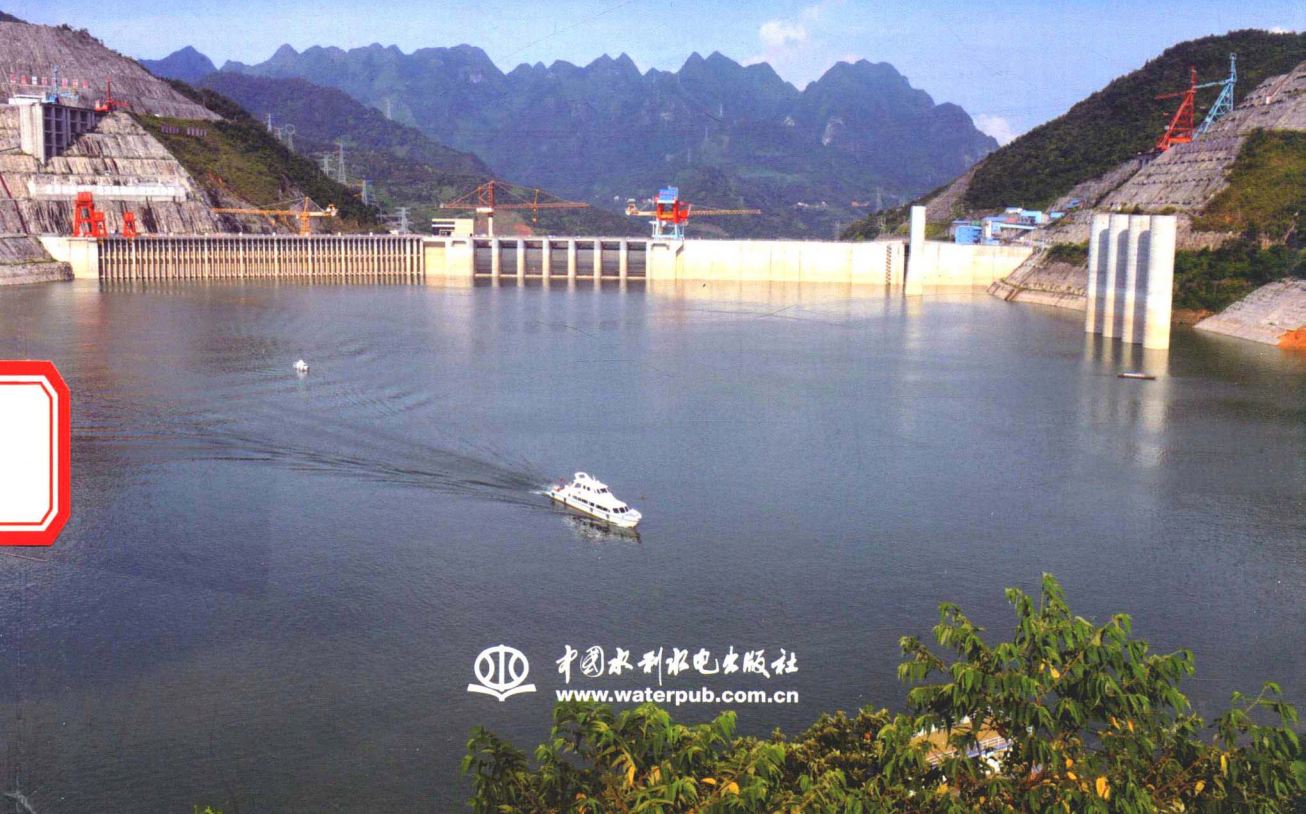


龙滩

LONGTAN
NIANYA HUNNINGTU
ZHONGLIBA GUANJIAN JISHU

碾压混凝土重力坝关键技术

肖峰 冯树荣 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

龙滩

LONGTAN
NIANYA HUNNINGTU
ZHONGLIBA GUANJIAN JISHU

碾压混凝土重力坝关键技术

肖峰 冯树荣 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书为中南勘测设计研究院组织编写的“龙滩水电站”系列著作之一，是对龙滩水电站碾压混凝土重力坝设计施工关键技术研究成果的总结。全书共7章，包括：绪论，碾压混凝土配合比和特性，碾压混凝土层面特性，枢纽布置和坝体断面，碾压混凝土渗流特性和坝体防渗结构，碾压混凝土坝温度裂缝防控技术，高温多雨环境条件下碾压混凝土坝施工技术。

本书可供从事碾压混凝土坝研究、设计和施工的相关技术人员借鉴，也可供高等院校水利、土木工程类相关专业师生参考。

图书在版编目（C I P）数据

龙滩碾压混凝土重力坝关键技术 / 肖峰, 冯树荣编
著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2016. 8
ISBN 978-7-5170-4679-0

I. ①龙… II. ①肖… ②冯… III. ①碾压土坝—混凝土坝—重力坝—水利工程—工程施工—天峨县 IV.
①TV642.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第211331号

书 名	龙滩碾压混凝土重力坝关键技术
作 者	LONGTAN NIANYA HUNNINGTU ZHONGLIBA GUANJIAN JISHU 肖峰 冯树荣 编著
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	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16.25印张 385千字
版 次	2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	70.00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

在布依族文化中，红水河是一条流淌着太阳“鲜血”的河流，珠江源石碑文上的《珠江源记》这样记载：“红水千嶂，夹岸崇深，飞泻黔浔，直下西江”，恢弘气势，可见一斑。红水河是珠江水系西江上游的一段干流，从上游南盘江的天生桥至下游黔江的大藤峡，全长 1050km，年平均水量 1300 亿 m^3 ，落差 760m，水力资源十分丰富。广西境内红水河干流，可供开发的水力资源达 1100 万 kW，被誉为广西能源资源的“富矿”。

龙滩水电站位于红水河上游，是红水河梯级开发的龙头和骨干工程，不仅本身装机容量大，而且水库调节性能好，发电、防洪、航运、水产养殖和水资源优化配置作用等综合利用效益显著。电站分两期开发，初期正常蓄水位 375.00m 时，安装 7 台机组，总装机容量 490 万 kW，多年平均年发电量 156.7 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ；远景正常蓄水位 400.00m 时，再增加 2 台机组，总装机容量达到 630 万 kW，多年平均年发电量 187.1 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。龙滩水库连同天生桥水库可对全流域梯级进行补偿，使红水河干流及其下游水力资源得以充分利用。

龙滩水电站是一座特大型工程，建设条件复杂，技术难度极高，前期论证工作历时半个世纪。红水河规划始于 20 世纪 50 年代中期，自 70 年代末开始，中南勘测设计研究院（以下简称“中南院”）就全面主持龙滩水电站设计研究工作。经过长期艰苦的规划设计和广泛深入的研究论证，直到 1992 年才确定坝址、坝型和枢纽布置方案。龙滩碾压混凝土重力坝的规模和坝高超过 20 世纪末国际上已建或设计中的任何一座同类型大坝；全部 9 台机组地下厂房引水发电系统的规模和布置集中度也超过当时国际最高水平；左岸坝肩及进水口蠕变岩体边坡地质条件极其复杂、前所未见，治理难度大。中南院对此所进行的勘察试验、计算分析、设计研究工作量之浩瀚、成果之丰富也是世所罕见，可以与任何特大型工程媲美。不仅有国内许多一流机构、专家参与其中贡献才智，而且还有发达国家的咨询公司和著名专家学者提供咨询，龙滩水电站设计创新性地解决了一系列工程关键技术难题，并通过国家有关部门的严格审批和获得国内外专家的充分肯定。

进入 21 世纪，龙滩水电站工程即开始施工筹建和准备工作；2001 年 7 月 1 日，主体工程开工；2003 年 11 月 6 日，工程截流；2006 年 9 月 30 日，下闸蓄水；2007 年 7 月 1 日，第一台机组发电；2008 年 12 月，一期工程 7 台机组全部投产。龙滩工程建设克服了高温多雨复杂环境条件，采用现代装备技术和建设管理模式，实现了均衡高强度连续快速施工，一期工程提前一年完工，工程质量优良。

目前远景 400.00m 方案已列入建设计划，正在开展前期论证工作。龙滩水电站 400.00m 方案，水库调节库容达 205 亿 m^3 ，比 375.00m 方案增加调节库容 93.8 亿 m^3 ，增加防洪库容 20 亿 m^3 。经龙滩水库调节，可使下游珠江三角洲地区的防洪标准达到 100 年一遇；思贤滘水文站最小旬平均流量从 1220 m^3/s 增加到 2420 m^3/s ，十分有利于红水河中下游和珠江三角洲地区的防洪、航运、供水和水环境等水资源的综合利用，更好地满足当前及未来经济发展的需求。

历时 40 余载，中南院三代工程技术人员坚持不懈、攻坚克难，终于战胜险山恶水，绘就宏伟规划，筑高坝大库，成就梯级开发。借助改革开放东风，中南院在引进先进技术，消化吸收再创新的基础上，进一步发展了碾压混凝土高坝快速筑坝技术、大型地下洞室群设计施工技术、复杂地质条件高边坡稳定治理技术、高参数大型发电机组集成设计及稳定运行控制技术，龙滩水电站关键技术和工程实践的一系列创新成果，为国内外大型水电工程建设树立了新的标杆，成为引领世界水电技术发展的典范。依托龙滩水电站工程建设所开展的“200m 级高碾压混凝土重力坝关键技术”获国家科学技术进步二等奖，龙滩大坝工程被国际大坝委员会（ICOLD）评价为“碾压混凝土筑坝里程碑工程”，龙滩水电站工程获得国际咨询工程师联合会（FIDIC）“百年重大土木工程项目优秀奖”。龙滩水电站自首台机组发电至 2016 年 6 月，建筑物和机电设备运行情况良好，累计发电 1100 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，水库发挥年调节性能，为下游梯级电站增加发电量 200 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，为 2008 年年初抗冰救灾和珠江三角洲地区枯季调水补淡压咸发挥了重要作用，经济、社会和环境效益十分显著。

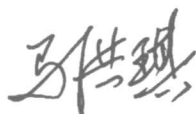
为总结龙滩水电站建设技术创新和相关研究成果，丰富水电工程建设知识宝库，中南院组织项目负责人、专业负责人及技术骨干近百人编写了龙滩水电站系列著作，分别为《龙滩碾压混凝土重力坝关键技术》《龙滩进水口高边坡治理关键技术》《龙滩地下洞室群设计施工技术》《龙滩机电及金属结构设计与研究》和《龙滩施工组织设计及其研究》5 本。龙滩水电站系列著

作既包含现代水电工程设计的基础理论和方案比较论证的内容，又具有科学发展历史条件下，工程设计应有的新思路、新方法和新技术。系列著作各册自成体系，结构合理，层次清晰，资料数据翔实，内容丰富，充分体现了龙滩工程建设中的重要研究成果和工程实践效果，具有重要的参考借鉴价值和珍贵的史料收藏价值。

龙滩工程的成功建设饱含着中南院三代龙滩建设者的聪明智慧和辛勤汗水，也凝聚了那些真诚提供帮助的国内外咨询机构和专家、学者的才智和心血。我深信，中南院龙滩建设者精心编纂出版龙滩水电站系列著作，既是对为龙滩工程设计建设默默奉献、尽心竭力的领导、专家和工程技术人员表达致敬，也是为进一步创新设计理念和方法、促进我国水电建设事业可持续发展的年轻一代工程师提供滋养，谨此奉献给他们。

是为序。

中国工程院院士：



2016年6月22日

前 言

碾压混凝土（RCC）是用振动碾压实的干硬性混凝土，它可实现高强、快速、大仓面碾压施工，有利于提高施工效率、缩短工期、降低工程建设投资。碾压混凝土筑坝技术自 20 世纪 70 年代开始兴起，碾压混凝土重力坝由于结构布置和泄洪布置适宜碾压混凝土快速施工、对地质条件的适应性较好简单等优点，迅速成为最有竞争力的坝型之一。

我国自 1986 年引入碾压混凝土筑坝技术，率先建成了坝高为 56.8m 的福建坑口碾压混凝土重力坝。龙滩水电站自 1990 年确定采用混凝土重力坝坝型后，即开始研究碾压混凝土筑坝技术。在该项研究的初、中期，国际上采用 RCC 技术建成的碾压混凝土坝最大坝高仅约 100m，对于龙滩水电站这样 200m 级特高重力坝，当时决策采用碾压混凝土筑坝在世界上尚属首次。

随着坝高的增高，大坝承受的水压力与坝高成几何级数增长，由于重力坝依靠自身重量维持稳定、抵挡水压力，碾压混凝土层面抗滑稳定问题和防渗问题越来越突出，因而对碾压混凝土层面物理力学性能的要求和层面扬压力控制的要求越来越高。如何确定高碾压混凝土重力坝断面和防渗结构型式，使大坝在设计使用期内安全可靠地发挥其功能成为必须解决的首要问题。高碾压混凝土重力坝体积大，其温控防裂问题突出。此外，高碾压混凝土坝往往伴随着巨大的混凝土工程量和大的装机容量，碾压混凝土的快速、连续施工技术也是直接与工程质量和工程效益相关的关键技术问题。

为解决 200m 级碾压混凝土重力坝建设中的关键技术问题，中南勘测设计研究院连续承担“八五”“九五”国家重点科技攻关和原国家电力公司科技攻关，以及 2001 年龙滩水电站工程开工后的设计特殊专题研究课题，前后经历了近 20 年的研究工作。通过 20 多个单位相关科技人员联合攻关，解决了该坝建造的关键技术问题，提出了综合技术解决方案和具体技术措施，为 200m 级碾压混凝土重力坝的建设提供了坚实的技术支撑。

龙滩水电站大坝全断面、全高度采用碾压混凝土，利用碾压混凝土自身防渗，实行全年连续施工等碾压混凝土重力坝设计和施工技术，这些技术均

代表了目前碾压混凝土筑坝技术的国际领先水平。龙滩水电站大坝被国际大坝委员会评为“碾压混凝土筑坝里程碑工程”，龙滩水电站工程获“FIDIC百年优秀工程奖”。

为总结龙滩水电站碾压混凝土重力坝建设的经验，推广应用该工程在碾压混凝土重力坝设计施工研究方面取得的研究成果，特将主要研究成果、建设经验编成本书，希望能为丰富水利水电工程建设知识宝库、促进高碾压混凝土重力坝筑坝技术发展有所贡献。

在本书正式出版之际，要感谢中南勘测设计研究院 **王三一**、**梁文浩**、涂传林、周建平、孙恭尧、孙君森、狄原涪、欧红光、王红斌、石青春、林鸿镁等为龙滩水电站碾压混凝土重力坝建设关键技术研究作出的贡献；还要感谢河海大学、武汉大学、清华大学、中国水利水电科学研究院、大连理工大学等相关合作单位的贡献，他们的部分研究成果也为本书的面世提供了帮助。

由于研究和应用周期长、资料庞杂，以及作者水平所限，本书从组稿至今，经历了3个年头，并几易其稿。尽管如此，书中难免有不妥之处，敬请同行专家和读者批评指正。

编者

2016年6月

目 录

序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 龙滩碾压混凝土坝结构简介	1
1.2 碾压混凝土重力坝建设与研究现状	9
1.3 研究内容与成果	13
第 2 章 碾压混凝土配合比和特性	15
2.1 碾压混凝土原材料和配合比研究	15
2.2 碾压混凝土层面垫层材料研究	35
2.3 变态混凝土配合比与特性研究	38
2.4 龙滩水电站大坝碾压混凝土施工配合比	52
2.5 研究小结	55
第 3 章 碾压混凝土层面特性	58
3.1 现场试验简介	58
3.2 抗剪断试验资料统计成果分析	59
3.3 层面胶结和破坏机理及胶结强度研究	67
3.4 层面胶结强度的尺寸效应研究	71
3.5 不同因素对碾压混凝土层面结合强度影响程度分析	74
3.6 龙滩水电站碾压混凝土施工期原位抗剪断试验验证	83
3.7 研究小结	91
第 4 章 枢纽布置和坝体断面	93
4.1 枢纽布置方案研究	93
4.2 坝体断面优化	101
4.3 碾压混凝土坝坝高研究	103
4.4 稳定应力和承载能力研究	109
4.5 坝体构造研究	128
4.6 研究小结	131

第 5 章 碾压混凝土渗流特性和坝体防渗结构 ·····	133
5.1 混凝土渗流特性研究·····	133
5.2 碾压混凝土的渗流试验和渗流分析配套技术研究·····	151
5.3 200m 级碾压混凝土坝防渗结构方案设计研究·····	174
5.4 龙滩水电站大坝混凝土渗透特性分析·····	192
5.5 研究小结·····	194
第 6 章 碾压混凝土坝温度裂缝防控技术 ·····	197
6.1 温度控制影响因素及温控措施效果研究·····	197
6.2 分缝研究·····	203
6.3 劈头裂缝研究·····	210
6.4 温控标准研究·····	214
6.5 龙滩典型坝段温度场及应力场仿真分析·····	215
6.6 混凝土水泥水化热特性及其对温度应力的影响研究·····	217
6.7 龙滩碾压混凝土坝的温控标准和温控措施·····	222
6.8 大坝混凝土施工过程中温度控制实施效果·····	226
6.9 研究小结·····	230
第 7 章 高温多雨环境条件下碾压混凝土坝施工技术 ·····	231
7.1 大坝混凝土浇筑运输方案研究·····	231
7.2 大坝混凝土骨料加工及混凝土生产系统研究·····	232
7.3 高温及多雨环境条件下碾压混凝土连续施工措施研究·····	233
7.4 高温及多雨季节碾压混凝土施工进度分析与论证·····	240
7.5 大坝施工实践·····	243
7.6 研究小结·····	244
参考文献 ·····	246

绪 论

龙滩水电站位于红水河上游,下距广西天峨县城约 15km。坝址以上流域面积为 98500km²,占红水河流域面积的 71%。工程以发电为主,兼有防洪和航运效益。电站分两期开发,即正常蓄水位远景按 400.00m 设计,前期按 375.00m 建设。前期正常蓄水位 375.00m 时,总库容 162.1 亿 m³,有效库容 111.5 亿 m³,水库具有年调节性能,装机容量 4900MW,多年平均年发电量 156.7 亿 kW·h,电站保证出力 1234MW。后期正常蓄水位 400.00m 时,总库容 272.7 亿 m³,有效库容 205.3 亿 m³,为多年调节水库,装机容量 6300MW,多年平均年发电量 187.1 亿 kW·h,电站保证出力 1680MW。

1.1 龙滩碾压混凝土坝结构简介

1.1.1 大坝设计标准

龙滩水电站属 I 等工程,工程规模为大(1)型,大坝按 1 级建筑物设计。大坝及泄水建筑物防洪标准按洪水重现期 500 年一遇设计,并适当提高校核洪水标准为 10000 年一遇洪水,下游消能防冲按 100 年一遇洪水设计。设计洪水洪峰流量($P=0.2\%$)为 27600m³/s,校核洪水洪峰流量($P=0.01\%$)为 35500m³/s。

根据国家地震局批准的地震危害性分析评价结论,龙滩水电站坝址地震基本烈度和水库可能诱发地震影响烈度均为 7 度。根据《水工建筑物抗震设计规范》(DL 5073—2000)规定,龙滩水电站大坝抗震设防类别属“甲”类,抗震设防烈度在基本烈度基础上提高 1 度,按 8 度设防。

地震危险性分析结果表明,龙滩水电站坝址 100 年超越概率 2% 的基岩水平峰值加速度为 0.163g,100 年超越概率 1% 的基岩水平峰值加速度不超过 0.2g,最大可信地震水平峰值加速度 0.22g。大坝设计地震加速度取为 0.2g。

1.1.2 坝体布置

1.1.2.1 坝段、表孔、底孔及各电站进水口

(1) 坝段。龙滩水电站大坝共分为 35 个坝段,其中右岸 1~4 号和 6~11 号坝段为挡水坝段,5 号坝段为通航坝段,河床 12 号和 19 号坝段为底孔坝段,13~18 号坝段为溢流坝段,左岸 20 号、21 号、31~35 号坝段为挡水坝段,22~30 号坝段为发电进水口坝段,其中 20 号坝段布置有电梯井和电缆井;4 号和 21 号坝段为三角转折坝段。一期建设只包括 2~32 号坝段,其余坝段在二期加高时修建。

(2) 泄洪表孔。大坝泄洪全部由 7 个孔口宽 15.00m 的表孔溢洪道承担,将溢流坝段

布置在主河槽的中央，一期溢流堰堰顶高程 355.00m（二期 380.00m），采用高低坎相间布置的大差动式挑流消能，1号、3号、5号、7号孔为低坎；2号、4号、6号孔为高坎。溢流堰上游面铅直，悬出坝轴线 8.00m，闸墩悬出坝轴线 14.00m，中墩厚度 5.00m，边墩厚度 4.00m，孔口中心线处分缝。堰面采用 WES 型曲线与后期下游坝坡平顺连接，下游采用挑流形式，为使挑流冲坑分散，采用高低挑坎大差动式挑流消能，高坎鼻坎高程 277.00m，挑角 13° ，低坎鼻坎高程 259.00m，挑角 25° ，挑流鼻坎处前缘宽 134.12m，基本上占满了主河槽宽度，泄洪时水流归槽较平顺。

(3) 放空底孔。底孔的设置主要是为水库放空使用，并可用于下闸蓄水时向下游供水和后期施工导流。根据水库放空需要、后期施工导流要求以及坝体开孔的布置条件，底孔设 2 孔，对称布置于表孔溢洪道的两侧。底孔为水平穿过坝体的有压孔，进口底槛高程 290.00m，进口为喇叭口形，孔身为 $5.00\text{m} \times 10.00\text{m}$ （宽 \times 高）的矩形断面，出口段顶板为 1:4.925 的压坡将出口断面压缩至 $5.00\text{m} \times 8.00\text{m}$ （宽 \times 高）。下游明渠采用转向挑坎体型，转弯半径 92.5m（明渠中心线半径），转向挑坎起始桩号 0+095.00，明渠宽 5.00m，内墙圆心角 11.223° ，外墙圆心角 22.445° ；消能型式为挑流消能，采用 0° 挑角斜向挑坎。底孔上游进口段设有平面检修闸门和事故闸门，下游出口处设有弧形工作闸门，底孔不运行时由事故闸门挡水，事故闸门与工作闸门间的孔身段采用钢板衬砌。

(4) 电站进水口。电站进水口为坝式进水口，1~7号机进水口坝段进口底槛高程 305.00m，8号、9号机进水口根据其地形地质条件，并按后期运行要求确定进口底槛高程为 315.00m。进水口孔身水平穿过坝体后与引水隧洞相接，隧洞内径 10.00m。1号、2号机进水口下部的坝体混凝土采用碾压混凝土。为减少工程量，3~9号机进水口坝段采用了类似于岸塔式进水口的结构形式，坝段与下游开挖边坡连为整体，坝段的稳定需要依靠下游边坡的支撑。

1.1.2.2 坝顶、坝体廊道

1. 坝顶

(1) 坝顶长度与宽度。一期坝顶总长度（沿坝轴线）761.26m，坝顶布置有坝顶配电房与闸门控制室、电梯机房、油泵房、油管沟、滑线沟及电缆沟等。右岸挡水坝段（2~4号、6~11号）坝顶宽度 18.00m；底孔及溢流坝段（12~19号）坝顶宽度为 36.00m；电梯井坝段（20号）坝顶宽度 35.50m；21号坝段为拐弯坝段，连接电梯井坝段与进水口坝段，为保持坝顶美观和交通平顺，坝顶宽度由 35.50m 渐变为 36.00m；进水口坝段坝顶宽度为 28.50m；31号坝段坝顶总宽度 30.00m；32号坝段为岸坡连接坝段，坝段宽度由 28.50m 渐变为 18.00m。

(2) 坝顶交通。挡水坝段（2~4号、6~11号）上下游边各设 2.00m 宽的人行道，高出 382.00m 坝顶高程 0.20m，中间行车道宽度为 14.00m，2号坝段连通右岸上坝公路，挡水坝段坝顶公路向上游找坡，上游人行道边布置排水沟，排水沟内每隔 10~15m 设置排水管，将排水沟内的水排入上游水库；两个底孔坝段下游分别设一楼梯，作为从坝顶下到表孔闸墩 365.30m 平台的通道；电梯井坝段和拐弯坝段顺公路桥与进水口坝段顺势连通，作为行车道，人行道在坝段下游侧与人行桥连通；岸坡连接坝段（31号、32号）坝顶沿进水口行车道延伸并随坝轴线向下游方向转折 36° ，与左岸上坝公路连通。

底孔坝段和溢流坝段工作闸门上游侧依次布置工作桥、门机梁和公路桥，宽度分别为 2.00m、2.00m、7.00m，工作桥可兼作人行桥使用，工作闸门下游侧依次布置油管沟、门机梁、滑线沟、电缆沟及人行桥，人行桥宽度 2.50m。

2. 坝内廊道及交通

根据灌浆、排水、监测、电缆布置、运行维护、通风和交通等要求，坝内设有基础灌浆廊道、锚索张拉廊道、排水廊道、观测廊道、交通廊道等多类型专用或共用廊道。按部位可分为基础廊道和坝体廊道两类。

(1) 基础廊道，包括上、下游帷幕灌浆廊道、坝基主排水廊道和辅助排水廊道。

1) 上、下游帷幕灌浆廊道的布置按帷幕设计要求，布置在坝踵和坝趾部位，控制廊道外边墙距坝面不小于 $0.07H$ (H 为廊道底板到后期设计水位的水头) 或 0.1 倍坝底宽，且最小不小于 3.00m，并尽可能使廊道纵轴线平顺，纵向坡度不超过 45° 。廊道断面为城门洞型，上游帷幕灌浆廊道宽 4.00m、高 4.00m；下游帷幕灌浆廊道宽 3.00m、高 4.00m。两岸横向灌浆廊道跨坝段横缝布置，宽 3.00m、高 4.00m，断面为尖顶形。

2) 坝基排水廊道，按照坝基采用抽排措施的要求布置，在河床坝段范围布置 3~4 排辅助排水廊道，坝基面在下游最高水位以下的坝段布置 1~2 排辅助排水廊道；坝基面高于下游最高水位的坝段原则上不设辅助排水。排水廊道尽可能与灌浆廊道共用，但上游帷幕灌浆廊道在布有 3 排灌浆孔的廊道内不再设排水孔，在其下游侧另设主排水廊道。坝基抽排范围内排水廊道由纵向和横向网格状廊道组成，纵横向间距均约 40.00m，纵向廊道断面为城门洞型，横向廊道跨坝段横缝布置，采用尖顶形断面，廊道宽 2.00m、高 3.00m。

(2) 坝体廊道。坝体排水廊道布置于大坝上、下游面附近，距坝面的距离控制与基础廊道布置要求相同，廊道间高差按 40.00m 左右控制，水平布置。上游排水廊道共布置 4 层，高程分别为 230.00m、270.00m、310.00m 和 342.00m。在溢流坝段下游侧高程 230.00m 布置了一层排水廊道，在 4 号表孔挑流鼻坎下面布置抽排水泵房，布置高程为 263.00m。坝体排水廊道断面为城门洞型，廊道宽 2.00m、高 3.00m。

(3) 坝内交通。坝内竖向交通主要由电梯井内电梯及楼梯、两岸坝段帷幕灌浆廊道，以及布置在通航坝段和 31 号坝段内的 3 道竖井连接形成。在高程 270.00m、310.00m、342.00m 各层廊道还布置了 2~4 道横向交通廊道，与坝后高程 270.00m、310.00m、342.00m 交通道相连接，以满足下游坝面的巡视、检修的交通要求以及廊道通风和紧急情况时人员安全撤离的要求。交通廊道不跨缝断面为城门洞型，跨缝断面采用尖顶形，廊道宽 2.0m、高 3.0m。

1.1.2.3 坝段分缝

龙滩水电站碾压混凝土坝最大坝底宽 168.58m，不设纵缝通仓浇筑。但在施工期为便于基础混凝土分块施工，在 0+73.000 基础纵向排水廊道底部设置临时纵缝，施工后期通过灌浆连成整体。

溢流坝段横缝间距为 20.00m，孔口跨横缝布置；进水口坝段横缝间距 25.00m；底孔坝段宽度为 30.00m；右岸 3 号、4 号坝段及河床挡水坝段、电梯井坝段横缝间距为 22.00m；河床拐弯坝段（21 号坝段）连接电梯井坝段与 22 号进水口坝段，其横缝间距由

这两个坝段的布置要求确定，在坝轴线处为 12.485m；两岸接头和坝轴线转折处横缝按布置要求及坝基开挖型式确定，右岸 2 号坝段横缝间距 9.50m，左岸 31 号、32 号坝段横缝间距分别为 20.00m、28.273m。

在变态混凝土和常态混凝土内横缝，跳仓浇筑时由模板成缝，同仓浇筑时先架立隔缝板后同时浇筑两侧混凝土；在碾压混凝土内用切缝机切缝。

1.1.3 坝体混凝土分区

坝体混凝土分为常态混凝土、碾压混凝土和变态混凝土 3 种。除基础垫层、坝顶、溢流坝段过流面、闸墩、导墙等有特殊要求的部位采用常态混凝土，以及坝上游、下游面，孔口周边和其他不便碾压施工部位采用变态混凝土之外，坝体内凡具备碾压条件的部位均采用碾压混凝土。材料分区尽量简化以充分发挥碾压混凝土大仓面连续快速施工的优势。

坝体常态混凝土和碾压混凝土分区、各分区混凝土的性能要求及应用的部位见表 1.1 和表 1.2。

表 1.1 常态混凝土分区及主要性能指标

混凝土分区	坝基础：C _I	坝顶：C _{II}	堰顶、底孔门槽等：C _{III}	溢流面及导墙、底孔周边：C _{IV}	闸墩、航运坝段：C _V	溢流面及导墙表面等过流面：C _{VI}
级配	四	三	三	三	三	二
设计强度等级 (28d, 95%保证率)	C20	C15	C20	C25	C30	C50
设计抗压强度/MPa (90d 龄期, 80%保证率)	18.5	14.3	18.5	22.4	26.2	42.1
抗渗等级 (90d)	W10	W8	W8	W8	W8	W8
抗冻等级 (90d)	F100	F50	F100	F100	F100	F150
极限拉伸值 (28d)	0.85×10^{-4}	0.80×10^{-4}	0.85×10^{-4}	0.90×10^{-4}	0.95×10^{-4}	1.0×10^{-4}

表 1.2 碾压混凝土分区及主要性能指标

混凝土分区	碾压混凝土				变态混凝土	
	下部：R _I	中部：R _{II}	上部：R _{III}	上游面：R _{IV}	上游面：C _{bI}	其他：C _{bII}
级配	三	三	三	二	二	—
设计强度等级 (28d, 95%保证率)	C18	C15	C10	C18	C18	—
设计抗压强度/MPa (90d 龄期, 80%保证率)	18.5	14.3	9.8	18.5	18.5	—
抗渗等级 (90d)	W6	W6	W4	W12	W12	—
抗冻等级 (90d)	F100	F100	F50	F150	F150	—
极限拉伸值	0.80×10^{-4} (90d)	0.75×10^{-4} (90d)	0.70×10^{-4} (90d)	0.80×10^{-4} (90d)	0.80×10^{-4} (28d)	—

1.1.4 坝体和坝基防渗

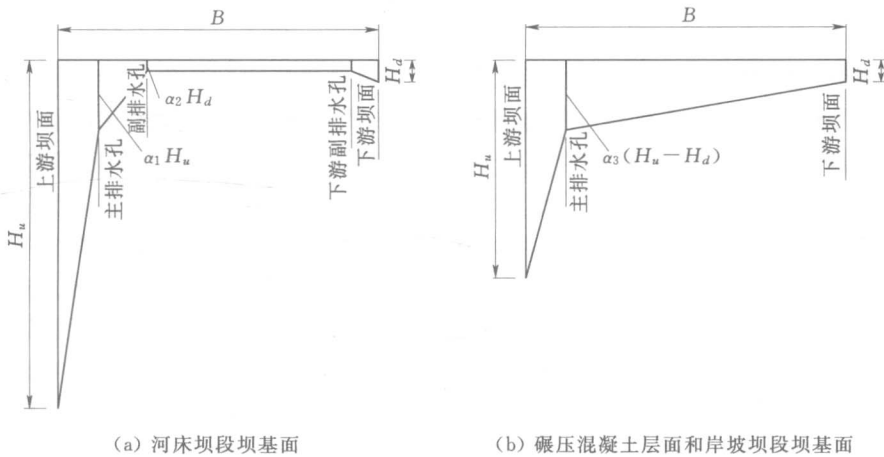
1.1.4.1 防渗控制标准

(1) 坝体碾压混凝土抗渗性能控制标准。综合分析国内近年来碾压混凝土现场压水试验和芯样渗流试验成果以及龙滩现场碾压试验块上进行的现场压水试验和芯样渗流试验成果，龙滩水电站大坝设计要求控制二级配碾压混凝土透水率 $q \leq 0.5Lu$ 、三级配碾压混凝土透水率 $q \leq 1.0Lu$ ；二级配碾压混凝土和上游面变态混凝土抗渗等级不小于 W12、坝体高程 342.00m 以下三级配碾压混凝土抗渗等级不小于 W6、坝体高程 342.00m 以上三级配碾压混凝土抗渗等级不小于 W4。

(2) 坝体常态混凝土抗渗性能控制标准。坝基面垫层常态混凝土及上游面常态混凝土抗渗等级不小于 W10、坝体其他部位常态混凝土抗渗等级不小于 W8。

(3) 帷幕防渗性能控制标准。封闭式帷幕下伏相对不透水层透水率以 1.0Lu 为标准，悬挂式帷幕深度不小于 0.3~0.7 倍水头，两岸帷幕延伸至正常蓄水位与地下水位相交处，帷幕最小深度不小于 15.0m。

(4) 坝体和坝基扬压力控制标准。河床坝段坝基面扬压力和岸坡坝段坝基面以及碾压混凝土层面扬压力控制图形见图 1.1，采用的扬压力图形有关参数见表 1.3。



(a) 河床坝段坝基面

(b) 碾压混凝土层面和岸坡坝段坝基面

图 1.1 扬压力控制标准图形

注： H_u 、 H_d 分别为截面上、下游水头， B 为截面底宽。

表 1.3 扬压力控制指标表

截面位置	排水孔	扬压力系数
河床坝段坝基面	主排水孔	$\alpha_1 = 0.2$
	副排水孔	$\alpha_2 = 0.5$
	下游副排水孔	$\alpha_2 = 0.5$
岸坡坝段坝基面 (8~21 号坝段)	主排水孔	$\alpha_3 = 0.35$
碾压混凝土层面	主排水孔	$\alpha_3 = 0.3$

1.1.4.2 坝体防渗排水结构设计

1. 坝体防渗排水结构型式

我国近年来工程实践中大量的试验结果表明,二级配碾压混凝土的整体的综合渗透性能可达到透水率小于 $1Lu$ (90%保证率)甚至更小的水平,变态混凝土芯样渗透系数可达到或接近 $1\sim 10cm/s$ 的水平,经过多方案的比较分析,龙滩水电站坝体渗控结构采用碾压混凝土自身防渗,即采用富胶凝材料二级配碾压混凝土作为龙滩大坝防渗结构的主体,为克服二级配碾压混凝土抗渗性能离散性较大以及个别试件初渗压力较低的缺点,防止部分碾压混凝土强渗透层面直接与水库连通,在坝上游、下游迎水面设置一定厚度的变态混凝土以封闭碾压混凝土层面,从而构成自上游到下游渗透性逐步增大,结合坝体排水系统,形成“前堵后排”的渗控体系。

坝基防渗采用帷幕灌浆,为形成完整的坝基抽排区域,上游、下游均设置帷幕,并在上游、下游帷幕之间设置连接帷幕。

在上述防渗结构的基础上,通过坝体和坝基排水系统的设置达到控制坝体和坝基扬压力的目的。坝体排水系统除设置上游主排水孔幕和下游主排水孔幕外,还在碾压混凝土下部层面间设置辅助排水系统。坝基排水系统除设置上游主排水孔幕和下游主排水孔幕外,在河床抽排区域设置网格状基础廊道并在廊道内设置坝基辅助排水系统和集水井。

2. 坝体防渗排水布置

(1) 坝体上游面防渗结构布置。除1号、2号机进水口坝段高程 $303.00m$ 以上、3~9号机进水口坝段、左岸接头坝段、通航坝段以及底孔坝段高程 $275.00m$ 以上等上游表面为常态混凝土的部位外,大坝其他上游面均采用变态混凝土与二级配碾压混凝土组合防渗。

高程 $342.00m$ 以上变态混凝土厚度为 $0.50m$,高程 $342.00m$ 以下变态混凝土的水平宽度为 $1.00m$;变态混凝土的分缝与坝体结构分缝布置相同,为限制上游变态混凝土开裂后裂缝的发展,在高程 $340.00m$ 以下变态混凝土内设置一层水平和垂直方向间距均为 $200mm$,直径为 $25mm$ 的钢筋网。上游二级配碾压混凝土水平宽度根据作用水头不同采用 $3\sim 15m$ 不等,其下游边界与坝体排水孔幕的距离不小于 $1m$,为提高二级配碾压混凝土层面的结合效果和抗渗性,在连续上升的二级配碾压混凝土层面范围内逐层铺洒水泥粉煤灰浆。

上游高程 $342.00m$ 以下设置一道水泥基渗透结晶材料坝面涂层作为辅助防渗措施。

(2) 坝体下游面防渗结构布置。根据下游最高水位和9台机满发的下游水位,坝体下游面的防渗以高程 $233.00m$ 为界分成两部分,下游面高程 $233.00m$ 以下采用变态混凝土与二级配碾压混凝土组合防渗,变态混凝土厚度为 $0.50m$,二级配碾压混凝土厚度为 $3.50m$,二级配碾压混凝土层面范围内逐层铺洒水泥粉煤灰浆;高程 $233.00m$ 以上采用坝体三级配碾压混凝土自身防渗,其表面 $0.30\sim 0.50m$ 范围内根据坝体外观要求采用变态混凝土,但该部分变态混凝土不再按照防渗要求的变态混凝土进行设计。

(3) 坝体横缝止水结构布置。坝体上游高程 $342.00m$ 以下横缝内布置3道铜片止水片和1个直径 $300mm$ 的横缝排水管,坝体上游高程 $342.00m$ 以上横缝内布置2道铜片止水片和1个直径 $300mm$ 的横缝排水管。河床挡水坝段、溢流坝段和进水口坝段高程

310.00m 以下的横缝内铜片止水厚度为 1.8mm，高程 310.00m 以上的横缝内铜片止水厚度为 1.6mm。

坝体下游高程 265.00m 以下的横缝内布置 2 道厚度 1.2mm 的铜片止水和一个直径 300mm 的横缝排水管。溢流面面层混凝土内布置 2 道厚度 1.2mm 的铜片止水，其上游、下游两端分别与上游横缝止水和下游横缝止水焊接。挡水坝段和进水口坝段上游面铜片止水通到坝顶与上游防浪墙止水连接。

上游第一道止水距上游面 1000mm，铜片止水间间距为 900mm，高程 342.00m 以下横缝排水管中心距上游坝面的距离为 3.80m，高程 342.00m 以上横缝排水管中心距上游坝面的距离为 2.40m。下游第一道止水距下游面 500mm，铜片止水间间距为 500mm，横缝排水管中心距下游坝面的距离为 2.00m。布置在碾压混凝土内的止水周边采用变态混凝土工艺进行施工，上游、下游表面与横缝排水管之间的坝体横缝内填充 10mm 沥青松木板。

上游、下游横缝止水均埋设在坝踵和坝趾的止水基座内，止水基座深度 500mm，宽度根据埋设的止水数量确定，止水基座采用微膨胀混凝土回填。

对坐落在两岸陡坡上的 2~5 号坝段、8~9 号坝段、22~25 号坝段、30~32 号坝段，在上游坝踵部位沿坝轴线方向布置 1 道基础止水，一侧埋设在基础止水基座内，另一侧埋设在坝体混凝土内，横缝处与第一道横缝止水焊接。

坝体廊道穿越横缝处的廊道周边和跨横缝布置的廊道顶部均布置 1 道橡胶止水。

(4) 坝体排水系统布置。根据渗流控制要求，坝体上游面各廊道之间设置坝体排水孔幕，排水孔与上、下层廊道连接，直径为 150mm，上游高程 270.00m 以上排水孔间距为 3.00m，高程 270.00m 以下排水孔间距为 2.00m。挡水坝段上游排水孔向上伸到坝顶，顶部用盖板封闭，溢流坝段上游排水孔顶部高程 351.00m，进水口坝段的进水口高程以上和底孔坝段的底孔对应部位以上坝体不设排水孔。碾压混凝土内的坝体排水孔均布置在二级配碾压混凝土下游约 1m 处的三级配碾压混凝土，采用钻孔成孔。

按超过下游最高尾水位不小于 5.00m 控制，挡水坝段下游排水孔顶部高程 265.00m，溢流坝段下游排水孔顶部高程 246.00m。下游排水孔直径为 150mm，间距为 2.00m。下游排水孔的渗水通过基础廊道进入坝基集水井，然后通过抽排系统排出坝体。

由于龙滩碾压混凝土重力坝下部层面承受的水头大，扬压力控制和层面力学指标要求高，下部层面是坝体沿层面抗滑稳定的控制性部位，为进一步提高下部层面抗滑稳定安全储备，在上述坝体排水孔常规布置的基础上，在溢流坝段高程 230.00m（底孔坝段及河床挡水坝段在高程 230.00~250.00m）以下沿基础纵向排水廊道朝上设置坝内层面排水孔，以形成坝内抽排，更好地降低层面扬压力，排水孔直径为 150mm，间距按 4.00m 布置。

高程 270.00m 以上的渗水通过高程 270.00m 廊道自流排出坝体，高程 270.00m 以下的渗水通过基础廊道进入坝基集水井，通过抽排系统排出坝体。

1.1.4.3 坝基防渗帷幕设计

1. 帷幕布置

防渗帷幕按正常蓄水位 400.00m 要求设计，在前期建设时高程 382.00m 以下帷幕一次性完成。