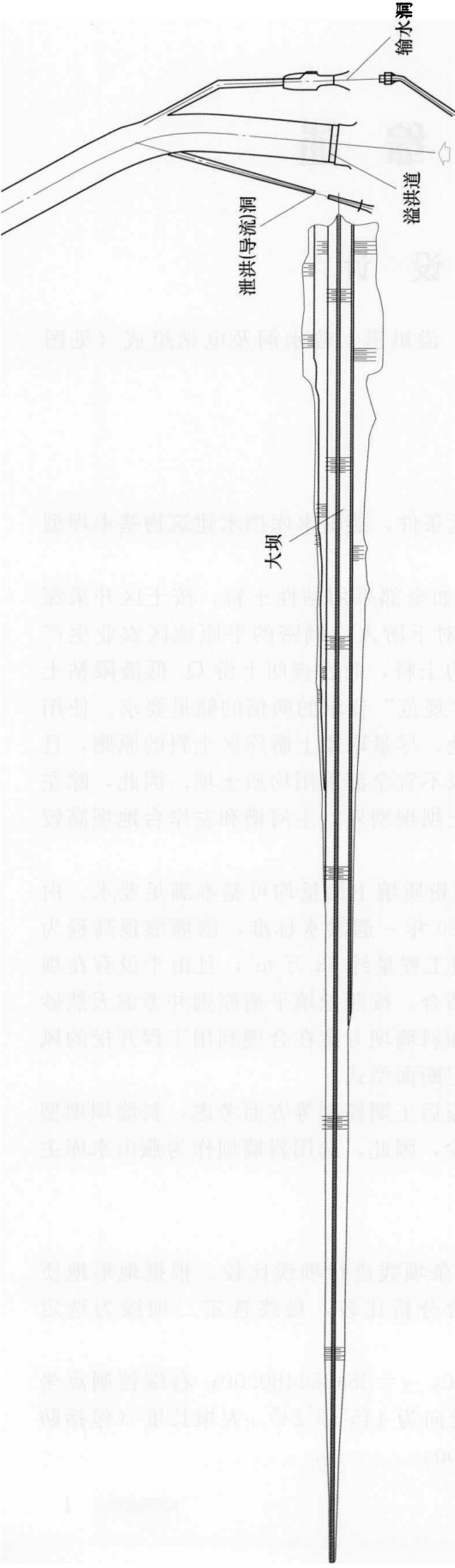


图 1-1 燕山水库工程总体布置示意图

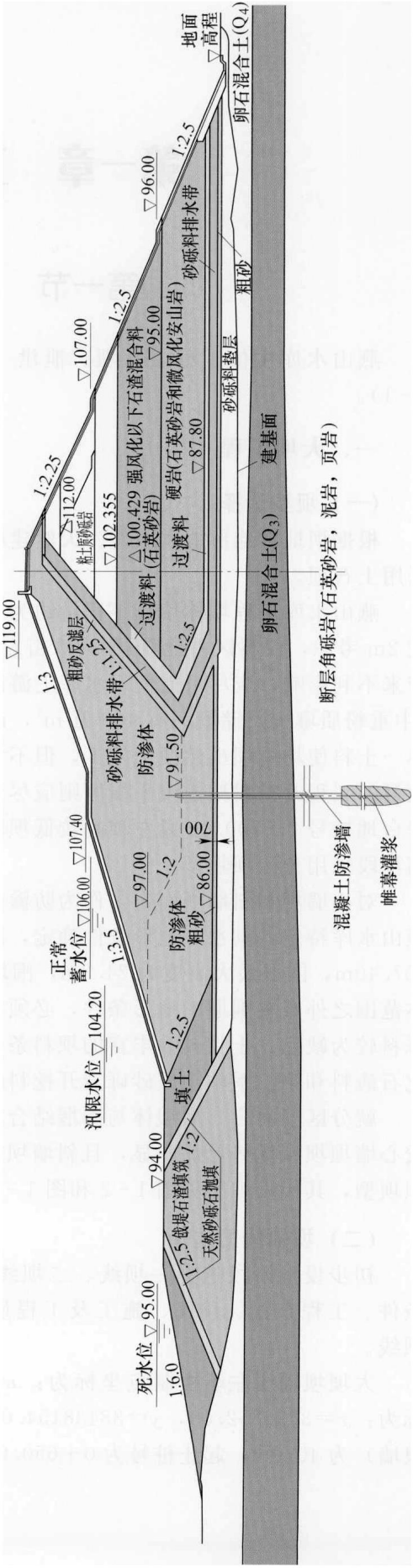


图 1-2 河槽段大坝 (桩号 4+450) 横断面图

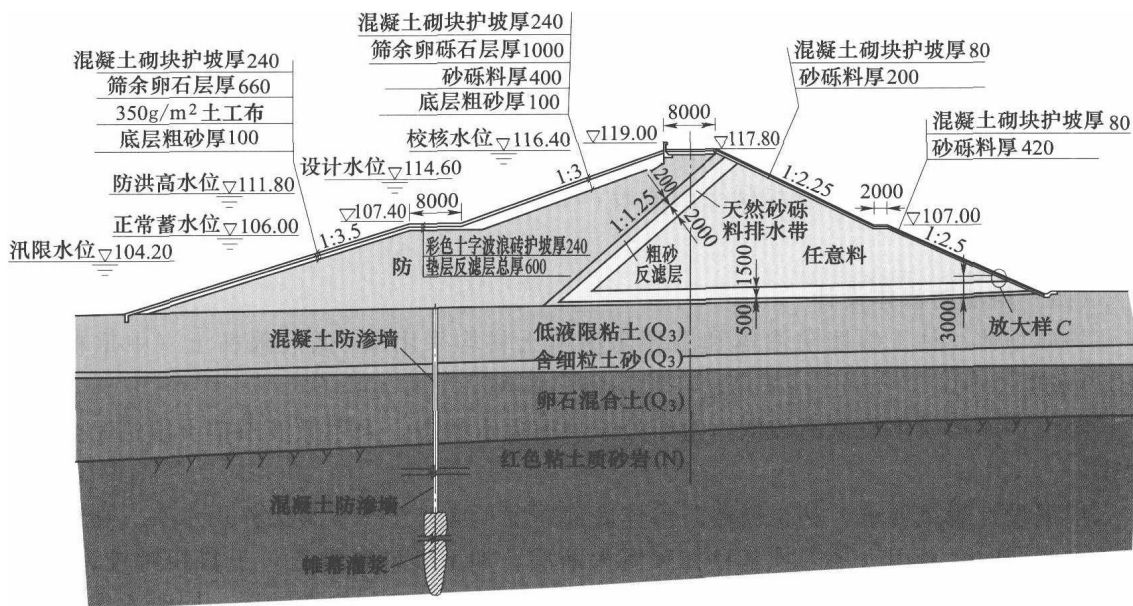


图 1-3 二级阶地（桩号 4+200.00）大坝横断面图（尺寸单位：mm）

大坝总体布置方案的主要特点：

大坝采用经济、安全且适合燕山水库坝址条件的碾压土石坝，结合工程实际情况低坝段采用均质坝，较高坝段采用斜墙分区坝。充分利用输泄水建筑物开挖的渣料和当地材料，最大限度减少工程投资和对环境的影响。

（三）坝体结构

按地形地质条件和坝型特点，大坝分为 3 个区段，桩号 0+650.00~2+665.50 为均质坝坝段，桩号 2+665.50~2+270.00 为斜墙分区坝和均质坝的过渡坝段；桩号 2+700.00~4+150.00 为左岸台地粘土斜墙分区坝段，桩号 4+150.00~4+720.00 为河槽粘土斜墙分区坝段。

桩号 0+650.00~2+700.00 之间的左岸台地均质坝段最大坝高为 10.66m，坝体材料主要为低液限粘土，上游护坡采用 240mm 厚水工连锁砖；下游上部采用 80mm 厚混凝土凸块砖，下部采用水工透水砖。护坡砌块与坝体之间设垫层反滤。

大坝桩号 2+700.00~4+084.00 为左岸台地粘土斜墙分区坝段，该段为大坝Ⅱ标，最大坝高为 28.50m，斜墙防渗体采用低液限粘土，内坡比 1:1.25，坝壳料采用溢洪道、输泄水建筑物开挖的渣料，对任意料区填筑的粘土质砂砾岩在下游坝壳设垂直厚度为 4.00m 的非膨胀石渣料。斜墙坝段在下游坝壳粘土质砂砾岩与上游粘土防渗体之间及坝壳料和下游坝基土层之间设有反滤排水带。

桩号 4+084.00~4+150.00 为大坝Ⅱ标斜墙分区坝和大坝Ⅲ标斜墙分区坝的过渡段。

大坝桩号 4+150.00~4+720.00m 为河槽粘土斜墙分区坝段。斜墙防渗体采用低液限粘土，坝壳料主要为输泄水建筑物开挖的渣料、砂砾料和溢洪道尾水渠开挖的粘土质砂砾岩，高程 95.00m 以下采用石英砂岩、弱微风化的石英砂岩夹页岩等硬岩石渣，高程

95.00m 以上采用其他渣料和砂砾料,粘土斜墙与坝壳料之间设垂直厚 1.20m 的反滤料、2.00m 厚的天然砂砾料排水带和过渡层。地基与坝壳料之间依次为 0.7m 厚的粗砂、1.3m 厚的天然砂砾料排水带和 0.80m 厚的过渡层。斜墙防渗体与坝基之间及一级阶地段天然砂砾料排水带下部还设有厚 0.70m 的粗砂反滤料。上游护坡采用 240mm 厚水工连锁砖;下游上部采用 80mm 厚混凝土凸块砖,下部采用水工透水砖。护坡砌块与坝体之间设垫层反滤料。

(四) 斜墙防渗体设计

均质坝体、粘土斜墙防渗体和围堰防渗体土料均采用 Q_3 低液限粘土(中重粉质壤土)填筑。

燕山水库均质坝段坝高较低,常年处于坝前无水状态,采用低液限粘土填筑完全满足要求。

根据规范要求,粘土斜墙防渗体底部厚度不应小于 $1/5$ 最大作用水头。在满足规范要求的同时,燕山大坝因坝基存在顺河大断层,加上砂砾料缺乏,土料相对较为丰富,防渗体的断面布置主要根据坝体开挖填筑料物平衡及天然建材料源情况,同时考虑围堰防渗体和坝体粘土斜墙结合、防渗墙施工及顺河大断层段坝基的后期处理等综合因素确定。为防止冰冻或干裂,斜墙上游面高程 107.40m 以上和以下分别设有总厚度为 1.5m 和 0.6m 的垫层和反滤保护层。

(五) 坝壳料设计

1. 粘土质砂砾岩

第三系粘土质砂岩砂砾岩室内渗透变形试验破坏比降为 1.24,允许比降按安全系数为 3 考虑仅为 0.41,和 Q_3 低液限粘土防渗料允许比降 3~5 相比明显偏小,而且该坝料不仅偏粗且相变很大,具有明显的不均匀性。且该坝料饱和后强度明显降低,压缩性明显增加,饱和条件下的力学特性亦很差。因此,作为防渗体和反滤料使用均不合适。该坝料只能用于下游坝壳干燥区。

施工期溢洪道尾水渠开挖粘土质砂砾岩大量揭露后委托南京水利科学研究院对其进一步做补充试验,完成了《燕山水库大坝溢洪道尾水渠膨胀岩土试验报告》。有关粘土质砂砾岩的主要结论摘录如下:

“粘土质砂砾岩中粘性土按 1987 年建设部发布执行的《膨胀土地区建筑技术规范》(GBJ112—87)的标准,来判别为低膨胀土。通过膨胀力及有荷载膨胀率试验,本次试验用粘土质砂砾岩粘土含量虽然只占 8.8%,但是试样仍具有一定膨胀性。在一定含水率范围内($W>7.6\%$)其膨胀性随含水率的增加而减小,在含水率超过 16%时,膨胀性基本可忽略。

膨胀土因含有大量膨胀性粘土矿物,在气候干湿交替作用下极易产生强度的干燥收缩和吸水膨胀作用。旱季常形成纵向裂缝,雨季降雨又从裂缝渗入,导致强度下降,而膨胀土除了一般非饱和土的共性外,最大特点就是多次干湿循环后膨胀土的强度发生较大衰减。”

为减少气候干湿交替对粘土质砂砾岩的影响,对该坝料的使用范围和分区方法进行了调整,在粘土质砂砾岩的下游外包厚度为 4m 的非膨胀的页岩为主风化渣料。

2. 石渣料

开挖石渣岩性为不同风化程度的马山口组石英砂岩和安山岩、云梦山组石英砂岩和页岩。根据室内大型三轴试验结果,全风化安山岩的抗剪强度最低,线性强度指标为 $C_{cu}=0.003\text{MPa}$, $C_u=14.1$, 非线性抗剪强度指标为 $\varphi_0=14.8^\circ$, $\Delta\varphi=0.6^\circ$ 。根据稳定计算结果,使用该坝料因其强度指标过低,坝坡稳定不满足要求。因此,全风化安山岩开挖料不允许上坝,作弃料处理。

全、强风化砂页岩混合料的抗剪强度相对较高,压缩性较低。该坝料因全强风化岩比例不同,性质可能会有较大差别,属于比较软弱的堆石料,用于河槽段及台地较高坝段下游干燥区坝壳填筑,可以满足设计要求。

开挖石渣料中马山口组石英砂岩抗风化能力较强,基本为弱微风化料,为较好的硬岩堆石料,在大坝下游坝壳填筑利用量很大,石英砂岩和微风化安山岩主要用于河槽等较高坝段下游坝壳填筑,下游最高尾水位高程 94.14m 以下坝壳采用该坝料填筑,实际填筑至高程 95.00m。其他石渣用在高程 95.00m 以上。

3. 坝体排水反滤设计

(1) 坝体反滤排水布置。斜墙坝段紧靠粘土斜墙和围堰防渗体下游设坝体反滤排水带,底部通过水平排水带与下游坡贴坡排水相连,共同组成坝体排水系统。

在 2+700.00~3+600.00 坝段,坝高较低,高度为 9.00~20.00m,作用水头较小,防渗体下游坝壳采用溢洪道开挖的粘土质砂砾岩外包页岩为主的风化渣料填筑。该坝料级配和天然砂砾料接近,在下游坝壳粘土质砂砾岩与上游粘土防渗体和下游坝基土层之间只设厚 1.00m 的粗砂层作为坝体反滤排水带和底部水平排水带,断面相对简化。

在 3+600.00~4+084 较高台地坝段,防渗体下游坝壳亦采用粘土质砂砾岩外包页岩为主的风化渣料填筑。该段防渗体下游反滤排水厚 1.20m 加 2.00m 厚的砂砾料排水过渡层。该段坝底部水平排水带在左岸台地低液限粘土坝段由 0.50m 厚反滤粗砂和 1.50m 厚砂砾料组成,以满足砂砾料水平排水带和底部坝基土层及上部坝体之间的层间过渡关系。

在 4+084 以右较高台地坝段,防渗体下游坝壳亦采用粘土质砂砾岩外包页岩为主的风化渣料填筑。该段防渗体下游反滤排水为 1.20m 厚粗砂加 2.00m 厚的砂砾料排水过渡层。该段坝底部水平排水带在左岸台地低液限粘土坝段由 0.50m 厚反滤粗砂和 1.50m 厚砂砾料组成,以满足砂砾料水平排水带和底部坝基土层及上部坝体之间的层间过渡关系。

在河床漫滩坝段,下游坝壳填筑区高程 95.00m 以下为硬岩堆石料,以上为风化砂页岩开挖料、河床开采砂砾料及粘土质砂砾岩(约高程 106.00~112.00m,外包风化砂页岩料)。该段防渗体下游反滤排水厚 1.20m 加 2.00m 厚的砂砾料排水过渡层,在坝壳区和硬岩相接时还增加了细堆石料过渡层。河槽坝基为 Q_4 卵石混合土,底部水平排水带直接采用和坝基材料相同的砂砾料填筑,水平排水带原设计厚度为 3.00m,在河槽段采用砂砾料大面积找平到高程 85.00m 后,根据实际施工情况和料源条件,水平排水带厚度减少为 2.00m,其中下部为 0.70m 厚筛余粗砂料,上部为 1.30m 厚天然砂卵石料;右岸残留一级阶地坝段表层为 Q_4 低液限粘土和粉土,抗冲蚀能力较差,该层和下游水平排水带天然砂砾料之间设 0.70m 厚的粗砂反滤层。此外,防渗体底部和坝基卵石混合土及一级阶地低液限粉土之间亦设 0.70m 厚的反滤层。

(2) 防渗土料和反滤层反滤排水设计。防渗体土料为粘性土, 不含大于 5mm 颗粒, 小于 0.075mm 颗粒含量均在 90% 以上, 按《碾压式土石坝设计规范》(SL 274—2001), 反滤层由 $D_{15} \leq d_{85}$ 确定, 防渗土料 $d_{85} = 0.049 \sim 0.056\text{mm}$, 计算反滤层 $D_{15} \leq 0.441 \sim 0.504\text{mm}$, 按排水要求反滤层 $D_{15} \geq 4d_{15}$, 计算 $D_{15} > 0.064 \sim 0.084\text{mm}$ 。

从表 1-1 可以看出, 反滤控制粒径满足保护和排水要求。第三方检测防渗土料水平向渗透系数为 $10^{-6} \sim 10^{-7}\text{cm/s}$, 反滤层的渗透系数为 $1.5 \times 10^{-2} \sim 8.0 \times 10^{-2}\text{cm/s}$, 渗透系数相差数千倍, 反滤层的排水能力是有保证的。

表 1-1 反滤层和过渡层上坝颗粒汇总表

料 区 名 称	控 制 粒 径 (mm)				
	最大粒径	d_{50}	d_{10}	d_{15}	d_{85}
2+700.00~4+150.00 反滤层	40	0.6~2.0	0.12~0.3	0.16~0.4	1.5~13.0
2+700.00~4+150.00 砂砾料排水层		28.0~42.0	0.4~0.7	0.68~1.4	65.0~74.0
4+150.00~4+704.00 反滤层	40	0.5~2	0.10~0.29	0.12~0.38	2.1~11.0
4+150.00~4+704.00 砂砾料排水层	200	1.5~80	0.28~1.6	0.45~3.0	9.0~100.0

(3) 排水反滤层和砂砾料排水带。反滤层为无粘性土, 它和砂砾料之间是否满足层间反滤关系可通过碾压式土石坝设计规范附录 B 计算公式验算, 判断反滤是否满足对被保护土的级配包线要求。从安全考虑取 d_{85} 的小值, 保护土在级配包线中取 D_{15} 的大值, 满足排水则相反。按表 1-1 反滤层的特征粒径计算, 4+150.00~4+704.00 范围 $D_{15}/d_{85} = 1.43 < 4 \sim 5$, 满足反滤要求, $D_{15}/d_{15} = 1.18 < 5$ 不满足排水要求, 说明天然砂砾料作为反滤层的反滤偏细。但 D_{15}/d_{15} 之比主要反映透水性递增的要求, 从渗透系数比较, 砂砾料排水带比粗砂反滤层的渗透系数大一些, 尚可满足渗透性递增的要求, 且反滤排水层厚度较大, 根据渗流计算结果, 可有效地降低浸润线, 保证大坝的渗流安全。

(4) 护坡及表面排水。

1) 大坝上游采用 240mm 厚预制混凝土水工连锁砖护坡。混凝土水工连锁砖之下设垫层。

2+665.50~4+150.00 段高程 107.40m 以上垫层原则上总厚度 1500mm, 分底部粗砂厚 100mm、砂砾料厚 400mm、筛余卵砾石厚 1000mm。护坡由砌石改为混凝土水工连锁砖时部分斜墙上游削坡已施工完毕、2+665.50~2+700.00 段为过渡段, 此两部分处理方法采用加厚或减薄筛余卵砾石厚度进行调整。高程 107.40m 以下垫层总厚度 760mm, 分底部粗砂厚 100mm、350g/m² 反滤土工布、筛余卵砾石厚 660mm, 高程 107.40m 戕台采用 200mm 厚 C25 现浇混凝土护砌, 下部垫层总厚度 600mm, 分底部粗砂厚 100mm、砂砾料厚 500mm。

2) 大坝下游上部采用 80mm 厚混凝土凸块砖, 下部采用 100mm 厚水工透水砖, 凸块砖之下垫层原则上厚度为 200mm。

根据筛余卵砾石因碱活性问题无法作为混凝土骨料, 筛余卵砾石料弃料量较大的情况, 下游护坡垫层原设计均采用筛余卵砾石料, 并在其下部加设一层 350g/m² 反滤土工布。筛余卵砾石垫层厚度在桩号 2+700.00 以左均质坝段和桩号 3+600.00 以右斜墙坝段