

大型水库工程 施工关键技术研究与应用

林四庆 李永江 曹先升 严实 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

大型水库工程 施工关键技术研究与应用

林四庆 李永江 曹先升 严实 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书系统介绍了建设单位工程的施工技术, 主要内容包括: 绪论、大坝基础工程施工关键技术研究与应用、坝体填筑关键技术研究与应用、大坝混凝土施工关键技术研究与应用、泄洪及引水发电工程施工关键技术研究与应用、其他关键技术研究与应用等。

本书适用于水利水电工程设计、管理与施工人员, 也可作为大专院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大型水库工程施工关键技术研究与应用 / 林四庆等
著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 11
ISBN 978-7-5170-6102-1

I. ①大… II. ①林… III. ①大型水库—工程施工—
研究 IV. ①TV62

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第300586号

书 名	大型水库工程施工关键技术研究与应用 DAXING SHUIKU GONGCHENG SHIGONG GUANJIAN JISHU YANJIU YU YINGYONG
作 者	林四庆 李永江 曹先升 严实 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 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	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	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 38.25印张 906千字
版 次	2017年11月第1版 2017年11月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	168.00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

河口村水库工程位于济源市克井镇黄河一级支流沁河最后一段峡谷出口处，水库控制流域面积 9223km^2 ，占沁河流域面积的 68.2% ，占黄河小浪底至花园口无工程控制区间面积的 34% 。工程任务是以防洪、供水为主，兼顾灌溉、发电、改善下游河道生态基流，为大（2）型水利枢纽工程，由混凝土面板堆石坝、泄洪洞、溢洪道及引水发电系统组成。工程总库容 3.17亿 m^3 ，总投资 27.75亿元 ，总工期 60个月 。

河口村水库是国家 172 项节水供水重点水利工程之一，也是河南省“十二五”期间的重点建设项目。水库建成后将沁河下游河道防洪标准不足 25 年一遇提高到 100 年一遇，减轻沁河下游的洪水威胁。水库与三门峡、小浪底、故县、陆浑等水库联合调度，可使黄河花园口 100 年一遇洪峰流量削减 $900\text{m}^3/\text{s}$ ，从而减轻黄河下游堤防的防洪压力，减少东平湖滞洪区分洪运用几率，进一步完善黄河下游防洪工程体系，改善了黄河下游调水调沙条件；同时还能保证南水北调中线工程总干渠穿沁工程等基础设施的防洪安全，发挥巨大的防洪减灾效益。工程运行后，每年向济源市、焦作市及华能沁北电厂提供城镇生活及工业用水量 1.28亿 m^3 ，提供下游灌溉面积 31.05万亩 （ $1\text{亩}=666.67\text{m}^2$ ），补源面积 20万亩 ，改善沁河下游生态环境，保证沁河下游五龙口断面 $5\text{m}^3/\text{s}$ 的流量。

中华人民共和国成立以来，水利部黄河水利委员会（以下简称黄委会）和山西、河南两省曾多次对沁河干流工程进行规划研究，1956 年初，黄委会组织专业水利工程技术人員到济源河口村实地考察后认为，河口村的山势地貌适宜修筑水库，要彻底解决沁河下游及减少入黄流量、削减入黄河洪峰，唯有在该河口村峡口出口处筑坝，峡谷内拦蓄洪水，控制洪水；初步提出了“在河口村修筑水库”的意见。但由于适逢中华人民共和国成立初期，人力、物力，财力及技术等方面条件尚不成熟而搁浅。直至 20 世纪 80 年代初，黄委会设计院（黄河勘测规划设计有限公司）经过对沁河五龙口以上坝址进行查

勘设计，于1980年5月初步提出工程规划阶段的《沁河河口村水库初步设计阶段报告》，确定河口村水库的开发任务为防洪、灌溉并兼顾发电，推荐选用河口村坝址。1991年，黄委会设计院向国家提交的《沁河水资源利用规划报告》得以批准，1994年，河南省人民政府将河口村水库工程确定为河南省重点建设的三座大型水库之一。2005年3月，黄河设计公司正式编制了《沁河河口村水库工程项目建议书》呈报水利部水利水电规划设计总院。水利部于2005年5月作出批复，决定由河南省组建项目法人，河南省水利厅于当年7月21日成立河南省河口村水库筹建处；2008年8月，河南省历经两年多的筹建，正式成立河南省河口村水库工程建设管理局，至此，河口村水库工程建设步入正轨，河口村水库工程建设全面开启。2009年2月，国家发展和改革委员会（以下简称国家发改委）以（发改农经〔2009〕562号）批复项目建议书；2011年2月25日，国家发改委予以发改农经〔2011〕413号文批复《沁河河口村水库工程可行性研究报告》；2011年12月30日，水利部以水总〔2011〕686号文正式批复《沁河河口村水库工程初步设计报告》。

河口村水库于2008年5月前期工程开工，2011年4月主体工程开工，2011年10月19日大坝截流，2013年12月25日导流洞下闸封堵蓄水，2014年9月23日水库下闸蓄水，2015年12月主体工程完工，2016年10月水库工程全部完工，2017年工程竣工验收。

河口村水库坐落于沁河最后一个出山口的弯道处，这里地质条件复杂，涉及大小断层14条，特别是122.5m的大坝建在厚达42m的覆盖层上，高达百米的两座泄洪洞进水塔坐落在大坝上游左岸的狭窄陡坡岸边。同时河口村水库建设工期紧、任务重，涉及各项工程施工计划、技术及专项方案调整、深覆盖层基础处理、工程提前开工、大坝截流及坝基处理提前施工干扰、大坝及泄洪洞施工与安全度汛、泄洪洞与导流洞同期施工爆破与干扰影响、泄洪洞（导流洞）爆破开挖与武庙坡大断层影响、泄洪洞进口高塔架混凝土运输及浇筑、泄洪洞进水塔大体积混凝土温控防裂等多项技术难题。

河口村水库的建设者们坚持科学指导施工，科学创新过程，科学服务工程，加大科研投入，借科技“尖刀”破难攻坚，采用了10多项新技术、新材料、新工艺，解决了典型建筑物施工技术与工艺、设备、结构等难题，保证了工程建设质量、安全和进度，取得了一批科研成果：其中1项达到国际先进水平；7项达到国内领先水平；1项获省自然科学学术一等奖，5项分获河南

省科技进步二等奖、三等奖；5项获河南省水利科技进步一等奖、二等奖；5项获河南省优秀工程咨询成果一等奖、二等奖、三等奖；19项获国家发明专利或实用新型证书；中国钢结构金奖1项；公开发表学术论文约140篇。

河口村水库的建设不仅为当地勾勒出一幅“高峡出平湖”的美丽画卷，它也凝聚着几代水利人的智慧和汗水，展现出整个建设过程中参与设计、建设管理、监理及施工等单位的广大工程技术及管理人員的求实创新、科技创新的精神，昭示出河口村水库水利人科学治水的新战略、新思路，彰显着共享、创新、绿色等发展的新理念。为了更好地总结河口村水库施工期施工关键技术等方面的经验与教训，项目法人组织参建人员编写本书。本书分绪论、大坝基础工程施工关键技术研究与应用、坝体填筑关键技术研究与应用、大坝混凝土施工关键技术研究与应用、泄洪及引水发电工程施工技术研究与应用、其他关键技术研究与应用，介绍了各建设单位工程的施工技术，并针对一些关键技术问题或技术创新做了重点介绍，以此书丰富河南省水利工程施工关键技术方面的技术宝库，也为后期的水利工程设计、管理与施工人员提供參考。

本书以河口村水库施工期施工关键技术为主要内容，第1章由林四庆、郑会春、李泽民、竹怀水编写；第2章由李永江、汪军、任博、潘路路、陈相龙、申志、尹聪科编写；第3章由曹先升、魏水平、郭文良、吕仲祥、孙志伟、严俊、任炳昱、卢金阁、张亚铭、闫二磊编写；第4章由孙觅博、建剑波、解枫赞、徐腾飞、赵文博、武鹏程编写；第5章由严实、甘继胜、梁军、王勇、翟春明、王冬冬、杨盼根、冯相辉、黄达海、司马军、董志强、王建飞、陈尊、吴庆申编写；第6章由张兆省、杨金顺、于宗泉、姜龙、张玉霞、张华、赵兆、王长生、王丙申编写。

在工程施工和本书编写过程中，各建设单位和研究单位作出了应有的贡献，李永江、李泽民对全书进行了校对，华北水利水电大学汪伦焰教授、郭利霞和郭磊副教授对全书进行了审稿，书中引用了其他文献资料，在此表示衷心感谢！

限于作者水平有限，书中如有不当之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2017年4月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 工程设计	1
1.2 施工组织设计	24
1.3 施工期技术问题综述	32
2 大坝基础工程施工关键技术研究与应用	38
2.1 高坝大库深覆盖层地基处理措施研究	38
2.2 高压旋喷桩、防渗墙及帷幕检测技术应用	52
2.3 坝基防渗墙缺陷处理措施研究	90
2.4 大坝防渗墙墙段连接接头管技术	93
2.5 大坝基础工程施工	95
3 坝体填筑关键技术研究与应用	136
3.1 大坝应力应变数值模拟研究	136
3.2 复杂地基条件下面板坝筑坝技术和安全控制先进系统	175
3.3 大坝填筑质量实时 GPS 监控系统研究	235
3.4 挤压边墙在河口村水库大坝填筑中的应用	248
3.5 大坝主堆料施工期级配调整处理	252
3.6 坝体填筑施工	254
4 大坝混凝土施工关键技术研究与应用	295
4.1 大坝面板混凝土防裂措施研究	295
4.2 大坝面板柔性止水机械化施工技术研究	305
4.3 大坝面板裂缝处理技术	308
4.4 趾板及防浪墙模板技术	319
4.5 混凝土面板滑膜布料机及抹光机施工技术	322
4.6 大坝混凝土施工	324
5 泄洪及引水发电工程施工技术研究与应用	346
5.1 泄洪洞高进水塔混凝土浇筑方案暨发明专利	346
5.2 大体积混凝土光纤测温与温控预报技术研究	354
5.3 隧洞特殊支护方案研究	367
5.4 混凝土抗冲耐磨及防裂材料研究	373
5.5 钢模台车技术研究	397

5.6 大型偏心铰弧门安装技术研究 411

5.7 其他施工工法及技术研究与应用 428

5.8 泄洪及引水发电工程施工 451

6 其他关键技术研究与应用 549

6.1 大坝施工与安全度汛工期进度控制研究 549

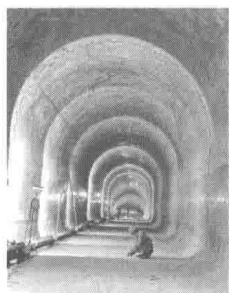
6.2 大坝基坑进水暨围堰过水与施工进度影响研究 552

6.3 大坝观测仪器装置及安装技术研究 553

6.4 水库信息化建设 560

6.5 水库水土保持与生态修复技术应用 587

参考文献..... 599



1 绪论

1.1 工 程 设 计

河口村水库工程位于黄河一级支流沁河峡谷段出口五龙口以上约 9km 处，河南省济源市克井镇内，工程开发任务以防洪、供水为主，兼顾灌溉、发电、改善生态。枢纽为大(2)型工程，由大坝、泄洪(导流)洞、溢洪道及引水电站组成。

1.1.1 大坝工程

1.1.1.1 坝型选择

从项目建议书、可研到初步设计，根据河口村水库坝址区的地形地质条件，天然建筑分布各储运情况，工程坝型选择曾做了黏土心墙坝、沥青混凝土心墙坝、重力坝及混凝土面板堆石坝，最后通过各种方案比较后选择了混凝土面板堆石坝。

河口村水库最早曾设计研究了黏土心墙堆石坝，后来由于原大社土料场地已修建小学、住宅等，其他土料场储量不够，已不具备修建黏土心墙坝的条件，故不再考虑黏土心墙堆石坝坝型。对于重力坝，首先由于坝址处覆盖层较深，做重力坝开挖量大，其次坝址位于弯道处，采用重力坝泄流直接顶冲对岸山坡，对山坡稳定不利，同时坝址下游于 1994 年已经修建河口电站，泄流冲刷电站，因此坝址也不再考虑重力坝型。坝址在可研阶段重点进行混凝土面板堆石坝与沥青混凝土心墙堆石坝坝型比选。其中混凝土面板堆石坝根据其趾板布置形式，又研究了河床趾板建在基岩上(开挖形式)和河床趾板建在覆盖层上(不开挖形式)两种形式。

根据河口村水库地质地形情况，坝址(线)混凝土面板堆石坝和沥青混凝土心墙坝均适合修建。根据施工条件，沥青混凝土心墙构造较复杂，施工质量、施工设备及施工工艺要求都较高。沥青混凝土心墙坝总投资比面板坝高 4.2%，总工期 67 个月，比混凝土面板坝(不开挖方案)工期长 7 个月；另外，由于沥青心墙坝坝高 124m，国内 120m 左右沥青心墙高坝工程实例和筑坝经验仅有 1 个(冶勒水电站)，加上河口村坝基覆盖层夹层较多构造较复杂，坝体坝基变形较大，坝基防渗墙、帷幕灌浆位置位于坝体中部，不便于工程运用期的检修和维护。因此，沥青心墙坝由于在投资、工期上不具明显优势，且坝体



变形和基础沉降较大,国内外工程实例少。综合上述比较,从投资节省、构造简单、施工方便、工期短,运行期维修方便角度出发,推荐采用混凝土面板堆石坝坝型。

由于河口村水库坝址基础为深覆盖层,又通过对面板基础趾板修建在基岩面上(开挖方案)和趾板修建在覆盖层上(不开挖方案)两种混凝土面板堆石坝结构进行了比较,两种方案技术上均是可行的,开挖方案比不开挖方案投资增加约18%,不开挖方案同时可以缩短工期约4个月,且施工方便。综合上述比较,运用工程类比、相关资料分析、结合坝坡稳定计算、大坝三维有限元应力应变计算分析等成果,类比梅溪、那兰、察汗乌苏、九甸峡等国内100m以上高面板坝建在深覆盖层上的工程实践经验及有关专题研究成果,初步认为不开挖方案是可行的。因此,最后推荐采用面板基础趾板建在覆盖层上的混凝土面板堆石坝作为河口村水库的代表坝型(见图1.2)。

1.1.1.2 坝线选择

河口村水库坝址区吓魂潭至河口村,全长2.5km地段,呈反S形,设计前期曾在水库附近自上而下选择了四条坝线,根据各坝线地形地质条件,结合不同坝型比较,一坝线、四坝线均存在古河道需要处理,且一坝线有 F_{11} 断层分布于两岸坝肩,又存在I级、II级阶地处理工程量较大。在可研阶段舍掉一坝线,重点比较了二坝线、三坝线、四坝线,经过技术经济比较后推荐二坝线。通过对二坝线和四坝线混凝土面板堆石坝、三坝线碾压混凝土重力坝进行技术经济比较,三条坝线都不存在制约否定该坝型的技术因素,存在的地质问题都可以通过工程措施予以解决。只是三坝线碾压混凝土重力坝方案工程投资较二坝线混凝土面板堆石坝方案增加2200万元,四坝线比二坝线和三坝线地质条件都好,但投资要比二坝线方案增加19900万元,因此,在可研阶段初步选定了二坝线。进入初步设计阶段,在二坝线的基础上进一步进行了优化比较和论证,结合混凝土面板堆石坝特点,尽可能使坝轴线与主河道趋于正交,以缩短坝轴线长度,减小坝体填筑量;按照趾板布置合理、两岸开挖量少,经济合理、安全可靠的要求,从地形地质条件、工程总体布置、施工条件、工程投资等方面最终比较确定坝轴线为二坝线,其控制坐标为:坝左A: $X=376952.098$, $Y=3896927.693$;坝右B: $X=377163.810$, $Y=3897439.900$ 。坝轴线长530m。

1.1.1.3 坝体结构布置

河口村水库最大坝高122.5m,坝顶高程288.50m,防浪墙高1.2m,坝顶长度530.0m,坝顶宽9.0m,上游坝坡1:1.5,下游坝坡1:1.5,坝后高程220.00m以下为坝后堆渣,堆渣边坡1:2.5,设10.0m宽的“之”字形上坝公路从下游围堰(高程184.00m)至高程220.00m平台。坝体自上游至下游分别为上游压盖、面板、垫层区、过渡层区、主堆石区、下游堆石区以及下游压坡组成。大坝防渗是在坝体上游面布设钢筋混凝土面板,面板基础为趾板,其中河床段趾板置于深覆盖层上,两岸趾板均坐落于基岩上,趾板与防渗面板(周边缝)设止水连接,形成坝基以上的防渗体;河床段趾板下坝基覆盖层采用混凝土防渗墙截渗,防渗墙下设帷幕灌浆,防渗墙与趾板通过连接板连接,使坝基与坝体形成完整的防渗体系。大坝面板上游死水位以下设壤土压盖(防渗补强区),靠近面板铺设粉煤灰和壤土,外面是石渣压盖;大坝下游为弃渣压戗区,主要堆积大坝等建筑物开挖弃料。

大坝平面布置见图1.1,混凝土面板堆石坝见图1.2。



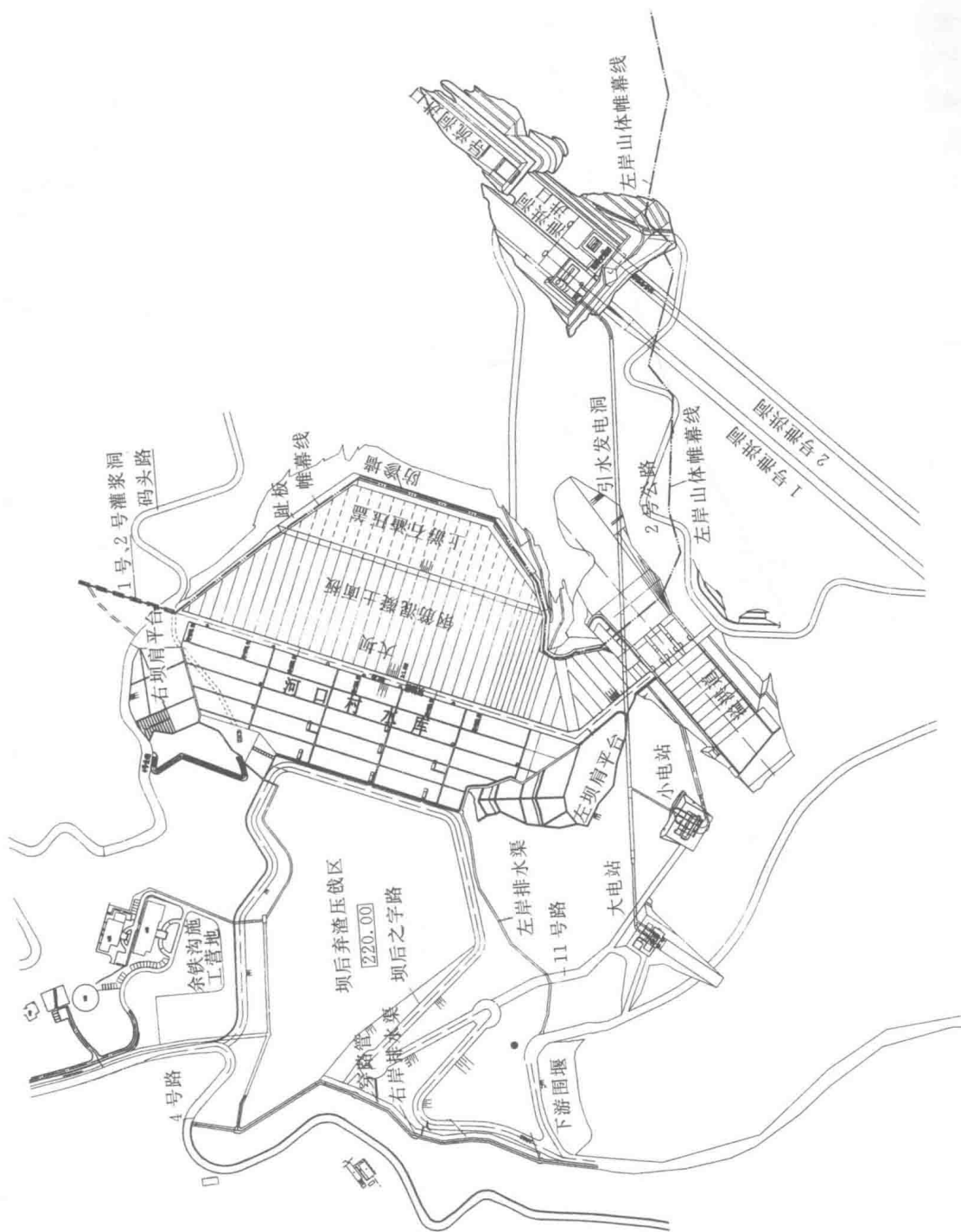


图 1.1 大坝平面布置图

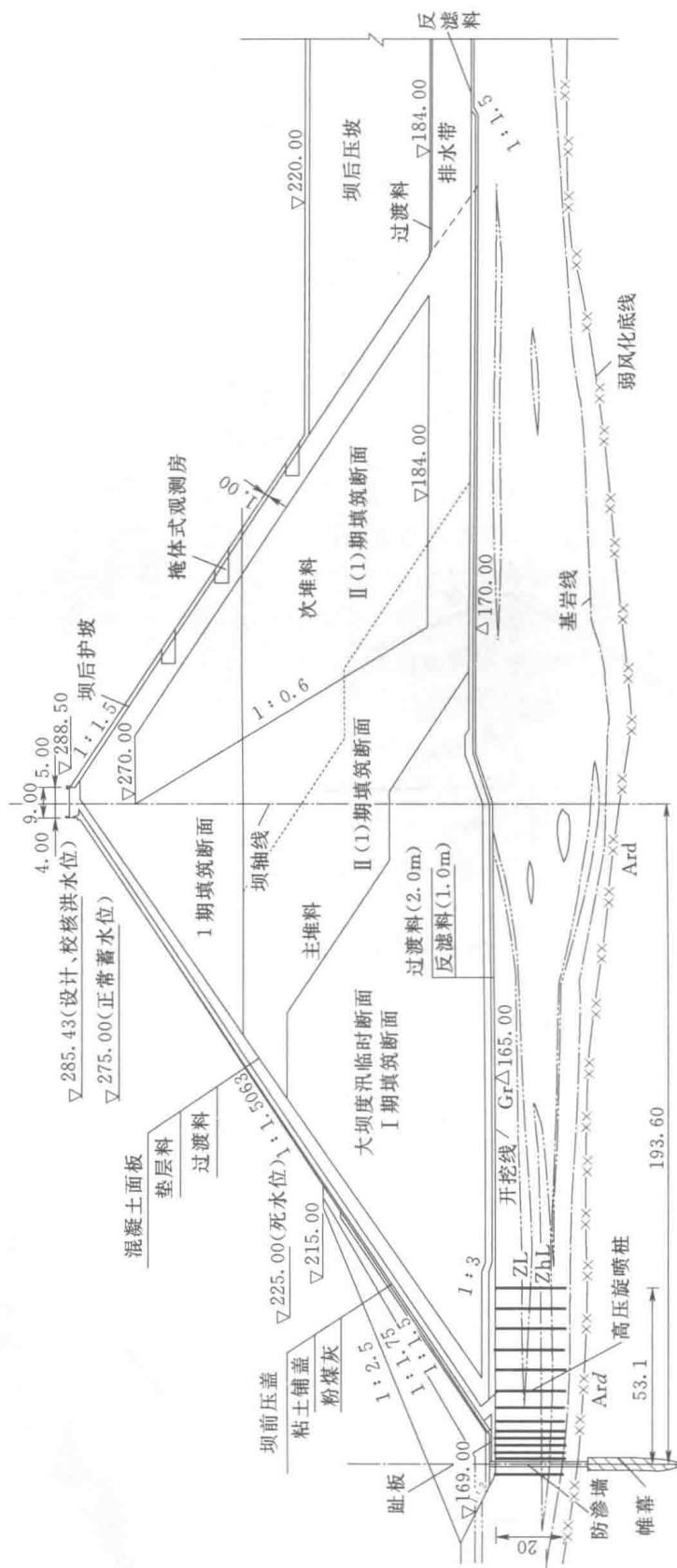


图 1.2 混凝土面板堆石坝横剖面图(单位:m)

1.1.1.4 筑坝材料及填筑标准

大坝分区从坝前压盖至下游坝坡划分为坝前压盖—挤压边墙—垫层料—过渡料—主堆料—次堆料—坝基反滤料—下游预制块护坡—坝后石渣压坡—坝基及坝后石渣压坡下排水带。

(1) 坝前压盖设计。对于高面板坝，由于死水位以下的面板及接缝，很少有放空水库进行检修的机会，因而加设上游铺盖及其盖重区。该料区位于面板上游周边缝处，也属于辅助防渗设施。顶部高程 215.00m，顶部宽度为 6.0m，分内外两层布置。内层为粉煤灰和壤土料，其中粉煤灰作为面板开裂及周边缝止水损坏后的自愈填充材料，粉煤灰铺盖(1A2) 水平宽度 1.0m。在粉煤灰铺盖上游设壤土铺盖(1A1)，顶部水平宽度 4.0m，上游坡 1：1.75，采用轻、中粉质壤土，压实后的干密度 $\gamma_d \geq 1.65\text{g/cm}^3$ ，渗透系数不小于 10^{-4}cm/s ；外层为开挖石渣料，顶宽 6m，上游坡 1：2.5，用于保护内层土料，防止库水冲蚀，石渣压实后的干密度 $\gamma_d \geq 2.12\text{g/cm}^3$ 。

(2) 挤压边墙设计。混凝土面板堆石坝在进行大坝上游垫层料填筑时，为保证上游坡面碾压密实，一般向上游侧超填一定宽度，进行水平碾压，待垫层料铺填一定高度后，进行人工削坡整理、修整，斜坡碾压，然后喷 8~10cm 砂浆（或喷涂乳化沥青）进行固坡。这种施工方法的优点是技术成熟、施工容易掌握，但缺点存在垫层料斜坡面密实度难以保证、施工工序复杂、坡面易受雨水冲刷、垫层料超填后坡面整理及浪费量较大。

挤压边墙是面板坝垫层料坡面保护及固坡的一种新型施工技术，由于其混凝土强度低、弹模低，和垫层料有同等的半透性；同时由于挤压边墙为素混凝土结构，特别针对本工程施工期有临时挡水度汛要求，可以大大提高坝体挡水安全度汛的安全性；况且该挤压边墙属于早强混凝土，施工简单易行，施工方便，安全可靠，因此大坝在进行上游垫层料填筑时引进了挤压边墙新技术。主要在施工垫层料之前先采用定型挤压机挤压形成一道坡面垫层料拦渣墙，拦渣墙的高度跟随大坝上游面垫层料摊铺高度布置，可满足与垫层料同步上升的要求。在进行上游面垫层料施工时，通过挤压边墙的拦渣作用，防止垫层料坍塌，保护并形成垫层料上游坡面；因而具有能保证垫层料压实质量、提高坡面防护能力以及降低劳动强度、避免垫层料浪费等特点。

挤压边墙混凝土技术指标见表 1.1。

表 1.1 挤压边墙混凝土技术指标表

项 目	干密度/(g/cm ³)	渗透系数/(cm/s)	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa
指标	>2.1	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	3000~5000	3~5

挤压式边墙断面为梯形，墙高为垫层料的设计铺填厚度 40cm，边墙上游侧坡度与混凝土面板堆石坝的上游坝坡相同，为 1：1.5，顶部宽度为 10cm，边墙下游侧坡度采用 8：1。由于挤压边墙也为混凝土结构，为消除挤压边墙对面板的基础约束，在沿面板垂直缝方向将挤压边墙凿断，其凿断缝底宽度不小于 6cm，缝口宽度不小于 10cm，凿断后采用小区料填缝并人工分层锤实，其次在挤压边墙表面喷涂“三油两砂”，即在乳化沥青喷涂后撒砂，待其与沥青固化胶结后形成具有一定厚度的胶砂混合体“油-砂结构”，起到隔离挤压边墙和混凝土面板的作用。

(3) 垫层料 (2A) 设计。垫层料 (2A) 位于面板挤压边墙下部, 主要作用是面板提供均匀、平整、可靠的支撑面, 避免面板产生应力集中, 当面板开裂和止水局部破坏时, 对上游堵缝材料起反滤作用, 限制渗漏, 为面板坝提供第二道渗漏防线。

坝址区附近缺少天然砂砾料, 因此垫层料采用石料场中新鲜、坚硬的厚层灰岩人工轧制掺配而成, 饱和抗压强度不小于 60MPa。料源来自坝址下游约 3km 河口村村后山石料场, 为奥陶系马家沟组 (O_2m^2) 灰色厚层状白云岩、白云质灰岩和灰岩。垫层料的最大粒径采用 80mm, 由于小于 5mm 颗粒的含量对垫层的压实特性、渗透特性、抗剪强度、施工性能以及自愈反滤作用均有很大的影响, 根据谢腊德曲线, 类比其他已建灰岩坝料工程, 综合考虑, 垫层料小于 5mm 颗粒的含量定为 35%~50%; 为保证它的半透水性, 垫层料小于 0.075mm 细粒含量小于 8%。渗透系数 K 控制在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s, 填筑干密度 $\gamma_d \geq 2.29$ g/kg, 孔隙率 $n \leq 16\%$ 。垫层料设计水平宽 3m, 填筑层厚 40cm, 采用 22t 以上振动碾碾压。

在面板周边缝下游侧设置薄层碾压的特殊垫层料 (2B), 主要为面板周边缝底部止水提供比垫层料更密实、均匀、平整的支撑面。当止水局部破坏出现渗漏时, 加强垫层料对渗漏的控制。因此, 特殊垫层料的最大粒径应比垫层料更小, 小于 5mm 颗粒的含量更多。根据国内外工程经验, 特殊垫层料采用剔除大于 40mm 以上垫层料颗粒后剩余的部分。其最大粒径 40mm, 小于 5mm 颗粒的含量为 35%~60%, 小于 0.075mm 颗粒的含量为 5%~10%, 填筑层厚 20cm, 采用大功率平板震动碾压实, 设计干密度 2.20 t/m³。

(4) 过渡料 (3A) 设计。过渡料 (3A) 位于垫层与主堆石料之间, 形成对垫层粒径的过渡和反滤作用, 防止垫层中细颗粒的流失, 变形特点和强度介于垫层料和主堆料之间, 要求饱和抗压强度不小于 60MPa, 级配良好, 并满足各种料之间的反滤要求。料源来自河口村石料场, 爆破开采微风化岩石, 最大粒径 $D_{\max} = 300$ mm, 小于 5mm 的颗粒含量为 12.1%~25%, 小于 0.075mm 的颗粒含量不大于 5%, 级配连续。填筑干密度 $\gamma_d \geq 2.21$ g/cm³, 孔隙率 $n \leq 19\%$, 渗透系数 K 控制在 10^{-2} cm/s, 填筑厚度为 40cm。在制备料过程中需进行专门的爆破设计和现场试验, 满足连续级配要求, 同时满足对垫层料反滤要求, 必要时可掺配一定比例的人工砂等细料。过渡层顶部水平厚度为 3.0m, 上游侧坡度 1:1.5, 下游侧坡度 1:1.45。过渡料填筑厚度为 40cm, 采用 22t 以上振动碾碾压。

在大坝主堆石体、次堆石体与大坝两岸岸坡相接处以及堆石体与其他建筑物相接处均采用过渡料填筑, 以确保结合紧密, 填筑水平宽度 1.5m。坝基主河槽基础面反滤料和主堆料之间也设有过渡料, 坝轴线上游过渡料厚 2.0m, 坝轴线下游厚 1.0m, 以确保反滤料和主堆料反滤过渡。

(5) 主堆料 (3B) 设计。主堆料 (3B) 是大坝的主要承载结构, 是水荷载的主要传递区, 对坝体稳定和面板变形具有重要意义, 应满足抗剪强度高、压缩性低和透水性强的要求, 要求压缩模量高, 抗剪强度大, 饱和抗压强度不小于 60MPa。料源来自河口村石料场, 爆破开采微弱风化料, 控制最大粒径 800mm, 小于 5mm 的颗粒含量为 10.0%~20.0%, 小于 0.075mm 的颗粒含量不大于 5%, 级配连续。干密度 $\gamma_d \geq 2.2$ g/cm³, 孔隙率 $n \leq 20\%$, 渗透系数 K 控制在 10^{-1} cm/s, 压实后层厚 80cm, 采用 22t 以上振动碾碾压。



主堆石体除主要填筑在大坝坝轴线上游，在大坝坝轴线下游次堆石以下，下游河床最高水位高程 184.00m 以下整个坝基范围，为满足坝基排水要求，也采用主堆料填筑，以作为坝基排水带；在坝轴线下游次堆石外部（坝下坡）也设有主堆料包边，以确保大坝下游坡边坡在地震工况下满足边坡稳定要求。

河口村混凝土面板堆石坝主堆石料、过渡料、垫层料级配曲线见图 1.3，坝体填筑料设计指标及碾压参数见表 1.2。以上各区的设计填筑标准，还需现场爆破及碾压试验复核和修正。

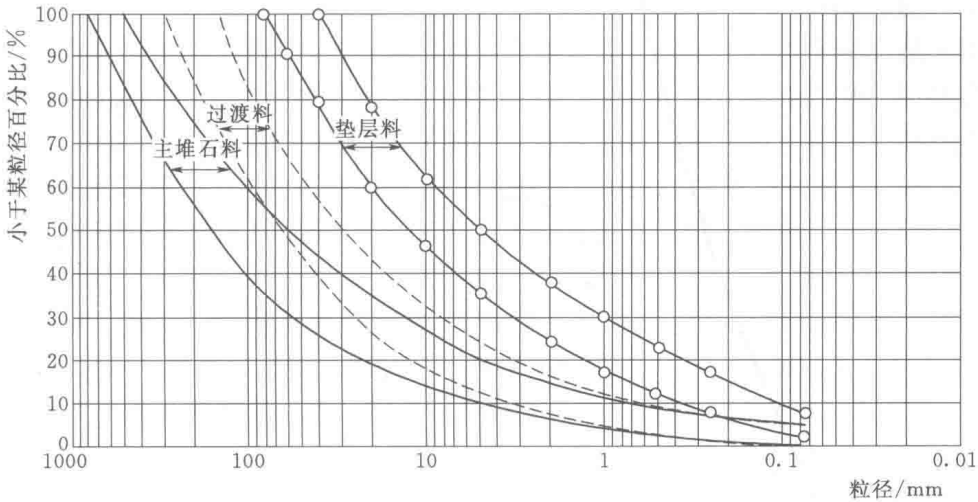


图 1.3 主堆石料、过渡料、垫层料级配曲线图

(6) 次堆料 (3C) 设计。次堆石料 (3C) 位于坝轴线下游主堆石区后侧，受水荷载影响较小，其压缩变形对上游面板变形的影响也相对较小，仅起到稳定下游坝体的作用，因此对该区的坝料和铺填碾压要求低于主堆石区。为节省投资，原则上尽可能多的利用枢纽工程各建筑物如坝基、溢洪道、泄洪洞及引水发电洞等开挖弃料（岩性灰岩、砂岩、页岩、花岗片麻岩及花岗岩等），不足部分取自石料场的微风化、弱风化料等。饱和抗压强度不小于 40MPa，控制最大粒径 80cm（原设计为 100cm，施工期修改），小于 0.075mm 的颗粒含量不大于 8%，次堆石干密度 $\gamma_d \geq 2.12\text{g/cm}^3$ ，孔隙率 $n \leq 21\%$ 。填筑层厚 80cm（原设计为 120cm，施工期修改），采用 22t 以上震动碾压实。

(7) 坝基反滤料设计。主坝基础过渡料与河床覆盖层接触段、排水带和覆盖层接触段之间均设一层反滤料，料源来自石料场，但需人工轧制掺配而成。饱和抗压强度不小于 60MPa。最大粒径 60mm，粒径小于 5mm 含量 35%~55%，粒径小于 0.074mm 含量不大于 8%，相对密度 0.75，渗透系数不小于 10^{-3}cm/s ，碾压后层厚 40cm。

(8) 下游预制块护坡 (3D) 设计。下游坝面护坡 (3D) 主要保护下游主堆石边坡，同时满足坝坡稳定及抗震要求；其次结合运行期美化要求，采用混凝土异形块+混凝土格梁护坡。格梁宽 1.2m，厚 0.4m，采用 C25 混凝土，内配构造筋，格梁间距约 20m；格梁之间设 C25 混凝土异形块，异形块尺寸为 50cm×50cm，厚 12cm，异形块基础下设 50cm 厚垫层料。



(9) 坝后石渣压坡（4A 区）设计。河口村水库建筑物开挖时存在大量弃渣，由于场址狭窄，根据环保要求，结合大坝下游坝坡稳定及防止坝基覆盖层及夹砂层在 8 度地震下液化，将大坝、溢洪道、电站等建筑物开挖弃渣，及坝下河道滩地 1 号临时堆渣场需回采料布置在坝后坡脚高程 220.00m 以下，形成坝后石渣压坡盖重。石渣压坡从坝脚一直延伸到坝下游围堰结束，全长约 360m，其中 220.0m 平台面积约 4.8 万 m²，高约 50.0m，可堆积约 230 万 m³。坝后石渣压坡从下游围堰高程 184.00 至高程 220.00m 平台之间设之子路，之子路之间边坡为 1：2.5，坡面植草，除保护边坡外，也起到环保绿化作用。

(10) 坝基及坝后石渣压坡下排水带设计。为确保坝基渗水能够顺利排出坝外，在坝体与主河槽结合部设坝基排水带。排水带在大坝坝轴线上游，利用主堆石体作为坝基排水带，在坝轴线下游次堆石高程 184.00m 以下整个坝基范围以及坝后石渣压坡下均采用主堆料作为坝基排水带。坝后压坡区排水带一直延伸到下游围堰，从高程 184.00m 渐变至 177.00m，并从下游围堰穿出，以确保基础渗水排出进入下游河道。排水带末端设干砌石护坡保护。坝基范围内排水带料指标要求同主堆料，坝后压坡下排水带控制干密度 $\gamma_d = 2.12 \sim 2.17 \text{g/cm}^3$ ，孔隙率 $n = 22\% \sim 23\%$ ，渗透系数 K 控制在 1cm/s。

排水带与河床接触部位设反滤料，其中坝基范围反滤料厚 1.0m，坝后压坡区为 0.3m，坝基范围反滤料和排水带之间设过渡料，坝轴线上游过渡料厚 2.0m，坝轴线下游厚 1.0m，坝后压坡区基础反滤料和排水带料直接连接。坝后排水带顶部与石渣压坡之间设厚 50cm 过渡料，以保护坝后排水带。

表 1.2 坝体填筑料设计指标及碾压参数表

料物名称	小区料	垫层料	过渡料	主堆石	次堆石	反滤料
饱和抗压强度（MPa、不小于）	60	60	60	60	40	60
软化系数（不小于）	0.75	0.75	0.75	0.75	—	0.75
孔隙率/%	17	16	19	20	21	—
相对密度	—	—	—	—	—	0.75
干密度/(g/cm ³)	2.20	2.29	2.21	2.2	2.12	2.26
渗透系数 K/(cm/s)	1×10 ⁻³ ~1×10 ⁻⁴	1×10 ⁻² ~1×10 ⁻³	≥1×10 ⁻²	1×10 ⁻¹	—	≥1×10 ⁻³
铺层厚度/cm	20	40	40	80	80	40
最大粒径/mm	40	80	300	800	800	60
小于 5mm 粒径/%	—	35~50	≤25	≤20	—	35~55
小于 0.075mm 粒径/%	—	≤8	≤5	≤5	≤8	≤8
加水量/%	10~20	10	10~20	15~20	10~20	10
碾压设备	大功率平板 振动碾碾压	不小于 22t 的拖式振动碾或同等激振力的自行式碾压设备（带 GPS 实时监控系統）				

1.1.1.5 面板设计

(1) 面板结构尺寸。混凝土面板是坝体的主要防渗结构，其主要作用是防渗。面板厚度随水深渐变，面板结构厚度按不大于 200 的允许水力梯度控制，面板顶端厚度为 0.3m，

底部最大厚度为 0.72m, 最大水力梯度 170 (<200), 满足抗渗要求。

(2) 面板混凝土设计。根据已建工程经验, 拟定面板混凝土采用 C30 高性能混凝土, 抗渗等级 W12, 抗冻等级 F250, 面板总面积 69316m^2 。

(3) 面板配筋。面板配筋的主要目的是为了限制裂缝的开展, 将裂缝宽度限制在 0.2mm 以下, 减少渗漏。大多数已建工程面板均采用单层双向配筋, 近几年建设的面板坝也有采用双层配筋, 特别是高坝采用双层配筋有增多的趋势。配筋率一般为 0.3%~0.5%, 目前有越来越小的趋势。根据本工程三维计算面板的应力分布规律, 类比已建工程经验, 如已建洪家渡面板坝、老渡口面板坝、潘口电站面板坝、斜卡面板坝、盘石头水库等面板坝双层配筋形式, 考虑到本面板坝为 122.5m 的高坝, 且坝基坐落在深覆盖层上, 基础变形大, 由于面板不同部位受力的复杂性, 在施工期和蓄水期往往难以准确判断不同部位面板鼓向上游或者下游, 在相对单层配筋率不变或增加较少的前提下面板布置采用双层双向钢筋。每层配筋率顺坡向为 0.4%~0.5%, 坝轴向为 0.35%~0.4%。为抵抗基础不均匀沉陷产生的弯曲, 避免局部应力集中使混凝土压坏。面板垂直缝和周边缝附近布置抗挤压钢筋。

1.1.1.6 趾板(防渗板)及连接板

(1) 趾板布置。趾板是支撑面板的基础, 与面板通过设有止水的周边缝连接, 形成坝基以上的防渗体。趾板基础原则上建在轻微卸荷带内, 局部可坐落于经过基础处理的强卸荷带内; 其次趾板线布置尽可能平顺, 为避免开挖工程量过大, 可适当设置转折点; 趾板线尽可能避开断裂发育、岩溶洞穴和风化强烈等不利地质条件地基, 使趾板基础的开挖和处理工作量较少。趾板的位置由“X”基准线控制, “X”基准线初期结合地形、地质、结构受力、经济及施工条件择优比较确定, 施工期根据开挖揭露的地质情况, 进行二次调整定线。

(2) 趾板形式与结构尺寸。趾板形式有斜趾板和平趾板两种, 根据本工程的地形地质条件, 均采用平趾板形式, 即趾板横截面上底面线为水平线, 面板与趾板顶面线之间的夹角随趾板轴线与坝轴线之间的交角变化而变化。平趾板体形的优点是趾板的立模、混凝土浇筑、钻孔和灌浆均比较方便, 缺点是开挖工程量较大。

1) 岸坡段趾板。右岸趾板、防渗板整体工程地质条件较好, 断层等构造不发育, 岩体较完整, 强风化层较薄; 岩层倾向坡内, 为逆向坡, 边坡稳定条件较好; 仅在 E_1m^3 地层, 岩性较软, 具有易风化、遇水泥化等特点, 其中还有岩溶现象发育, 工程地质特性较差。左岸岸趾板、防渗板位于一岸边陡坡地形上, 基岩大部分直接裸露, 其处于龟头山褶皱断裂发育区内, 出露的地层主要是太古界登封群 Ard 及中元古界汝阳群 Pt_2r 。基岩岩性坚硬, 受构造影响, 岩体较破碎, 出露有 F_{11} 断层, 边坡稳定条件整体较好。

因此, 在趾板部位, 考虑大部分地段挖除强卸荷带岩体, 将趾板建在弱卸荷带中部岩体上, 极少部分建在强卸荷带下部岩体上, 并对建基岩体进行固结灌浆、置换混凝土处理, 提高建基岩体的抗冲蚀能力。经过处理后的基岩, 其设计允许水力比降采用 15。根据设计允许水力比降, 确定趾板宽度为 6~10m, 相应最大水力比降为 8.08~10.9。

由于趾板存在接触面抗冲蚀稳定要求, 如全部由趾板来承担, 造成趾板尺寸及趾板边坡开挖量都比较大。在满足允许水力比降的前提下, 为减少开挖工程量, 参照国内外其他

