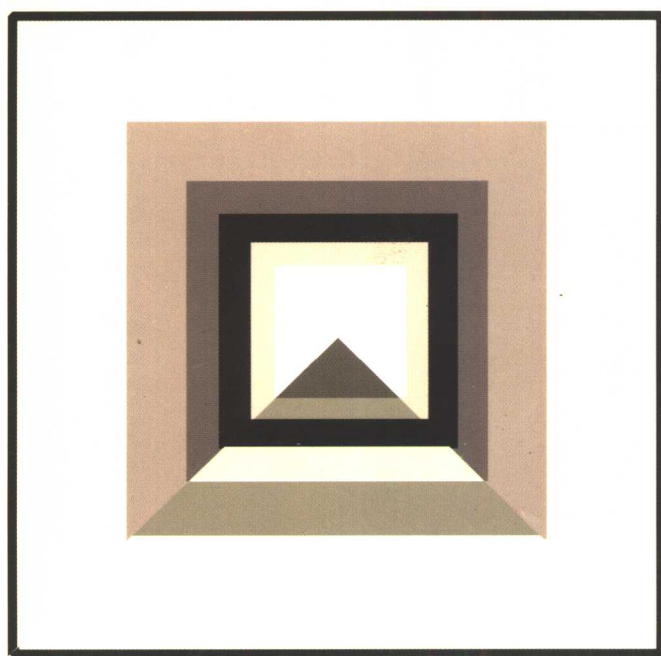


碾压混凝土 拱坝

张仲卿 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

碾压混凝土拱坝

张仲卿 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

碾压混凝土筑坝技术问世以来,得到世界各国的普遍运用,在我国发展尤其迅速。但是这一技术以往主要用于重力坝上,在拱坝施工中采用较少。本书结合实践,通过模型试验和理论分析,对用碾压混凝土拱坝筑坝技术作了研究。

全书共分十章,主要包括:拱坝结构布置、材料试验研究、拱坝应力分析、温控计算、拱座稳定计算、拱坝抗震设计、RCC 施工方法、仿真结构模型试验、原型观测等内容。

本书读者对象为:水利工程设计施工人员、大专院校师生。

图书在版编目 (CIP) 数据

碾压混凝土拱坝/张仲卿著. —北京:中国水利水电出版社, 2001

ISBN 7-5084-0863-2

I. 碾… II. 张… III. 混凝土拱坝: 碾压混凝土拱坝: 拱坝-水利工程 N. TV642.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 074071 号

书 名	碾压混凝土拱坝
作 者	张仲卿 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 15.5 印张 368 千字
版 次	2002 年 12 月第 1 版 2002 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	32.00 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

碾压混凝土（以下简称为 RCC）筑坝技术问世以来，得到世界各国的普遍运用，在我国的发展尤其迅速。这是因为与常规混凝土相比，RCC 具有一系列明显的优点，如单位水泥用量少，水化热温升较低，施工工艺简单，工期较短等，这些优点完全适应我国大规模经济建设的要求。国家最近批准开工的龙滩水电站大坝，高达 219m，即采用 RCC 技术，将成为世界最高的 RCC 大坝。

以往 RCC 主要用在重力坝上，用于拱坝上的很少。据调查，除我国外，仅南非于 1988 年建成一座名为 Knellpoort 的 RCC 拱坝，这是一座规模较小的拱坝（坝高 50m，体积 5.9 万 m^3 ）。目前世界上已建和在建的 RCC 拱坝仅 16 座，主要集中在我国和南非。究其原因，主要是由于拱坝的结构作用与重力坝有本质上的区别。拱坝主要通过拱的作用将上游的水荷载传达到两岸坝基，是一种高度超静定结构。而常规的拱坝施工方法，是把坝体横缝切割为许多独立的坝块浇筑，必须在坝块冷却到适当温度后进行横缝灌浆才能形成整体，发挥作用。这就和 RCC 的施工原则：不设或少设横缝、大仓面薄层浇筑、连续上升、简化温控措施不相符。不解决这个矛盾，RCC 拱坝就很难发展。

但 RCC 拱坝的许多优点强烈地吸引着人们。中国的学者和工程师对 RCC 用于拱坝建设作了艰辛的开创工作，本书作者张仲卿教授即是中国从事 RCC 拱坝研究的开拓者之一。1984 年他结合岩滩上游围堰工程，通过模型试验和理论分析，研究采用 RCC 拱围堰的可行性，并得出了肯定的回答。1988 年 1 月，岩滩上游 RCC 拱形围堰（高 54.4m，体积 17.8 万 m^3 ）开工，同年 5 月竣工，经过多次洪水考验，屹立无恙，也未出现危害性裂缝，以此为契机，我国 RCC 拱坝的研究和实践取得许多成就。如朱伯芳院士详细阐述了 RCC 拱坝温度应力的计算方法并提出接缝设计方法，从理论上回答了 RCC 拱坝的设计问题。张仲卿教授经过一系列研究后认为：采用不分缝通仓薄层连续上升的施工方法，会产生温度裂缝，但对低拱坝，这些裂缝不会危及拱坝安全（这条结论如果正确将具有很大意义，因为中国有大量的中、小拱坝建设）。刘光廷教授也对 RCC 拱坝作了大量研究和实践工作，并承担了石门子工程的全部技术责任。我国于 1994 年已建成高 75m 的普定 RCC 拱坝（体积 19.9 万 m^3 ）和高 48m 的温泉堡 RCC 拱坝（体积 6.25 万 m^3 ）。现已基本建成高 110m 的新疆石门子 RCC 拱坝（体积 22 万 m^3 ）。四川沙牌 RCC 拱坝最大高度达 132m，列为国家重点科技攻关

项目，也正在兴建中。石门子和沙牌工程的建成，标志着我国 RCC 拱坝建设达到的新高度。

当然，用 RCC 施工方法建筑拱坝是件新事物，确实存在不少矛盾和困难，目前还不能说问题都已解决，还有很多方面需要继续探索和完善。例如，如何控制裂缝发生的部位和走向，如何分析裂缝的范围和影响；研究更完善的重复灌浆技术，研究 RCC 拱坝的破坏机理以及 RCC 层面抗剪性能对拱坝应力及安全的影响等。科研与工程实践是相辅相成，相互促进的，实践中的迫切需求向科研提出明确的任务，而科研上的突破又极大地促进了工程建设。任何事物的发展都离不开这一规律。因此，任何有关 RCC 拱坝研究与实践成果的出版、交流都是值得欢迎的。

本书作者张仲卿教授从事 RCC 拱坝的科研已有 20 多年。如上所述，他在 1984 年就建议岩滩上游围堰采用 RCC 拱坝形式，并为此做了大量研究工作，以后就锲而不舍地孜孜探索，研究内容包括 RCC 拱坝的坝肩稳定、应力分析、裂缝影响、施工工艺、反馈分析和承载能力等。有一些研究项目已列入国家重点攻关和国家自然科学基金项目内。他采用的研究手段除理论分析外特别重视大比例尺仿真模型（例如在模型中反映 RCC 层面特性），这是很可贵的。此外，他还参与过水利水电工程其他领域的科研工作。他的研究都紧密结合工程实际进行，如岩滩、沙牌、三峡等，为工程建设提出了有意义的数据、规律和建议。这是贯彻执行中央科研面向生产、生产依靠科研方针的良好范例。本书是作者在长期研究基础上写成的一本阐述 RCC 拱坝的专著，内容包括设计分析、试验、施工和监测各方面。不论书中的部分观点是否需要商榷，我深信本书的问世会对我国 RCC 拱坝的发展起到促进作用。出版前夕，作者索序于我，因而写了以上一些看法，供广大读者参考。

中国工程院院士、副院长
中国科学院院士
中国国家电力公司顾问

潘家铮

2001.5.13

前 言

碾压混凝土拱坝施工速度快,水泥用量少,水化热温升低,施工工艺简单,是近年来发展起来的一种新坝型。到目前为止,世界上已建和在建的16座碾压混凝土拱坝主要集中在中国和南非两国。

1984年,笔者主持的科研小组结合岩滩上游碾压混凝土拱围堰的可行性研究,进行了石膏整体结构模型试验、多拱梁法计算和三维有限元计算。研究成果发表于《红水河》杂志1986年第3期,题为“岩滩水电站上游碾压混凝土拱围堰设计计算与试验研究”,提出了碾压混凝土拱坝的新概念,论述了碾压混凝土拱围堰的拱座稳定、坝体应力、分缝等几个问题,奠定了碾压混凝土拱坝设计的基础。1988年1月,岩滩碾压混凝土拱围堰(高54.5m,体积17.8万 m^3)开工兴建,同年5月竣工,并经过多次洪水的考验,安然无恙。同年5月,隔河岩碾压混凝土拱围堰(高37m)竣工。同年底,南非的Knellpoort碾压混凝土拱坝(坝高50m,体积5.9万 m^3)诞生。1989年11月D.J.Hooper and J.J.Geringer在《Water Power and Dam Construction》上发表“RCC Arch Dams”。

基于上述研究,笔者在1991年第3期《红水河》杂志发表“碾压混凝土拱坝设计”,同年在北京召开的“国际碾压混凝土大坝会议”论文集上发表“Shape Design and Stress Analysis of RCC Arch Dams”。1992年在《水利学报》第7期发表“碾压混凝土拱坝设计与应力分析”,对碾压混凝土拱坝体型、裂缝、应力、稳定做了更加深入的研究,解决了修建碾压混凝土拱坝的若干技术问题,尤其是拱坝体型与施工工艺的关系。结论是:采用不分缝、通仓、薄层、连续上升的方法,会产生横向温度裂缝,对于中低拱坝,这些裂缝不会危及拱坝安全,计算和试验可忽略裂缝影响。朱伯芳院士在《水力发电》杂志1992(9)上发表题为“碾压混凝土拱坝的温度控制与接缝设计”的论文。阐述了RCC拱坝温度应力的计算方法和接缝的设计方法,解决了RCC拱坝的设计的温度应力问题难点。1993~1996年笔者承担国家自然科学基金资助项目《碾压混凝土拱围堰反分析》(编号59279375)进行了碾压混凝土拱坝筑坝技术研究,重点从裂缝开展反推结构的安全性,1996年刘光廷教授在清华大学学报上发表了3篇关于RCC拱坝的论文,丰富了RCC拱坝设计理论。1994年我国建成了高75m的普定RCC拱坝(体积19.90万 m^3)和温泉堡RCC拱坝(坝高48m,体积6.25万

m³), 积累了我国 RCC 拱坝建设的经验。对于高拱坝, 不仅要考虑横向裂缝影响, 而且要研究层缝削弱承载能力的程度, 因此 1996 年笔者又进行了高 125m 三峡三期 RCC 拱围堰方案的研究, 重点研究扁拱的布置温控计算及拱座稳定问题。

上述研究和实践, 解决了中低 RCC 拱坝的设计和施工问题, 由于碾压混凝土应用于高拱坝之后, 有关温度应力和裂缝等问题还没有得到很好解决, 因此, 研究解决这些课题被列为“八五”、“九五”国家重点科技攻关项目。国家电力公司成都勘测设计研究院结合 132m 高的沙牌碾压混凝土拱坝进行了科技攻关, 随着沙牌拱坝近期建成, 将使碾压混凝土拱坝建设踏上一个新的台阶。笔者承担了“高碾压混凝土拱坝承载能力研究”子题(子题编号 96-220-02-01-01(3)), 研究坝体应力变形、层面抗剪特性对坝体应力的影响、坝体温度场及温度应力、破坏机理等问题。由笔者主持的课题组在 1998 年制作了比尺为 1:80 的碾压混凝土拱坝仿真材料模型, 用原型材料模拟拱坝, 避免了复杂的模型材料相似转换问题, 模型形象直观, 这在国内外研究中尚属首例。同时, 用大型有限元软件 ANSYS 进行结构非线性分析, 用接触单元模拟横缝, 并首次突破坝体均质假定, 考虑了碾压混凝土层面, 其破坏面沿层面产生, 这些研究成果在国内文献中未见报道。

本书第一章, 介绍 RCC 拱坝的诞生; 第二章, 拱坝结构布置; 第三章, 材料试验研究; 第四章, 拱坝应力分析; 第五章, 温控计算; 第六章, 拱座稳定分析; 第七章, 抗震计算; 第八章, 施工方法; 第九章, 仿真结构模型试验; 第十章, 原型观测。

随着“八·五”、“九·五”国家重点科技攻关专题的完成, 碾压混凝土拱坝将呈现盎然生机, 在大规模的水电建设中蓬勃发展。

本书自始至终获得潘家铮院士的指导和帮助, 并承蒙作序; 沙牌设总钟永江教授级高级工程师审查了全书, 特致衷心感谢。

书中谬误和不妥之处, 恳请读者指正为盼。

作者

2002.5.8

Foreword

Due to fast construction, low cement consumption, low hydration temperature rise and simple technology, the roller compacted concrete arch dam appeared as a newly developed type. Presently 14 RCC arch dams both completed or under construction are mainly situated in China and South Africa.

In 1984, a scientific research team managed by the author carried out feasibility study on the upstream arch RCC coffer dam of Yantan Project by means of gypsum structure model test, multiple arch-cantilever calculation and 3 dimensional computation. The results were published as 《Computation and Research Test for Upper RCC Arch Cofferdam of Yantan Hydroproject》 on NO. 3 issue 1986, Hongshui River Magazin. It discussed the stability of springing of RCC arch coffer dam, the stress within dam body and jointing, thus laid a foundation to RCC arch dam design. The construction of Yantan RCC coffer dam was started in Jan 1988 ($H=54.5\text{m}$, Volume= $178,000\text{m}^3$) and completed in May of the same year. It safely stood the test of several floods. In May of the same year, the arch coffer dam of Geheyan project ($H=37\text{m}$) was completed. At the end of the same year the Knellport RCC coffer dam in south Africa ($H=50\text{m}$, vol. = $59,000\text{m}^3$) emerged. In Nov. 1986, D. J. Hooper and J. J. Geringer published an article 《RCC Arch Dams》 on “Water Power and Dam Construction”.

Based on the above mentioned, the author published “The RCC Arch Dam Design” on NO. 3 issue 1991 of 《Hongshui River》. In the same year, an article “Shape Design and Stress Analysis of RCC Arch Dam” was published in the proceedings of “International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams” sponsored in Beijing. In 1992 the article “Design and Analysis of RCC Arch Dams” was published in NO. 7 issue of “Journal of Hydraulic Engineering”. It carried out more deep research of types, cracks, stresses, and stability for RCC arch dam and came to the conclusion: “the concrete placement by jointless blockless, thin layer and continuous rising method will induce transverse temperature cracks. For dams of medium and low height, these cracks will not endanger safety and the influence by cracks may be neglected in calculation and test”. Academician Zhu Bo-fang's essay on 1992 (9) of “Water Power” “Temperature control and joint design for RCC arch dams” discussed the method on calculation of temperature stress and design of joint. This theoretically solved difficulties in RCC arch dam design. In 1993~1996 the author for the project 《Reverse Analysis of RCC arch dam》 (NO. 59279375) funded by Natural Science Financial Aid undertook technical research for RCC arch dams, the focal point of which is reverse deduction of structure safety taking cracking into consideration. In 1996 Prof. Liu

Guang-ting published 3 articles on the Journal of Qinghua University for RCC arch dam, which enriches the RCC arch dam design theory. In 1994 China completed the Puding RCC arch dam ($H=75\text{m}$, $\text{vol}=199,000\text{m}^3$) and Wenguannddu RCC arch dam ($H=48\text{m}$, $\text{vol}=62,500\text{m}^3$), therefore summed up experiences in RCC arch dam construction. For high RCC arch dams, the influence of transverse cracks should be considered together with the degree of strength decrease by joints between layers. In 1996 the author carried out the research on third stage RCC arch coffer dam of Three Gorges Project, the key points of which were focused on the layout of flat arch and stability of abutment.

The above-mentioned research and practice have solved the design and construction problems of medium and low RCC arch dams. While application of RCC to high arch dams, problems due to temperature stress and cracking arise. They are put among the "Eighth-five year plan's" and "Nineth year plan's" key scientifico-technical projects by the state. The Chengdu Institute of Investigation, Design and Research under the state Electric power Co. carried out key scientifico-technical task in combination with the 132m high Shapai RCC arch Dam, which will be completed recently. This will raise RCC dam construction to a new position. The author undertook a sub-project of "Research on the Loading Capacity of High RCC Arch Dam" (NO. of sub-project 96-220-02-01-01 (3)) for researching the dam body deformation, influence of shearing characteristics between layers, temperature stress field and temperature stress, as well as rupture mechanism, etc. The team managed by the author made a simulated model of prototype material scaled 1:80 to simulate the arch dam, therefore, it avoided the transformation of material similarity, and could be directly perceived through the object. This was the first case in China. Besides this, big finite element software ANSYS was used to make non-linear structural analysis, contact elements were used to simulate transverse joints. It also broke through the hypothesis of dam body homogeneity by taking RCC layer surface into consideration and considered rupture along layer surfaces. NO such information was found in literatures in China.

Essential content of this book is as follows. Chapter I, An introduction to RCC arch dam's emergence; Chapter II. Structural layout of arch dams; Chapter III. Material testing and research; Chapter IV. Stress analysis of arch dams; Chapter V. Calculation of temperature control; Chapter VI. Stability analysis of arch dam abutment; Chapter VII Earth quake-resistant design for arch dams; Chapter VIII Construction; Chapter IX Simulated structure model test; Chapter X Prototype observation; Chapter XI Flood release and energy dissipation.

Along with the completion of key scientifico-technical projects of "Eighth-nineth five year plan", RCC arch dams are full of vitality and are developing prosperiously in large scale hydro power construction.

The author is obliged to academician Pan Jia-Zheng's help and preface. Prof. Zhong

Yong-jiang, the chief designer of Shapai Project reviewed the whole book. The author is also hearfully indebted to him.

Restricted by knowledge, the author is sincerely waiting for comments.

The author

May, 2002

目 录

序

前言

第一章 概述	1
第一节 碾压混凝土拱坝的优点	1
第二节 岩滩碾压混凝土拱围堰的研究与实践	2
第三节 南非两座碾压混凝土拱坝的诞生	13
第四节 碾压混凝土拱坝的推广与国家重点科技攻关	15
第二章 碾压混凝土拱坝结构布置	17
第一节 体形布置	17
第二节 横缝布置与灌浆	19
第三节 裂缝开展	27
第四节 诱导缝与横缝的布置原理	28
第五节 防渗结构	30
第六节 细部构造	33
第三章 材料试验研究	38
第一节 配合比试验	38
第二节 外掺 MgO 微膨胀水泥	47
第三节 抗裂性能研究	50
第四节 掺粉煤灰	56
第五节 外加剂	58
第六节 碾压混凝土的力学指标	59
第四章 拱坝应力分析	62
第一节 坝体应力分析方法	62
第二节 多拱梁法计算	64
第三节 无缝拱坝坝体应力分析	71
第四节 有缝拱坝坝体应力分析	78
第五节 碾压混凝土拱坝仿真应力分析与计算	82
第六节 碾压混凝土拱坝沿层面破坏的机理	93
第五章 温控计算	100
第一节 概述	100
第二节 特征温度场计算	103

第三节	天然冷却与水管冷却·····	107
第四节	温控措施·····	112
第六章	拱座稳定分析·····	115
第一节	概述·····	115
第二节	刚体极限平衡方法·····	116
第三节	人工拱座稳定分析·····	120
第四节	有限元法分析·····	126
第七章	抗震计算·····	133
第一节	概述·····	133
第二节	拱坝抗震设计方法·····	137
第三节	沙牌拱坝抗震计算·····	143
第八章	施工方法·····	147
第一节	拌和系统与运输系统·····	147
第二节	混凝土碾压·····	151
第三节	模板工程·····	160
第四节	碾压混凝土层面处理·····	162
第五节	质量控制与检测·····	164
第六节	岩滩碾压混凝土拱围堰施工·····	166
第七节	施工过程计算机模拟·····	170
第九章	仿真结构模型试验·····	174
第一节	相似理论·····	174
第二节	模型设计与制作·····	176
第三节	施工温度场模拟·····	179
第四节	设计水压力作用下的应力和位移测试·····	182
第五节	超载与破坏特征·····	185
第六节	温度应力试验·····	189
第十章	原型观测·····	192
第一节	概述·····	192
第二节	碾压混凝土坝外部观测·····	194
第三节	内部观测·····	201
第四节	监测仪器埋设技术·····	205
第五节	仪器选型·····	211
第六节	数据自动采集与通讯接口·····	216
第七节	原型观测成果分析及反馈分析·····	230
参考文献及资料	·····	233

第一章 概 述

第一节 碾压混凝土拱坝的优点

一、碾压混凝土的优点

岩滩碾压混凝土拱围堰的施工实践表明,碾压混凝土具有以下优点:

(1) 水泥用量少。每立方米混凝土的水泥用量为 45kg,粉煤灰 105kg;在围堰高度 2/3 以上,下游围堰采用 35kg 水泥,117kg 粉煤灰;上游围堰采用 45kg 水泥,85kg 粉煤灰,其强度容重与抗渗性能均能满足设计要求。

(2) 施工速度快。碾压混凝土可采用汽车运输直接入仓,或用皮带机进料配汽车进仓,这是加快施工进度的主要措施。岩滩围堰工程创造了最高日产 8189m³ 的纪录,而且稳产 8~10d,日平均 6300m³,日升程平均 1.25m。该围堰于 1988 年 1 月 26 日开始浇筑,同年 5 月 4 日完工,历时 103d,浇筑碾压混凝土 18.5 万 m³,围堰高度 54.5m,说明一个冬春足以完成一座中低高度的拱坝。

(3) 绝热温升低。因水泥用量为常规混凝土的四分之一左右,发热时间缓慢,虽有连续上升,是使表面散热不利的因素,但内部温度较常规混凝土约小一半,所采用配合比的室内绝热温升为 11.5℃,上游围堰观测的数值由于部位不同,一般在 11.0~15℃之间。

(4) 施工工艺简单。碾压混凝土施工的劳动强度相应较低,从拌和、运输、摊铺、平仓到碾压等全过程,可实现机械化,比常规混凝土的人工平仓、人工振捣省力得多。只要在施工过程中组织管理好,每道工序紧密相连、顺序前进(进料→卸料与摊铺→平仓→碾压),严格按操作规程认真操作,较易保证施工质量。

二、常态混凝土拱坝存在的问题

常态混凝土拱坝施工时,沿上游弧长每隔 15~20m 要设置一条横缝,使坝体成为若干柱状独立块,各柱状块混凝土单独浇筑,待坝体降到稳定温度后,进行封拱灌浆,然后下闸蓄水,也有一边灌浆一边蓄水的。总之,这个问题十分复杂,严格的温度控制措施、冷却和灌浆等常常使人感到头痛,主要目的是要解决水化热温升而产生的温度应力问题。一座 60~80m 高的常态拱坝也需要 2~3 年方能下闸蓄水。

三、应用碾压混凝土拱坝的效益

普定碾压混凝土拱坝比用常态混凝土施工节约造价 1200 万元,占全部投资的 5%,提前一年发电。温泉堡碾压混凝土拱坝节约造价 1360 万元。虽然影响造价的因素很多,如砂石料、粉煤灰、水泥的出厂价、运输距离等都有关系,但是碾压混凝土可以缩短施工工期是节约造价的最主要因素。

第二节 岩滩碾压混凝土拱围堰的研究与实践

岩滩水电站位于红水河中游，在广西壮族自治区大化瑶族自治县境内。水库正常高水位 223m，装机 4 台，容量为 1210MW，坝后式厂房。挡水建筑物为实体重力坝，最大坝高 111m，坝轴线长 525m。施工导流采用左岸明渠导流，基坑全年施工，上游围堰形式在初步设计时，确定采用碾压混凝土重力式围堰，技施设计时，考虑了拱围堰，但因拱围堰的拱座（18 号坝段）稳定性问题、分缝后的灌浆问题、应力计算时围堰与拱座的协调问题等难以解决，仍考虑以重力式围堰为主，同时提出继续研究较轻型的拱围堰方案，以减少混凝土工程量。1984 年底，设计单位广西电力设计院委托广西大学土木系研究拱围堰的可行性，笔者主持了全部研究工作。1985 年 3 月提交“红水河岩滩水电站上游 RCC 拱围堰可行性报告”（以下简称拱围堰或围堰，也称单曲拱坝），同年 4 月开始作石膏整体结构模型试验，并进行多拱梁、三维有限元计算，1986 年 5 月研究工作已基本结束。1986 年在《红水河》杂志第 3 期发表论文“岩滩水电站上游碾压混凝土拱围堰设计计算与试验研究”，论述这座高 54.5m，宽高比等于 5.3，混凝土量 12.3 万 m^3 ，河谷极不对称的拱围堰的坝肩稳定、坝体应力、分缝等几个问题，研究内容涉及修建碾压混凝土拱坝的主要问题：应力分布、分缝、碾压混凝土的本构关系、防渗、施工运输、入仓、立模、浇筑、仪器埋设、安全运行等。

一、拱围堰布置特点

1. 布置特点

碾压混凝土拱围堰是在截流闭气后，由低土石围堰掩护进行施工，要求汛期前完成，工期紧迫。拱围堰使用期 3 年，属临时性建筑物，因此各方面的要求都较永久性建筑物低。为了抢时间，要求清基开挖量小，经常水位以上的坝肩开挖可在截流前进行。为了加快施工进度，要求外形简单，立模方便，所以采用单曲拱坝，上游为直立式，下游为直线斜坡（图 1.1）。为了便于施工道路的布置，要求拱轴线较“直”，于是采用较小的中心角和较大的半径，见表 1-1。

表 1-1 拱围堰主要尺寸表

高程 (m)	坝厚 T (m)	中 心 角 ($^{\circ}$)			半 径 (m)		备 注
		左	右	总	内	平均	
181.0	5	35	47	82	200.5	203.0	$R_{\text{外}}=205.5\text{m}$
171.0	5	35	47	82	200.5	203.0	
161.0	8	35	42	77	197.5	201.5	
151.0	12	35	36	71	193.5	199.5	
141.0	16	30	29	59	189.5	197.5	
136.0	18				187.5	196.5	
131.0	20	12	10	22	185.5	195.5	

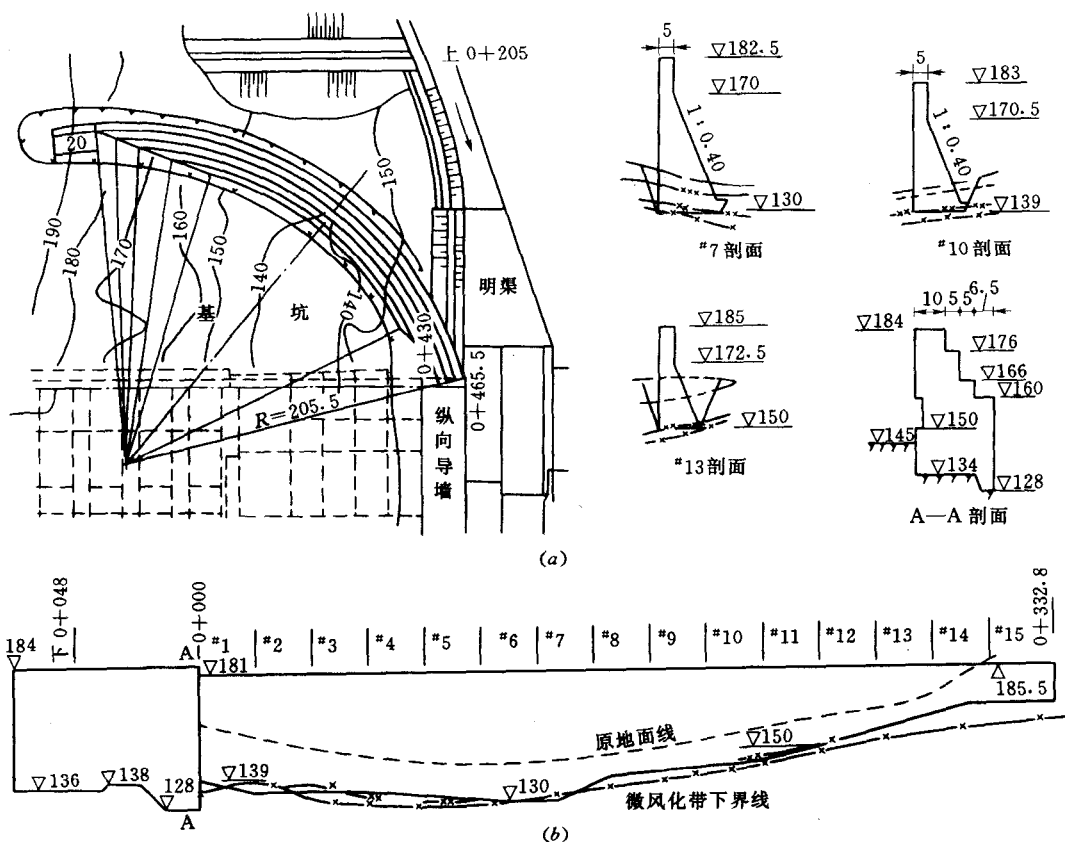


图 1.1 上游碾压混凝土拱围堰布置图
(a) 平面布置图; (b) 沿拱轴线展开图

2. 平面和立面布置

拱冠剖面: 上游为直立式, 顶宽 5m, 便于振动碾行走碾压, 底宽 20m, 下游坡为 1:0.4。

平面布置: 先后布置了十余种方案, 最后选定拱轴半径 $R=203\text{m}$, 最大中心角 82° , 左拱端轴线的切线与纵向导墙的交角为 15° , 右岸直线段长 25m。上游拱围堰混凝土量 12.3万 m^3 , 比重力式围堰少 8万 m^3 , 土石方开挖 13万 m^3 与重力式围堰相同。

为了改善单曲拱坝的应力分布, 可将埋入坝基部分作成倒悬, 如图 1.2 (a), 只要开挖整齐, 倒悬部分不必立模, 这样既改善了应力分布, 又不会影响施工进度, 应当指出的是, 洪水消落时, 有时会出现基坑的水位高于围堰之外的水位, 即所谓反向水压力 [图 1.2 (b)], 为抵抗反向水压力, 可布置为倒向基坑内, 两者常有矛盾, 应作具体分析。

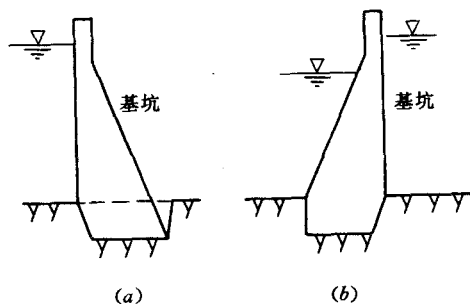


图 1.2

二、纵向导墙的稳定计算和应力计算

这里所说的纵向导墙是指 18 号坝段（含大底孔泄水槽），它既是导流明渠的边墙，又是拱围堰的坝肩。对于重力式围堰来说，导墙的作用是分流和挡水，比较简单，而兼作拱围堰坝肩后，就大大增加了导墙受力的复杂性。

作为坝肩的纵向导墙，最重要的是稳定问题，纵向导墙长为 172m。分成若干段进行浇筑，我们只取第一、二两段合成 48m 长，纵向稳定就可满足，而横向稳定则成为拱围堰能否成立的关键。岩滩 18 号坝段横向宽度 26.5m，当明渠达到 181m 水位时，明渠侧底部出现 0.1MPa 拉应力。作为坝肩还需要负担拱端传来的推力 N 和剪力 V ，当 V 与明渠水压力 P 叠加时，则横向稳定和应力是无法满足要求的。因位置所限，导墙不能再加宽。为了满足横向稳定要求，只有通过调整拱轴切线与纵向导墙的交角来实现（图 1.3）。当拱轴与导墙相切时，即 $\varphi=90^\circ$ ，拱端剪力 V 与外水压力 P 叠加而成滑动力，而抗滑力仅仅是导墙自重产生的摩擦力和粘结力。由于 V 很大，一般均不可能稳定，如果使拱端半径与导墙的交角 φ 小于 90° ，当 φ 减小时，剪力在 X 轴的投影 V_x 减小，拱轴力 N 在 X 方向的分力 N_x 由 0 逐步增大，若 $\sum N_x = \sum V_x$ ，说明拱圈不影响导墙的横向稳定，值得注意的是各种水位下的 $\sum V_x$ 、 $\sum N_x$ 是不同的。因此选择交角时，应使 $|\sum N_x + \sum V_x| = \text{最小}$ ，找出控制情况的交角 φ 值。当 $\varphi=90^\circ$ ， $V_x = -10807\text{t}$ ， $N_x = 0$ ，明渠水压力 $P_x = -36800\text{t}$ ，这时 $V_x + N_x + P_x = -47607\text{t}$ ，滑动力最大。若取 $\varphi=75^\circ$ ， $V_x = -10707\text{t}$ ， $N_x = 10439\text{t}$ ，这时 $V_x + N_x \approx 0$ ，说明拱围堰基本上不影响导墙的横向稳定，从而看出调整交角对导墙的横向稳定是行之有效的。

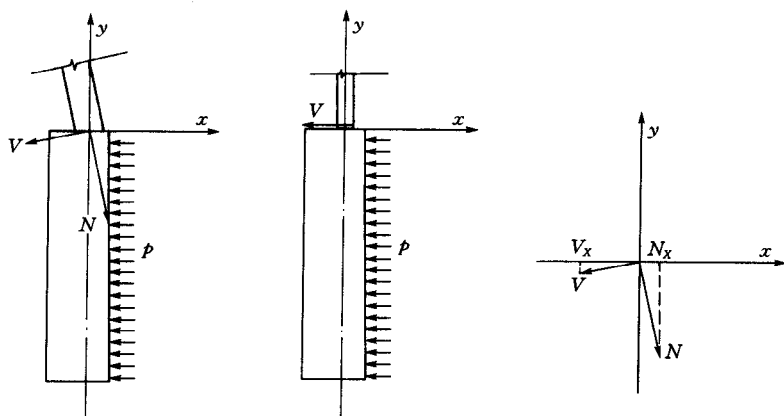


图 1.3

整体结构模型试验成果也说明了这一点，当拱围堰承受设计荷载时，导墙迎水面底仍为压应力。

三、坝体应力分析计算

上游拱围堰计算我们按 7 拱 13 梁的三向全调整多拱梁法计算应力，用 SAP-5 程序作三维有限元分析，用整体结构模型试验进行应力复核，其成果如下：

(一) 荷载及荷载组合

作用在拱坝上的荷载主要包括水压力、温度荷载、自重、泥沙压力。围堰属临时性建筑物，可不考虑泥沙压力。

一般拱坝的荷载组合：

正常情况：自重+正常水位+温降；

校核情况：自重+校核水位+温升。

必要时还应将地震力作为校核。由于岩滩洪枯水位变幅大，校核水位为 185.5m，拱围堰的正常情况指 12 月 1 日至次年 4 月 15 日的 10 年一遇洪水流量为 $1800\text{m}^3/\text{s}$ ，相应上游水位为 162m 来考虑，这种水位按重力坝计算，稳定、应力均满足要求，因此荷载组合只有设计情况和校核情况两种。

(二) 三向全调整多拱梁法计算成果 (图 1.4)

1. 荷载组合

(1) 自重+181m 水位+温升 (用多拱梁法计算)；

(2) 自重+162m 水位+温升 (拱围堰已开裂，失去拱的作用按重力坝计算)。

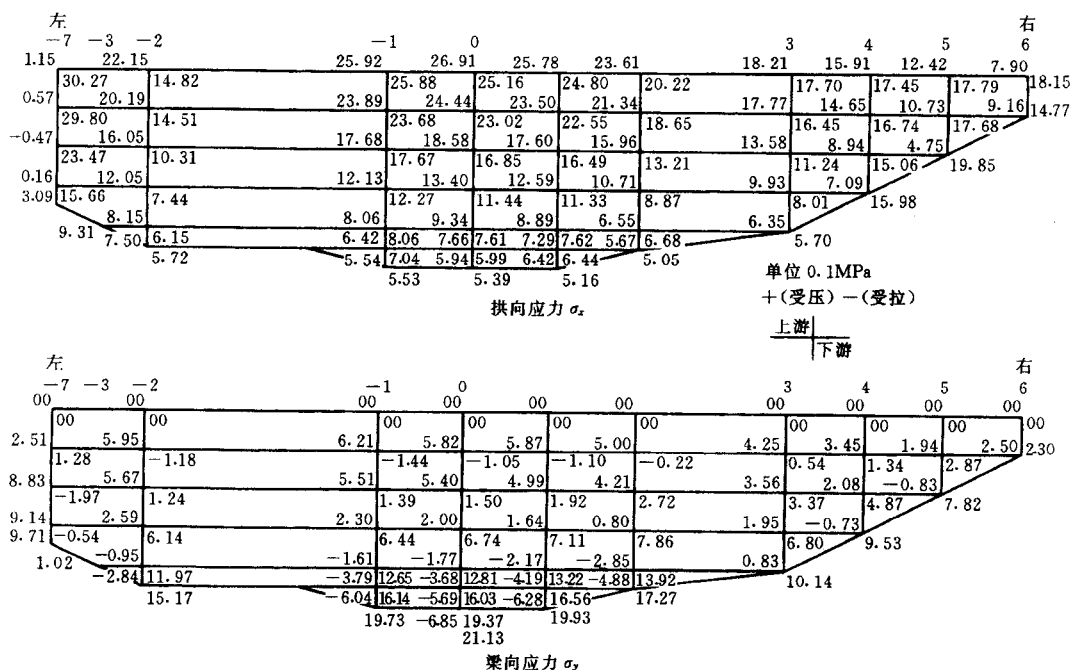


图 1.4 多拱梁法计算成果 (自重+181m 水压力+温升)

2. 计算方法简述

我们的多拱梁法程序是从水电部东北勘测设计院移植而来的，1980 年移植成功后作了不少改进，如输入数据压缩到 86 个，大大减少了准备时间，输出格式也作了较大变动，以便于整理资料，算题规模仍保持 7 拱 13 梁，三向一次全调整。

3. 应力计算成果

荷载组合 (1)：上游梁向最大拉应力 $\sigma_y = 0.685\text{MPa}$ ，下游最大梁向压应力 $\sigma_y = -2.113$