

Research and Practice of RCC Arch Dam

碾压混凝土拱坝 研究与实践

刘光廷 著



黄河水利出版社

碾压混凝土拱坝研究与实践

刘光廷 著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书为清华大学刘光廷教授十余年来为发展软岩上碾压混凝土拱坝设计进行的科研成果。共选收论文 100 篇,内容涉及混凝土温度断裂、压剪断裂、三维曲面断裂、随机应力及不均质体强度等方面的应用基础理论研究,碾压混凝土拱坝新结构、混凝土双轴徐变、累计温度及自重徐变仿真设计、湿热传导、水管冷却、裂隙岩体渗流、软岩渗流及饱和软岩强度折减等研究成果。书中阐述的基本理论和方法以及碾压混凝土拱坝新结构等都是作者本人及其指导研究生的创新性成果,其中很多已经得到工程实践的检验,并且得到了国内外广泛的赞誉。

本书可供水利、土木、力学等方面的科研人员和工程技术人员使用,也可供高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

碾压混凝土拱坝研究与实践/刘光廷著. — 郑州:黄河水利出版社, 2004. 10

ISBN 7-80621-841-6

I. 碾… II. 刘… III. 混凝土坝:碾压土坝:拱坝—研究 IV. TV642.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 102910 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371-6022620

E-mail:yrp@public.zz.ha.cn

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:50.25

字数:1 160 千字

印数:1—2 000

版次:2004 年 10 月第 1 版

印次:2004 年 10 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80621-841-6/TV·372

定价:138.00 元

本书组织委员会

主任委员 周厚贵 孙 役 杜 彬

副主任委员 李鹏辉 谭先春 戴西辉

委 员 周瑞忠 刘 宁 杨占宇 陈润发

陈凤岐 燕 乔 高 虎 胡 昱

王章忠 刘元秀 严 冰 靳宏文

张佑明 戴 勇 邓凤玲 沙保卫

焦修刚 叶源新 徐增辉 邓兰秋

前 言

多年来,我国一直为水利水电建设工程投资大、建设周期长、发挥效益慢、工程缺陷多等问题所困扰。在水利水电建设中采用新结构、新材料、新工艺和新的设计方法以缩短建设周期、降低工程造价、提前发挥效益,尤其是减少工程缺陷已成为亟待解决的重大课题。

20 世纪 70 年代初,国外首先将水泥用量少、压实工艺简单的碾压混凝土成功地引入大体积混凝土坝工程建设上,实践表明,大仓面混凝土准备工作量减少,施工速度快,单价低。为此,世界各国纷纷采用,目前已建成的碾压混凝土坝有 200 多座。80 年代我国在福建坑口首次采用碾压混凝土工艺筑重力坝,在短短的 10 多年内,迅速发展,遍及全国,先后在坑口、铜街子、岩滩、水口、大广坝、观音阁、桃林口、江垭、大朝山等,直到高 206m 的龙滩等主体工程都采用了碾压混凝土重力坝。

1988 年,南非修建了 50m 高碾压混凝土重力拱坝,平面拱可减少混凝土水平层面连接削弱的缺陷。1989 年修建 70m 高重力拱坝,径向设诱导短缝,水泥用量减少 58~60 kg/m³混凝土,绝热温升降低 9~13℃,坝体降温时温度诱导缝仍然扩大形成上下游贯穿裂缝,整体浇筑带来较多梁向裂缝。1990 年我国普定修建 75m 高碾压混凝土重力拱坝,混凝土浇筑连续三年,沿拱轴每 60m 设置有可重复灌浆设施,利用诱导缝释放应力,以便在拱坝降温过程灌浆。1991 年水利部推荐清华大学水利系向设计单位介绍碾压混凝土成层结构研究和温泉堡碾压混凝土拱坝(高 49m)方案,采用了 30m 间隔的横缝,仓面小影响施工工艺,层间缺陷少。1994 年,清华大学水利系在水利部贷款资助下,研究人工短缝释放应力,设计了世界上第一座碾压混凝土薄拱坝即溪柄一级碾压混凝土薄拱坝,施工速度快,1995 年完工即蓄水。1997 年,沙牌碾压混凝土拱坝(拱坝高 117.5m,深层垫座 14.5m)开工修建,采用 2 条横缝和 2 条横向诱导缝的分缝形式。1998 年,清华大学水利系研究人工短缝和铰结拱,并设计了在高寒软基强震条件下的新疆石门子 109m 高的碾压混凝土拱坝,2000 年 10 月提前蓄水。1999 年在甘肃修建 80m 高的龙首混合坝型的碾压混凝土坝(拱坝+重力坝),采用周边缝和诱导缝结合的分缝形式,施工速度快,2001 年 4 月底下闸蓄水。

碾压混凝土技术虽然发展迅速,但国内外还来不及建立一套与新工艺和新材料相适应的新的设计思想和新的结构形式,使碾压混凝土筑坝技术的进一步发展受到传统的结构形式和设计方法的限制。例如:由于碾压混凝土容易出现层间缺陷,国外往往采用加大剖面(加大工程量)的办法而不是改变传力方式来保证重力坝稳定安全。甚至对适合修建拱坝的地方也采用加大工程量改为重力坝,这不仅加大施工强度和增加对设备的投入,而且增加造价、影响建造工期。20 世纪 90 年代初,国内外一直很少建造工程量小的碾压混凝土拱坝,更没有修建碾压混凝土薄拱坝的先例。我国具备修建拱坝条件的坝址很多,如何通过改进结构形式和设计方法,既保留拱坝在结构上超载能力大、层间缺陷对安全影响小、工程量少的特点,又引用碾压混凝土水泥用量少、大仓面施工、准备工作量少、快速施

工的特点,是坝工界关注的重大课题。

为了发展碾压混凝土拱坝新结构,1988年清华大学水利系研究多裂隙体强度压剪断裂和温度断裂,提出用稳定人工短缝释放应力的碾压混凝土拱坝新结构,得到电力部勘测设计院支持,建议工程检验。1991年为温泉堡碾压混凝土拱坝提供含水平缺陷结构内应力及边缘应力奇异性研究,含横缝拱坝变形传力及坝踵水平短缝的拱坝应力重分布研究,碾压混凝土拱坝施工期及运行期仿真组合应力研究。1993年在水利部工程贷款支持下,水利部重点项目基金和国家自然科学基金科研经费资助下清华大学水利系研究设计了国际上第一座碾压混凝土薄拱坝(溪柄工程,高63.5m)。研究提供成层结构应力、三维裂缝、弯曲断裂、温度断裂及应变强度因子等35篇重要刊物文章,提出人工短缝释放应力及止裂新结构,进行三维累计仿真设计计算及工程设计。在缺乏拌和起重运输设备条件下大部分拱坝仍用大仓面无缝快速施工,仅1995年上半年即完成坝体碾压混凝土,当年拦蓄50年一遇洪水,为增加发电效益又连续三年超校核水位蓄水。由于施工期设备不足,间歇时间长,坝体曾有两个高程的层间缺陷,进行了灌浆处理,未出现径向约束裂缝,10年来安全运行。

1998年在新疆自治区及昌吉州领导及清华大学985基金支持下,清华大学水利系进一步研究设计了国际上第一座高寒强震地区软岩地基上高百米以上碾压混凝土拱坝,进一步提供坝体抗冻、防裂、人工缝减震、适应软岩大变位“柔性拱”,软岩和混凝土多轴徐变和随机徐变应力,研究“铰接拱”结构提前蓄水,研究非定常渗流区和饱和岩体强度折减,混凝土湿热传导及工程浸水冷却等问题,提供64篇文章,获发明专利3项及实用新型专利1项,进行仿真参数测定设计计算及工程监测以修正工程措施。碾压混凝土施工速度快,混凝土浇筑仅11个月(未计入冬季严寒停工期)即开始蓄水春灌,15个月完成百米高混凝土拱坝的碾压。

碾压混凝土材料和工艺在国内发展很快,大大促进了碾压混凝土拱坝的实施,本书介绍作者1988年以来进行的碾压混凝土拱坝研究并公开发表的成果和直接指导研究生进行碾压混凝土拱坝新结构的应用基础和设计应用研究的工作内容。

应该着重指出的是,这些碾压混凝土拱坝的研究和实践工作是与水利部原副部长何璟同志的大力倡导以及水利部和电力部的扶持分不开的,水利部原科技司司长李春敏同志的支持,尤其是原电力部王圣培同志的直接参与,使我们渡过了许多难关,我们将永志不忘。

作 者

2004年5月

目 录

前 言

绪 论

碾压混凝土薄拱坝结构研究····· (3)

高寒、强震、成层软弱砾岩(弹模 4 000MPa)基础上的石门子碾压混凝土拱坝····· (10)

一、多裂隙体及混凝土的应力和压剪断裂、温度断裂、止裂及应力释放结构

弹性力学问题的第二类边界积分方程

——边界元法及其二维基本解····· (17)

弹性力学问题的第二类边界积分方程

——边界元法的三维基本解····· (27)

The Strength of a Finite Body with Multiple Cracks····· (35)

The Synthetic Deformation modulus and the Synthetic Poisson' s Ratio of multiple-Crack Bodies····· (48)

An Analytic-Fictitious Boundary Forces Method for Calculating Multi-Crack Problem in Arbitrary Region with Mixed Mode Boundaries····· (57)

Study on the Curved and Branch Cracks in Massive Concrete Structures····· (67)

Study on Boundary Multiple Crack and the Stability of Horizontal Cracks in Concrete Cravity Dam····· (74)

缝内含有不同导温介质时的稳定温度断裂研究····· (84)

The Analytic-Numerical Solution for Thermal Crack Problems and Crack Prevention of RCAD····· (90)

Fracture Problem of Multiple Crack Body Under Harmonic Thermal Load and the Stability of Cracks in RCAD····· (102)

Thermally Stressed Multiple Systems in Steady State····· (112)

稳定热流场中温度断裂子域的解析数值解····· (126)

多裂隙体的稳定热断裂(张开型)问题····· (132)

Harmonic Thermal Fracture of Multiple Crack System and the Stability of Cracks in RCC Arch Dam····· (140)

混合边界多裂隙体在简谐变温场作用下的断裂问题(张开型)····· (154)

Study on Steady-Thermal Fracture with Different Conductive Material Filled in Crack····· (162)

含有绝热裂缝的有限自由板在稳定温度场作用下的断裂分析·····	(170)
Fictitious Thermal Source (FTS) Method in Solving Harmonic Temperature Field Problem ·····	(179)
Singular Integral Equation Groups For 3-D Crack Problems in Finite Body ·····	(187)
三维热传导问题的间接边界元法·····	(194)
不连续位移超奇异积分方程法解三维多裂纹问题·····	(199)
位移不连续边界元法解多裂纹体的裂缝扩展·····	(206)
三维椭圆裂纹前沿非法平面内扩展的可能性研究·····	(212)
Solution of Periodic Heat Conduction by Indirect Boundary Element Method Based on Fictitious Heat Source ·····	(216)
Continuous Near-Tip Fields For A Dynamic Crack Propagating in a Power-Law Elastic-Plastic Material ·····	(225)
Three-dimensional Stress and Displacement Fields Near an Elliptical Crack Front ·····	(234)

二、(不确定性问题)随机应力及不均质体强度

大体积混凝土结构温度场的随机有限元算法·····	(255)
Spectral Stochastic Finite Element Analysis of Periodic Random Thermal Creep Stress in Concrete ·····	(262)
Research on Nonstationary Random Thermal Creep Stresses in Mass Concrete Structures ·····	(272)
大体积混凝土结构随机温度徐变应力计算方法研究·····	(284)
混凝土结构的随机温度及随机徐变应力·····	(296)
非平稳温度场影响下混凝土结构的随机徐变应力·····	(310)
混凝土结构温度徐变应力的首次超越可靠度·····	(318)
Time-Dependent Reliability Assessment for Mass Concrete Structures ·····	(326)
Experiments and Simulation on the Propagation of the Juncture Crack Between Gravel and Mortar ·····	(345)
用随机骨料模型数值模拟混凝土材料的断裂·····	(351)
地震动随机场变界展开法·····	(356)
地震动随机场投影展开法·····	(361)
拱坝地震动随机响应分析·····	(366)
子费用模糊估算的水电工程总造价概率估计·····	(371)
工程项目投资费用的随机—模糊估算方法研究·····	(377)
二维混凝土随机骨料模型研究·····	(383)
三维混凝土骨料随机投放算法研究·····	(390)
数值计算中的一种无网格方法研究·····	(398)

三、碾压混凝土拱坝新结构、仿真计算及参数测定

Finite Element Analysis of Accumulated Stresses Due To Dead Weight in Rcc Dams	(411)
Numerical Procedure for Thermal Creep Stress in Mass Concrete Structures	(420)
Numerical-Experimental Analysis of the Cracks in Massive Concrete Under Compression-Shear Conditions	(430)
混凝土、砂浆早期温度断裂韧性实验研究	(436)
混凝土绝热温升测试仪的研制及其应用	(442)
碾压混凝土拱坝坝体应力的简化计算	(447)
成层弹性介质的二维基本解	(454)
整体碾压混凝土拱坝工艺及温度场仿真计算	(461)
含灌浆横缝碾压混凝土拱坝仿真应力和双轴强度判别	(468)
含横缝碾压混凝土拱坝的变形和应力重分布	(475)
缝端奇异边界单元和界面裂缝的应力强度因子计算	(482)
溪柄碾压混凝土薄拱坝的研究	(488)
溪柄碾压混凝土薄拱坝运行期位移预测和实测	(497)
Research and Practice on Xi-Bing Roller Compacted Concrete Thin Arch Dam	(502)
碾压混凝土坝非稳定温度场计算预测与工程实测的比较	(516)
层体边界元法在二维层体断裂分析中的应用	(522)
三维热弹性力学问题的混合边界元法	(527)
碾压混凝土坝的等效连续本构模型	(533)
水管冷却效应的有限元子结构模拟技术	(539)
阶梯形变截面圆拱和圆环稳定计算的有效方法	(546)
拱坝河谷自由场反应	(550)
拱坝河谷三维地震动分析	(554)
碾压混凝土拱坝设人工短缝的应力释放及止裂作用	(562)
石门子碾压混凝土拱坝温度场实测与仿真计算	(569)
混凝土双轴压缩徐变试验初步研究	(574)
老化黏弹性蠕变本构方程中的热力学条件	(579)
考虑温度对于弹模影响效应的大体积混凝土施工期应力计算	(585)
自生体积变形试验方法研究及应用	(592)
RCC Arch Dams: Chinese Research and Practice	(597)
RCC Arch Dam Structure on the Taxi River and Water Storage Measure During Construction	(606)
Research and Practice of Roller-Compacted Concrete Arch Dams	(617)
碾压混凝土拱坝的铰结拱研究	(628)
裂缝在压剪条件下的应力场和扩展能	(634)

碾压混凝土重力坝结构改进和仿真应力·····	(639)
柔性拱和软弱地基上的碾压混凝土拱坝·····	(646)
侧约束对拱坝坝体应力和位移的影响·····	(652)
Microstudy on Creep of Concrete at Early age Under Biaxial Compression ·····	(658)
无限域波动问题的有限元模型·····	(666)
软化砂砾岩上的拱坝新结构·····	(671)

四、湿热传导和干裂问题

石门子碾压混凝土拱坝采用聚氨酯硬质泡沫保温保湿的效果分析·····	(681)
混凝土湿热传导与湿热扩散特性试验研究(I)	
——试验设计原理·····	(684)
混凝土湿热传导与湿热扩散特性试验研究(II)	
——试验成果及其分析·····	(695)
混凝土等温传湿过程的试验研究·····	(701)
Experimental Study on Surface Cracking of Early-age Concrete ·····	(708)
Study on Mass Diffusivity of Concrete Under Isothermal Condition ·····	(718)
节理岩体的渗透系数与应变、应力的关系 ·····	(727)
岩体裂隙渗流水力特性的试验研究·····	(733)
被自由面穿过排水孔的数值模拟方法·····	(738)
改进的单元渗透矩阵调整法求解无压渗流场·····	(744)
饱和和非饱和三维多孔介质非稳定渗流分析·····	(749)
饱和模型非定常渗流的数值求解方法·····	(755)
饱和和软岩受压硬化、强度折减及本构模型 ·····	(760)
低渗透饱和岩石加载时体积弹模与孔隙液压关系·····	(766)
复杂应力状态下的饱和体本构模型及内力变化·····	(774)
软弱地基上的碾压混凝土拱坝应力与位移分析·····	(781)
软岩多轴流变特性及其对拱坝的影响·····	(787)

绪 论

碾压混凝土薄拱坝结构研究

1 碾压混凝土坝的发展

碾压混凝土筑坝近期在国内外发展很快,它仓面大,减少模板灌浆工作量,工艺简单,水泥用量少,不依靠浇筑块表面散热的连续快速施工大大加快主体坝工的进度。因此,尽管它目前尚存在层间缺陷降低了坝体抗剪能力,但国内外常不惜加大剖面增加工程量(如日本百米高的玉川坝)以克服坝体抗剪能力下降的缺点来换取碾压混凝土简易快速施工的方便,并得到良好的经济效益。我国水利工程也存在投资大、发挥效益慢的问题,因此碾压混凝土快速施工引进后,从坑口工程修建到现在十多年间就迅速发展遍及全国。从碾压混凝土材料到工艺都取得了一定的经验。

由于碾压混凝土材料和工艺的迅速发展,来不及同时发展与之相适应的新结构和新设计方法,进一步提高层间质量、防渗和耐久性,到目前为止仍采用加大工程量的方法来保持重力结构的安全,采用 20 世纪初以来重力坝设计计算和强度判别方法,加大工程量和安全系数。当前实践中,人们希望通过改进技术而不增加工程量来保证坝体安全,加快工程进度,对于适合拱坝条件的地方,希望保留拱坝在结构上超载能力大、工程量小的优点,却又同时引用碾压混凝土减少温控快速施工的优点。为此,1988 年我们曾结合多裂隙体及含缺陷结构强度、弯曲裂缝及温度断裂研究探索柔性工程结构,释放水压及温度应力,同时保持拱坝整体强度。1993 年溪柄工程设计时,国内外已建和在建的碾压混凝土拱坝有 4 座,最早是南非两座碾压混凝土重力拱坝,坝高 50m 和 70m,拱坝未设径向横缝,仅用径向诱导缝灌浆以消除拱坝温度应力,蓄水冷却后温度应力沿诱导缝拉成上下游贯穿缝,最大缝宽达 2~3mm,凿槽灌浆止漏,小缝宽 0.1mm 难灌浆,漏水量达 2~3.5 L/s。梁为重力剖面,拱整体作用被破坏仍可挡水。1990 年我国普定修建 75m 碾压混凝土厚拱坝,模仿南非工程设置改进的诱导缝,普定气候好、建材条件好、施工质量好,设计上工程量较大,为降低温升,放慢浇筑上升速度,未显示快速施工的优点,混凝土浇筑延续三年。沿拱轴 60m 设置的诱导缝,蓄水后坝体出现贯穿裂缝,缝不发生在预定的诱导缝位置,须进行灌浆修补。1991 年水利部推荐我们向设计单位介绍碾压混凝土成层结构研究和温泉堡碾压混凝土拱坝(高 49m)设计方案,采用了 30m 间距横缝,拱坝两侧上部增设诱导缝各一条,拱坝厚度小,30m 仓面小,混凝土中水泥用量较多(抗冻要求)层间间歇短,容易满足层间结合要求,因此缺陷少,坝体混凝土质量良好,但横缝准备工作量大,运输平仓碾压有干扰,冬季寒冷停工,三年完成拱坝浇筑,碾压混凝土施工速度快的优点不明显。

1993 年,在水利部工程贷款支持下、水利部和国家自然科学基金科研经费资助下研究设计了国际上第一座碾压混凝土薄拱坝——福建省溪柄工程,坝高 63.5m,宽高比 0.189,坝址气温较高,年平均温度 19℃,多雨,冬季枯水季短。拱坝修建在节理发育的砂岩上,拱座基岩渗水严重。设计按常规进行 4~5m 深坝基固结灌浆以及一排 3m 间距帷

幕灌浆向左岸延伸 10m 及向右岸延伸 40m 以阻止绕渗,由于右岸灌浆后仍然渗流量较大,帷幕增加到 1.5m 间距,渗流消减。溪柄碾压混凝土薄拱坝用低热 425[#] 水泥,低绝热温升混凝土(12℃),后期高强度(高掺粉煤灰及石粉)混凝土及高抗渗涂料 XYPEX,外力作用下多裂隙相互影响及裂缝边界影响的解析数值解和有限元近似取值,内力分布及缝端应力强度因子和应变强度因子判别用于工程,采用人工短缝新结构释放上游坝肩和下游拱冠的温度和水压拉应力,在缝端小范围用高韧性材料止裂以保持缝的稳定。研制等温绝热仪较精确测定施工期不同温度条件下的混凝土绝热温升过程,利用改变部分骨料降低混凝土膨胀系数等仿真参数。考虑碾压混凝土层间缺陷研究成层弹性介质基本解及数值方法,研究成层碾压混凝土结构的应力重分布和边界剪应力集中。研制高精度双轴徐变仪,施工期温度和自重组合累计徐变应力,施工期未到运行期应力及三维仿真计算,进行含人工短缝溢流孔等构造的拱坝边缘及内应力设计。研制低热低膨胀率、高强混凝土,对含人工短缝拱坝下部 2/3 高度内不设横缝冬季浇筑,气温升高后上部 1/3 坝高留中央横缝用混凝土塞成拱提前拦洪,工程缺少必要的施工设备(1m³ 混凝土搅拌机一台,固定起重缆索一条,无备用设备),但施工速度快,1995 年年内碾压混凝土浇筑到坝顶,当年汛期拦 30 年一遇洪水,汛后完成溢流坎及坝顶结构。为了增加发电量,又于 1997、1999、2000 年连续超校核水位蓄水,坝体安全运行。薄拱坝 1997 年已接近稳定变场,至今已运行 6 年未出现约束裂缝,由于施工设备不足,层间曾超要求间歇,而未处理,坝体有水平缝,灌浆队伍更换,部分固结灌浆孔未灌以及帷幕孔未进行。1996 年蓄水时多处漏水,补灌浆后坝肩渗漏不明显,坝体因较薄,未设排水孔及廊道,背面仍有少量渗点。施工期进行温度预测计算和工程实测比较效果良好,实测人工短缝张开 < 1mm 时缝端槽钢后面应变变为 37 μ ,保持稳定,坝顶位移实测和计算预测变化相同。工程验收(2002 年 6 月)结论是:“设计是成功的”。

2002 年 6 月 2 日溪柄电站工程验收结论:

溪柄一级水库大坝是水利部批准列为“八五”期间重点攻关的科研示范坝,是世界第一座碾压混凝土薄拱坝。清华大学水电系及水电设计研究所通过研究施工期和运行期大仓面坝体温度应力和组合应力变化规律、温度断裂和组合应力作用下裂缝的延伸稳定,首次提出了释放应力的人工短缝措施,并在工程中得以应用,实践证明短缝保持稳定。1996 年 4 月大坝导流洞封堵验收,1996 年 9 月第一台机组并网发电,1996 年 8 月大坝经受非常洪水位的考验,此后还长时间持续高水位运行,全坝至今没有出现约束裂缝,证明设计是成功的。溪柄一、二级电站各工程项目已全部按设计要求完成,各分部、各单位工程质量合格,投入试生产 5 年,运行管理工作已走上正轨,工程档案资料整理完毕。本验收委员会一致认为:该工程已具备竣工验收条件,同意通过验收,正式交付使用。

2 碾压混凝土薄拱坝布置及剖面设计

坝轴线布置在“S”形河谷的下拐点处,右岸拱座在凸出的山脊上,左岸拱座在两条山沟之间,上游的山沟即 F2 断层,F2 断层产状 N48°E/SE $\angle$ NW47°,倾角较陡,倾向下游,坝基深处与 F2 断层相交,对坝体稳定没有影响。通过 F2 断层的渗水问题采用帷幕灌浆处理坝区枢纽布置见图 1,上游剖面展示图见图 2。

碾压混凝土薄拱坝坝顶高程 644m,最大坝高 63.5m(不包括 1 米的防浪墙),坝底宽 12m,宽高比 0.189,坝顶弧线长 95.5m,坝顶宽 4m。坝体外轮廓为简单的同心圆拱,在坝

顶处的外半径为 48m,内半径为 44m,圆心角为 114° 。坝顶挑流式溢流坎布置在坝轴线偏左岸侧,自桩号 $0+18.55\sim 0+49.55\text{m}$,溢流前缘长 31 米(包括两条各 1m 的边墩),共五孔,每孔净宽 5m。由于下游河床较窄,中间三孔沿径向收缩,挑距 35m,两侧孔出口缩窄成 2m,改变挑距为 30m,堰顶最大单宽流量 $14\text{m}^3/\text{s}$,挑坎末端最大单宽 $35\text{m}^3/\text{s}$,但入水单宽 $70\text{m}^3/\text{s}$,预计未来最大冲坑深约 20m。设消力池坝高 12m,抬高后尾水深 18m,溢洪堰设四个中墩和两个边墩。闸门设门槽,宽 0.5m,深 0.25m,原设计正常挡水位(坝顶)以上自由溢流,坝预留闸门位置,以备提高水位的可能。运行期业主为提高调节库容,加五扇闸门。闸墩门槽上游侧设 1m 宽人行桥,桥面高程 645m,门槽下游侧与坝顶齐平设工作桥,宽 4m,桥面高程 645m。溢流前缘外半径为 49.65m,挑流坎处内半径为 39m(距圆心中心),溢流坝顶高程为 639m。

为施工方便,薄拱坝外形采用简单的无倒坡的同心圆拱,在拱上游两坝肩设置人工短缝和下游两坝肩采用局部加厚加贴角的方式形成双曲拱受力。由于整体碾压混凝土拱坝温度应力相对较大,为经济起见尽量不进行人工温控措施,主要利用冬春季 12 月~次年 3 月低温季节碾压快速施工,这时月平均气温(混凝土入仓温度) $10\sim 16^\circ\text{C}$,较年平均气温 19°C 低 $3\sim 8^\circ\text{C}$,以降低坝体温度。在大坝浇筑过程中,后期气温升高,超过设计要求,从高程 610m 往上开始埋设冷却水管,平行于坝轴线方向呈折线弧形布置。冷却水管对碾压工艺有干扰。

从 585m 高程往上在拱上游两坝肩拱座设置止水的人工折缝,止水以防压力水深入坝内,人工短缝折 45° 转向坝体低应力区,缝端设置 16 号槽钢止裂,并埋设止水、灌浆盒与灌浆管,为运行期冷却后灌浆提供条件,改善稳定条件:自高程 590~620m 之间,坝体下游面拱冠附近设置三条短缝,缝沿径向,高程 610m 以下的径向缝深为 2m,610m 以上的径向缝深为 1.5m。仿真计算表明:人工短缝可释放水压荷载作用下的拉力区,也释放了整体拱上下游面的温度应力,尤其是拱向应力,具体说来就是设置人工短缝后,沿拱坝上游坝肩宏观拉应力大大下降为微压,下游拱冠拉应力也大大下降。缝内设灌浆系统目的是运行期需要时也可以利用灌浆改变作用力方向,以增强拱座稳定。实测表明:在超高水位下运行时人工短缝张开 $< 1\text{mm}$,止裂措施后面实测应变 $< 37\mu$,止裂效果好,人工缝保持稳定。

坝体 620m 高程以上河谷较宽,混凝土浇筑时间延长后,气温上升,在拱中部设一条灌浆横缝,自 633m 高程以上横缝上游预留孔作膨胀混凝土塞,作为铰接拱保持拱向传力,改善拱座应力,横缝待坝体冷却后灌浆。

碾压混凝土按 90 天强度设计,强度保证率 85%,标号为 C15,配制强度 17.9MPa 。在 590m 高程以下采用二级配,590m 高程以上采用最大粒径为 6cm 的三级配混凝土。相应的水泥(425[#])用量分别为 $75\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $65\text{kg}/\text{m}^3$,粉煤灰用量分别为 $120\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $105\text{kg}/\text{m}^3$,木钙掺量均为 0.25%。实测混凝土全级配绝热温升 12°C 。实测全级配粉砂岩骨料混凝土 $\alpha = 8.5$,坝体中下部温度应力较大部位细骨料用石灰石代替,以降低混凝土膨胀系数($\alpha = 6.0$)。拱坝上游面用 1.5m 厚二级配混凝土 R 90200[#],其他部分为三级配混凝土 R 90150[#]。混凝土配合比试验见表 1。由于测定强度比设计要求高,施工中降低碾压混凝土水泥用量 5kg,相应降低混凝土绝热温升为 11°C ,增大常态混凝土的水胶比

便于人工振捣,见表2。

在拱坝上游面设计刷涂 XYPEX 防渗涂料,形成防渗膜,以改善坝面防渗性能。经室内试验表明:防渗涂料垂直渗入混凝土约 2cm 深,混凝土抗渗标号由 S_4 提高到 S_8 ,而且新老涂层连接良好。

泄水孔

泄水孔设在高程 620m 坝右岸端头处,孔口尺寸为高 1.5m,宽 1m,出口为 $1.2\text{m} \times 1.0\text{m}$,最大泄流量为 $26\text{m}^3/\text{s}$ 。泄水孔长 9.42m,闸室长 4.58m,下游泄槽长 12m。泄水孔全长 26m,全部建在基岩上,泄水孔采用 200[#] 常态混凝土,与拱坝坝体碾压混凝土连接处设 2mm 厚的紫铜片止水两边各伸出 20cm。泄水孔顶板厚 1m,底板及边墙厚 0.7m,泄水孔出口前 1.52m 处埋设一通气孔,直径 38mm,由闸室平台上通出孔外。

泄水孔进口设一道静水启闭的工作闸门,上游坝面上埋设轨道,启闭机安装在坝顶上的启闭机框架平台上,平台高程 648.13m,检修平台高程 644m。

泄水孔出口设一道动水启闭的弧形工作闸门,启闭机安装在 625.2m 高程的闸室平台上,弧形闸门铰轴中心高程 621.6m,桩号 0+008m(坝轴线处的桩号 0+000),闸室边墙厚 0.6m,埋设启闭导轨。

泄槽底板厚 0.3m,边墙高 1.8m,厚 0.4m,自桩号 0+014.5~0+019 为扩散渐变段,由矩形泄槽变为梯形泄槽,边坡 1:0.5。泄槽底部基岩上开挖纵、横向卵石排水沟,断面为 $0.15\text{m} \times 0.15\text{m}$ 。

泄水孔钢筋混凝土施工,未震捣出现蜂窝及孔洞,拆模后填补了混凝土,蓄水后作反灌处理止漏。

表 1 混凝土配合比试验

混凝土种类	设计标号	水胶比	级配	S (%)	木钙掺量 (%)	C:F	材料用量							
							水泥	粉煤灰	砂	小石	中石	大石	水	木钙(固)
碾压混凝土	R90 150	0.51	三	32	0.25	28:62	65	105	680	469	469	625	87	0.425
		0.51	二	35	0.25	38:62	75	120	724	727	727		100	0.488
常态混凝土	R90 150	0.70	三	31	0.25	80:20	137	34	638	461	307	768	120	0.428
			二	35	0.25	80:20	171	43	680	683	683		150	0.535
	R90 200	0.60	三	29	0.25	80:20	160	40	589	312	312	780	120	0.500
			二	33	0.25	80:20	200	50	630	692	692		150	0.625

表 2

配 合 比			性 能																							
混凝土标号	设计标号	水胶比	S (%)	木钙掺量 (%)	石子级配 小石:中石:大石	材 料 用 量					C:F	Vc(s) 或 slump (cm)	湿容重 (kg/m ³)	抗压强度 (MPa)				静压 弹模 × 10 ⁴ MPa		极限 拉伸 × 10	凝结时间					
						水	水泥	粉煤灰	砂	小石				中石	大石	7d	28d	90d	7d				28d	90d		
碾压混凝土	150 R90	0.50	32	0.25	30:30:40	87	70	105	676	468	624	40:60	8.6(s)	2 490	6.8	13.4	22.0	0.43	1.02	1.77	1.83	2.86	0.76	90d	初凝	终凝
	150 R90	0.50	35	0.25	50:50	100	80	120	719	725	725	40:60	7.0(s)	2 467	6.6	14.6	23.9	0.45	1.02	1.57	1.52	2.10	0.71	16:48	28:36	
常态混凝土	150 R90	0.62	30	0.25	30:20:50	120	150	38	609	463	300	771	80:20	4.0	2 470	10.3	18.8	26.4	0.83	1.66	2.39				21:36	27:12
	150 R90	0.62	35	0.25	50:50	150	194	48	668	674	674	80:20	6.4	2 412	10.7	17.5	25.0	0.82	1.58	1.98	2.12	2.61				
	200 R90	0.54	23	0.25	30:20:50	120	170	44	561	470	313	704	80:20	4.6	2 403	13.5	23.9	32.7	1.15	2.18	2.47					
	200 R90	0.54	33	0.25	50:50	150	222	56	620	683	603	80:20	5.6	2 445	12.3	21.7	29.2	1.02	1.86	2.48	2.35	3.24		21:28	26:10	