



# 水工混凝土结构 耐久性研究

Study on Durability of Hydraulic  
Concrete Structure

郑建波 © 著



 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



# 水工混凝土结构 耐久性研究

郑建波 著



 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 提 要

混凝土的耐久性是一个受多因素影响的复杂研究范畴,既包括材料本体的特性,又涉及复杂多变的环境因素以及工程的实际运行条件等,因此,混凝土耐久性的研究是一个较为困难的研究领域。本书总结了几十年来水工混凝土耐久性研究领域的主要成果,许多成果已经在众多大坝工程中应用,并取得了良好效果。笔者在进行水工混凝土耐久性研究的同时,也介绍了提高水工混凝土耐久性及其修补加固水工混凝土的新材料、新技术,如HBC低热高抗裂新型大坝混凝土、高抗冻超抗冻混凝土、混凝土抗冻性的量化设计及施工、柔性全封闭抗冲耐磨技术、大坝保温防渗抗裂技术及防碳化技术等。

本书可供科研、设计、施工管理人员及高校师生使用和参考。相信本书的出版,将进一步推动我国水工混凝土及其他工程混凝土耐久性研究及应用的发展。

### 图书在版编目(CIP)数据

水工混凝土结构耐久性研究 / 郑建波著. —北京: 北京理工大学出版社, 2018.3  
ISBN 978-7-5682-5376-5

I. ①水… II. ①郑… III. ①水工结构—混凝土结构—耐用性—研究  
IV. ①TV331

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第044580号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京紫瑞利印刷有限公司

开 本 / 710毫米×1000毫米 1/16

印 张 / 9.5

字 数 / 179千字

版 次 / 2018年3月第1版 2018年3月第1次印刷

定 价 / 48.00元

责任编辑 / 申玉琴

文案编辑 / 申玉琴

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 边心超



# 前 言

## PREFACE

随着混凝土建筑的日益增多，混凝土耐久性问题越来越受到人们的重视，这是由于它直接影响工程的安全性和使用寿命，与工程的经济效益和社会效益密切相关。水利水电混凝土工程直接为人民生活用水、工农业供水、防洪度汛和水力发电等服务，在国计民生中具有重大作用，因此水工混凝土的耐久性更为重要。

水泥和混凝土作为人工建筑材料在工程中应用的历史约200年。众多混凝土结构在运行20~40年甚至更短的时间内，由于耐久性不良及环境条件的恶化，出现过早的“老化病害”，甚至危及运行安全，人们不得不花费巨资进行工程的修补加固，甚至推倒重建。

发达国家吸取经验教训，掀起了混凝土耐久性及修补技术的研究热潮，成立了专门的国际性研究机构，如“欧洲混凝土委员会”和“材料与结构试验室联合会”等。国际混凝土耐久性学术会议已召开多次，混凝土耐久性的研究已经从工程调研、性能研究，发展到以寿命为目标的耐久性设计研究。

水工混凝土建筑物主要包括混凝土大坝、水闸、堤防、隧洞、渡槽等。这些水工混凝土建筑物能否长期安全运行，不仅涉及巨大的经济效益，更是关系大江、大河防洪度汛等国计民生的大事。因此水工混凝土建筑物的耐久性问题，一直受到各级领导部门的重视。中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会，在1985年就成立了混凝土耐久性专业委员会，并挂靠在中国水利水电科学研究院结构材料研究所。

本书总结了几十年来水工混凝土耐久性研究领域的主要成果，这些成果已经在众多大坝工程中应用，并取得了良好效果。笔者在进行水工混凝土耐久性研究的同时，也介绍了提高水工混凝土耐久性及其修补加固的新材料、新技术，如HBC低热高抗裂新型大坝混凝土、高抗冻超抗冻混凝土、混凝土抗冻性的定量化设计及施工、柔性全封闭抗冲耐磨技术、大坝保温防渗抗裂技术及防碳化技术等。相信本书的出版，将进一步推动我国水工混凝土及其他工程混凝土耐久性研究及应用的发展。

混凝土耐久性的研究和应用是一个复杂的、综合的“系统工程”，本书的研究成果有些尚属起步，错误和不当之处在所难免，敬请读者指正。

著 者



# 目 录

## CONTENTS

第一章 水工混凝土建筑物概述 .....	1
第一节 水工混凝土建筑物耐久性的调查 .....	2
第二节 水工混凝土建筑物典型病害及其成因 .....	3
第三节 有益的启示和建议 .....	46
第二章 混凝土抗冻性研究 .....	49
第一节 混凝土冻融破坏机理 .....	49
第二节 硬化混凝土中气泡的性质对混凝土抗冻性影响 .....	53
第三节 高抗冻、超抗冻混凝土 .....	55
第四节 粉煤灰高抗冻混凝土在三峡工程中的应用 .....	60
第五节 高强混凝土抗冻性研究 .....	62
第六节 混凝土抗冻性定量化设计与施工 .....	68
第三章 混凝土渗漏溶蚀研究 .....	75
第一节 压力水下混凝土渗漏溶蚀的机理 .....	75
第二节 混凝土抗渗漏、抗溶蚀技术及其在三峡大坝工程中的应用 .....	80
第三节 塑性防渗墙混凝土耐久性的研究和评估 .....	82

第四节	三峡工程二期围堰塑性防渗墙混凝土配合比设计 .....	85
第五节	100 m 深高强低弹复合混凝土墙体材料的开发和初步应用 .....	90
第四章	大坝混凝土抗裂性研究 .....	93
第一节	HBC 低热高抗裂新型大坝混凝土研究 .....	93
第二节	混凝土表面保温抗裂喷涂技术开发及应用 .....	102
第五章	大坝混凝土水质侵蚀研究 .....	109
第一节	高浓度及应力状态下混凝土硫酸盐侵蚀研究 .....	109
第二节	高浓度及应力状态下混凝土抗硫酸盐侵蚀技术开发及现场实施 .....	114
第六章	大坝混凝土抗冲耐磨技术研究 .....	118
第一节	铁矿石集料超高强抗冲耐磨混凝土研究 .....	118
第二节	万家寨大坝低热微膨胀混凝土抗冻和抗冲耐磨的耐久性研究 .....	123
第三节	柔性全封闭抗冲耐磨喷涂技术的研究及应用 .....	127
第七章	水工钢筋混凝土结构防碳化技术研究 .....	138
第一节	混凝土防碳化技术研究 .....	138
第二节	北京永定河珠窝和落坡岭水电站防碳化处理 .....	140
参考文献	.....	144

# 第一章 水工混凝土建筑物概述

我国是世界上水电资源最丰富的国家之一，理论蕴藏量为 6.76 亿 kW，可开发的水电资源为 3.78 亿 kW，位于世界之首。到 20 世纪末期，已开发的水电资源为 7 680 万 kW，占可开发总量的 20.3%，还有近 80% 的水电资源尚未开发。国家已把“西电东送”“南水北调”作为一个战略性目标，大力开发水电资源，我国水电总装机容量超过 3.2 亿 kW。因此可以说，水利水电事业是一个可持续发展的朝阳产业。

中华人民共和国成立以来，我国兴建了众多大坝工程。在高坝工程中，近 90% 为混凝土坝，因为混凝土坝相对于当地材料坝，具有更可靠的安全性。我国混凝土高坝工程的建设发展很快，20 世纪 50 年代兴建了 100 m 级的高坝，如新安江水电站、广东新丰江水电站、湖南柘溪水电站等；60 年代以刘家峡水电站为代表的混凝土高坝已达 147 m(150 m 级)；70 年代乌江渡水电站大坝高 165 m，龙羊峡水电站大坝(黄河第一坝龙头电站)高 178 m，高坝建设进入了 180 m 级；80 年代以二滩水电站为代表，大坝高度已达 240 m(混凝土双曲拱坝)，达到了 250 m 级；90 年代开始设计目前已开始施工的云南小湾水电站拱坝高 292 m；近年来兴建的溪洛渡大坝高 283 m，向家坝高 300 m，锦屏一级大坝高 300 m，我国也因而成为当今世界上的筑坝大国。

大坝工程规模宏大，对我国的国民经济建设、城乡人民用水及防洪度汛等产生巨大的经济效益和社会效益，因此要求大坝工程能有较长的安全运行寿命，即有良好的耐久性。一般认为，高坝工程的安全运行寿命(即满足设计功能要求，安全运行而不大修的使用年限)至少要达 80 年(不修不足以满足设计功能的修补加固工作为大修)。但是，半个多世纪来的实践说明，我国 20 世纪 80 年代以前建设的混凝土大坝，由于设计标准偏低、施工质量不良、管理不善等，大坝混凝土过早地出现了老化和病害，不少大坝工程运行不到 30 年就需大修，耗资巨大。有些工程直接威胁到大江大河的防洪度汛安全。因此，积极开展大坝混凝土耐久性的研究和应用，延长混凝土大坝的安全运行寿命，以便充分发挥其巨大的经济和社会效益，已成为我国水利水电事业中迫切需要解决的重大问题。



## 第一节 水工混凝土建筑物耐久性的调查

为了对我国 20 世纪 80 年代前兴建的水工混凝土建筑物耐久性有较全面的认识,原水电部组织了中国水利水电科学研究院、南京水利水电科学研究院、长江水利科学研究院等 9 个单位,对全国 32 座混凝土高坝和 40 余座钢筋混凝土水闸等水工混凝土建筑物进行了耐久性和老化病害调查,并编写了《全国水工混凝土建筑物耐久性及其病害处理调查报告》。

通过调查可以看出,在我国大型水利水电混凝土工程中,由于耐久性不良而出现的病害主要有以下 6 类:

(1)混凝土的裂缝。在调查的 32 座大坝中,均有裂缝问题,而且调查发现,电站厂房钢筋混凝土结构中的裂缝问题令人瞩目,有的已危及安全生产。

(2)渗漏和溶蚀。渗漏问题与裂缝问题同样普遍,在调查的 32 座混凝土大坝中均存在不同程度的渗漏病害,而且由于渗漏,大坝混凝土产生了溶蚀破坏及由此带来的其他病害。

(3)冲磨和空蚀。有 22 个工程存在冲磨和空蚀对混凝土泄流建筑物的破坏,所占比例为 68.7%。

(4)冻融。大型工程的冻融问题主要集中在东北、西北和华北地区的大坝,在 7 个工程中发生,占 21.9%,其中东北地区工程的混凝土冻融最为严重。

(5)混凝土的碳化和钢筋锈蚀。空气中二氧化碳对混凝土的侵蚀,引起钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀而产生破坏的工程,在调查中有 13 个,占 40.6%。

(6)水质侵蚀。调查中有 10 个工程存在这种病害,占 31.2%。西北地区的硫酸盐侵蚀,已经造成了一些工程混凝土的破坏,并成为安全运行的潜在威胁。

除以上 6 种病害以外,在大型工程中,混凝土耐久性还存在一些其他问题,如大坝混凝土中的碱活性集料问题、大坝混凝土因强度低而产生风化剥落问题,以及某些混凝土大坝局部坝顶异常升高问题等。

在调查的 40 余座钢筋混凝土水闸和混凝土坝溢洪道工程中,混凝土耐久性及老化病害问题比大坝工程更为突出。在 40 余座钢筋混凝土闸坝工程中,混凝土的裂缝仍然是主要的病害,发生裂缝的部位主要是闸底板、闸墩、胸墙及各种大梁,存在此类病害的工程,占所调查的中小型工程的 64.3%;混凝土的碳化和氯离子侵蚀造成内部钢筋锈蚀,甚至引起结构物破坏的事例,在中小型工程中较为普遍,占 47.5%;冻融破坏在中小型水利工程中分布的区域较为广泛,不仅在东北、西北、华北地区存在,在华东地区也存在,例如山东、安徽乃至江苏都有发生;其他病害,如冲磨气蚀、渗漏、水质侵蚀等也都存在,分别占 24%、

28.3%和4.3%。

通过调查可以看出,我国已建的水利水电混凝土工程中,无论大型工程或中小型工程,耐久性不良的情况都较为普遍,有的工程病害还较严重,有可能危及大坝安全和正常运行。

为此,必须充分重视水工建筑物混凝土的耐久性问题,并尽快采取有效的修复措施,保证已建工程的安全运行和延长使用寿命,进一步发挥这些工程的经济效益和社会效益。同时,要大力宣传和重视水工建筑物混凝土耐久性的研究工作,采取措施提高在建和新建工程混凝土的耐久性,使水利水电工程发挥其应有的巨大效益。

## 第二节 水工混凝土建筑物典型病害及其成因

### 一、裂缝

由于各种因素而引起的混凝土开裂破坏,统称为混凝土的裂缝。裂缝对水工混凝土建筑物的危害程度不一,严重的裂缝不仅危害建筑物的整体性和稳定性,而且会产生大量的漏水、射水,甚至危及建筑物安全运行。而且,裂缝往往会导致其他病害的发生和发展,如渗漏溶蚀、环境水的侵蚀、冻融破坏的扩展及混凝土碳化和钢筋锈蚀等,这些病害与裂缝形成恶性循环,对水工混凝土建筑物的耐久性产生较大的危害。我国不少的水工建筑物就由于存在着严重的裂缝而成为险坝险闸,使水利设施的经济效益和社会效益受到很大的影响,不得不花费大量人力、物力进行加固修复。

在调查的70多座水利工程中,无论是大坝还是水闸、厂房或渡槽,都不同程度地存在着裂缝问题,而且有些工程裂缝还比较严重,已经成为水电站安全生产和水工建筑物安全运行的潜在威胁,应该引起充分重视并尽早采取有关解决措施。

#### (一)典型工程实例

##### 1. 丹江口水电站

丹江口水电站大坝在施工期间就发现裂缝3332条。运行后,经两次抽查,共发现裂缝1152条,其中90%以上是大坝运行后新出现的裂缝。其中,危害性较大的渗水漏浆裂缝和贯穿坝体裂缝就有171条,占总数的14.8%。在丹江口大坝裂缝中,性质比较严重、对安全运行可能带来影响的部位有:

(1)右延坝段。由于设计和施工上的原因,该坝段混凝土本身质量就比较差,裂缝很多,加上坝体内排水管堵塞,裂缝渗漏比较普遍,渗水漏浆缝占全坝危害

性裂缝总数的 42.1%。基础廊道内有贯穿裂缝,坝体底部横缝漏水,高程 143~145 m 处还有水平渗水缝,问题较为严重。

(2)1~18 号坝段。该坝段在施工期间就出现了较多的危害性裂缝,虽经处理但仍在发展。2 号坝段高程 123 m 和 3 号坝段高程 110 m 以下,上游防渗板顶部已与坝体脱开。各层廊道内均有裂缝,尤其是高程 131 m 廊道一年四季滴水,廊道下游面也出现渗水缝。

(3)33~35 号坝段。该坝段为大坝左部的拐弯坝段,渗水漏浆、贯穿坝块的裂缝就有 7 条。其中,35 号坝段各层廊道中均有裂缝,且高程 124 m 廊道壁出现了规则的向右倾斜裂缝,并且已经渗水。鉴于该坝段是拐弯坝段,又位于高差很大的岸坡,受力复杂,对这些裂缝要密切注意。

(4)溢流坝段的闸墩。施工期间该部位就出现了贯穿性裂缝,运行期间由于闸门多次启闭,闸墩裂缝又有发展,在高水位和强地震的情况下,可能产生破坏,值得重视。

丹江口水电站除了坝体中裂缝多以外,在发电厂房等钢筋混凝土结构中,裂缝问题也非常突出。如主厂房顶部沥青止水老化脱开,出现裂缝而且混凝土本身也存在很多不规则的裂缝;主厂房内部吊顶混凝土跨中存在许多宽 0.3~0.6 mm 的裂缝;主厂房内发电机周围混凝土地面存在环向和径向裂缝;发电机层牛腿混凝土全部产生剪切裂缝;坝顶公路桥钢筋混凝土也出现垂直裂缝。

## 2. 蓼窝水库

蓼窝水库大坝施工期间出现裂缝 350 条,运行后到 2008 年进行详查,查出裂缝 641 条。其中,危害性较大、可能对结构物安全运行构成威胁的裂缝有 104 条,主要分布在以下部位:

(1)4 号坝段。该坝段北侧有 2 条贯穿性裂缝,裂缝从基础一直延伸到溢流面,长达 27 m,水平方向也裂穿整个坝块。

(2)底孔。1973 年前,底孔侧壁虽有些裂缝,但均未成环状。1973 年检查时,则发现除 14、16 号两个底孔外,其余 4 个底孔都在距坝轴线+25 m 左右处产生一条宽 0.1 mm 的环状裂缝。1981 年检查时,位于 8 号坝段的 2 号底孔顶部又增加了一条贯穿性裂缝,10 号坝段的 3 号底孔处原有的裂缝也发展成环状裂缝,1 号、2 号底孔+24.85 m 处也出现环状裂缝,在底板及接近底板的侧墙处裂缝较宽,为 2~3 mm。

(3)廊道。7 号坝段廊道顶拱裂缝宽度逐年增加,由 0.5 mm 增加到 3 mm,缝深从 1974 年的 10~11 m 发展到 2008 年的 14.27 m,基本裂穿坝块。23 号坝段横向廊道在+18.4 m 和+28.2 m 处有两条纵向裂缝较为严重,钻孔压风检查发现,深度已达 17.65 m,距下游面仅 2.35 m,即将裂穿而影响坝体的整体性和抗滑稳定性。

除此以外,大坝上下游面共有 8 条垂直裂缝,11 个闸墩均在扇形钢筋末端产生裂缝。茭窝水库大坝裂缝问题较为严重,受到了各方面的关注。

### 3. 黄龙滩水电站

黄龙滩水电站是 20 世纪 70 年代兴建的“三边”工程,施工中就出现了 203 条危害性裂缝,致使坝型由原设计的大头坝改为混凝土重力坝,并在上游面修筑了防渗板。

在大坝运行过程中,由于修补材料的粘结变形及抗老化性能较差,许多处理后的裂缝又重新张开,继续发展。而且,大坝上游面许多坝段均出现了新的裂缝。1981 年检查时(上游水位 220 m),大坝上游面裂缝情况如下:

5 号坝段上游面水上 3 m 处,有一条垂直裂缝并延伸至水下,裂缝性状尚未测定。

6 号坝段升船机牛腿右侧水面附近,有一垂直裂缝并延伸至水下,深度未知,但裂缝处已经漏浆。

7 号坝段闸墩上部,有一条水平裂缝并已冒浆。

8~13 号坝段是溢流坝段,在这些坝段的上游面,自堰顶开始均出现垂直向下的裂缝。8 号坝段跨中 1 条,长约 3 m;9 号坝段跨中附近 2 条,一条长 3 m,另一条水上长 6.65 m 并延伸至水下;10 号坝段跨中一条,水上长 6.15 m 并延伸至水下;11 号坝段跨中附近 2 条,一条长 1 m,另一条水上长约 7 m 并延伸至水下;12 号坝段跨中一条,水上长 6.1 m 并延伸至水下;13 号坝段跨中一条,水上长大于 7 m,并延伸至水下。以上裂缝目测宽度为 1~1.5 mm,深度、长度未测定。另外,溢流坝段堰顶以上胸墙处,在施工期曾发生了 27 条裂缝,当时采用环氧贴橡皮处理。在这次检查中发现,橡皮大部分从粘结面脱开,甚至裂缝已裂穿橡皮,说明环氧贴橡皮仅经 10 年已经老化。

13 号坝段上游左侧逐年抬高,与相邻的 14 号坝段产生了相互挤压,从而在坝顶形成了挤压扭曲裂缝共 17 条。产生这一现象的原因可能是 13 号坝段基础质量差,产生不均匀沉降。

大坝廊道、挑流鼻坎等部位的裂缝也较多,有些已经贯穿。这些裂缝曾采用灌浆处理,但效果不好,几年后重新张开,渗水或冒浆。

黄龙滩水电站除大坝裂缝问题较严重外,在电厂钢筋混凝土结构中也存在着裂缝问题,如主变压器室的牛腿均产生了 450 条左右的剪切裂缝,有的牛腿端部混凝土已经脱落,露出钢筋。牛腿开裂,使架在牛腿上的主变压器室的大梁产生过大的挠曲变形,而在中部产生裂缝,最多一根梁有 6 条裂缝,从而危及主变压器的安全生产,工厂只得在大梁中部用钢管做支撑,但这种单杆支撑稳定性很差,必须采取可靠的加固措施。

由以上可以看出,黄龙滩水电站大坝和电厂的裂缝问题是较为严重的,有的

已经成为电站安全运行和安全生产的潜在威胁,应该引起足够的重视。

#### 4. 柘溪水电站

柘溪水电站大坝分溢流坝段和非溢流坝段两部分。溢流坝段为单支墩大头坝,非溢流坝段为宽缝重力坝。大坝分四个阶段施工,施工中水泥强度低、品种杂(20种),又采用了埋块石、掺烧黏土,最大水灰比达0.90,冬期施工未采取适当措施,这些因素致使混凝土质量差,在坝面、廊道空腔等处产生许多裂缝。由1962年柘溪水电站质量检查报告的统计资料可知,在大坝61万 $\text{m}^3$ 混凝土中,发现裂缝426条,其中贯穿裂缝4条、深层裂缝11条。有的裂缝出现在大头部位,不但渗水漏浆,而且形成射流,问题十分严重。如1965年8月,观测人员在1号堰114.5 m高程廊道检查,发现廊道上下两侧有一条裂缝喷出幕状射水,裂缝的最大宽度为2.5 mm,漏水量最大为48 L/s,外观判断该缝已将支堰劈成两半。

这些裂缝出现后,施工或运行管理单位采用了“前堵、后排、适当加固”的方法,使用了耐酸水泥砂浆、环氧砂浆等材料进行修补。但在运行过程中检查发现,有的环氧砂浆脱空,有的裂缝继续向外发展,并多次出现大坝劈头裂缝渗水、射水的险情。如大坝1号支墩、2号支墩先后于1969年6月30日和1977年5月16日发生劈头裂缝漏水,2号支墩1983年2月11日又发生一次险情,劈头裂缝漏水量由1.9 L/s猛增到13日的11.2 L/s。为了确保大坝的安全,根据当时水电部和华中网局检查组的意见,电厂除重新对已发现漏水的裂缝进行处理外,并于1982—1984年对空腔内高程130 m以下大头后支墩间,用混凝土回填,以增加支墩的稳定性。除此以外,在坝腔内用预应力钢丝束进行锚固,还进行了接缝灌浆等措施。修复费用达3 025.18万元。

#### 5. 陈村水电站

陈村水电站于1958年8月开工,因质量等问题,1962年缓建,1968年复工续建,直到1978年竣工,前后经历20年。大坝在施工期就出现了裂缝,从调查来看,最严重的是下游面105 m高程处的水平裂缝,表面最大宽度15 mm以上。据南京水利水电科学研究院用超声波检测的结果,裂缝向坝体内延伸5 m左右,几乎裂穿大坝主要坝块。

另一条从坝顶向下的纵向裂缝,该缝的深度尚待检查。如果从坝顶向下的纵向裂缝发展到105 m高程,则可能与105 m高程处的水平裂缝相贯通,或者105 m高程处的水平缝继续向上游发展而与上游坝面贯通,均可能将坝体切割分块,破坏大坝的整体性和稳定性,给大坝的正常运行带来危害。

调查中还发现廊道中裂缝也较多,大小缝有220多条,廊道内非常潮湿。陈村水电站对已发现的裂缝也进行过处理,如对105 m高程的水平缝,在14~20号坝段曾用风钻钻孔插锚筋及灌浆进行处理,在21号坝段处曾用环氧砂浆进

行处理等。但据日后检查,修复效果均不太理想,而且原有裂缝均有发展。

## 6. 桓仁水电站

桓仁水电站在施工期间就出现许多裂缝,1961—1967年先后做了五次检查,大小裂缝有2000多条,其中仅大头部位的裂缝就有699条。垂直裂缝53条,其中长度穿过两个浇筑块、在10 m以上的有14条,长20~40 m、缝宽大于0.5 mm的有24条。

大头表面的裂缝,尤其是垂直的劈头缝,对大坝的整体性、抗渗挡水能力均会带来较大的危害,因此在施工中就做了加固处理。从大坝基础至288.5 m高程范围内,在上游面做了沥青无胎油毡防渗层,外浇60 cm厚的混凝土防渗板;对1965年以后浇筑的混凝土,出现裂缝的部位均用环氧贴橡皮方法处理,又在大头背后采用了辅助加固措施。以上的处理取得了较好的效果,但裂缝仍有漏水的情况,需进一步处理。

## 7. 荆江分洪枢纽工程

荆江分洪枢纽工程是中华人民共和国成立初期修建的一座规模较大的长江分洪控制水利工程,主要建筑物有分洪进口北闸和出口节制南闸。北闸是一座长1 054 m、共54孔的钢筋混凝土结构,北闸底板自上游至下游依次分为防渗板、阻滑板、闸室底板、护坡底板、消力坡底板和消力池底板。目前除防渗板以外,其他部位底板裂缝问题较为严重,情况如下:

(1) 闸前54孔阻滑底板全部裂穿,裂缝处钢筋锈蚀严重,使阻滑底板已失去防渗和拖阻作用。

(2) 阻滑板尺寸为 $15\text{ m}\times 19.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ ,混凝土 $R_{28}=140\text{ kg/cm}^2$ ,建成后不久就出现裂缝,以后裂缝不断发展。一般在阻滑板长、宽方向的中间各出现一条贯穿性裂缝,将板分成4块,有的在尺寸较大的一边中间出现两条裂缝,将板分成6块。1979年抽样检查表明:裂缝已将底板裂穿;裂缝处 $\phi 12\text{ mm}$ 的主筋锈蚀 $1/3$ , $\phi 6\text{ mm}$ 的副筋已经锈断;混凝土质量表面尚可,但下部蜂窝多、质量差。这次检查发现阻滑板裂缝总长度为4 350.4 m,其中贯穿缝长度为2 042 m。

(3) 闸室底板普遍有裂缝。闸室底板是保证闸身稳定的关键部位,其尺寸为 $10\text{ m}\times 19.5\text{ m}\times 1\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚),混凝土 $R_{28}=140\text{ kg/cm}^2$ 。建闸初期检查发现裂缝,1960年发展较快,目前54孔闸室底板均有裂缝。1979年用超声波检测表明,缝宽为0.4~1.3 mm,40%的缝深超过40 cm,其余在20 cm左右,并且裂缝深度在逐年发展。如果底板裂穿,将严重影响闸室的稳定。

(4) 北闸54孔护坡底板、消力坡底板及闸身两侧上下游边墙都存在裂缝,缝深一般为3~40 cm。

以上裂缝还有一定的规律性,闸东半部比西半部裂缝多723条,这可能与闸东西两半部沉降量不均匀有关。同时,非加固孔的裂缝又比加固孔裂缝多495

条, 主要因为加固孔跨度小, 且结构刚度和强度均高于非加固孔。

荆江分洪枢纽工程北闸底板严重裂缝的原因较复杂, 据闸管处初步分析, 主要有以下几方面: ①结构设计欠妥, 如底板尺寸过大、自然温差变幅较大 ( $>50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); ②施工质量不均匀, 表层混凝土质量好, 但表层 10 cm 以下的混凝土质量差; ③运行条件改变, 管理跟不上, 如阻滑板长期暴露未能及时保养, 在过大的温差变幅下普遍形成裂缝。

为了保证该闸的安全运行, 荆江闸管处曾对阻滑板的裂缝进行了几次修补: ①1965 年, 曾用沥青玛蹄脂对阻滑板的裂缝进行了凿槽修补, 槽深 8 cm、宽 8 cm, 然后灌沥青玛蹄脂。但仅使用 2 年, 材料就完全老化, 与混凝土脱开, 失去修补效果。②1979 年, 又用环氧材料对阻滑板裂缝进行修补, 先在缝中抹环氧腻子封堵, 外层再用环氧基液涂刷。这种修补方式由于环氧材料脆性大, 不能适应温度变化, 修补后 1~2 天就重新开裂。后改用聚酰胺做固化剂, 但仍然开裂。③1980 年、1981 年, 又采用弹性聚氨酯对阻滑板进行修补, 修补费用为 7 万多元。开始时效果尚可, 但一年后问题逐渐暴露, 该材料老化迅速, 外观由淡黄色变成深黄色或黄褐色, 收缩大, 聚氨酯本身多处断裂, 裂缝宽度有的为 20 mm 以上, 而且聚氨酯与混凝土粘结很差, 逐年脱开。由以上结果可以看出, 阻滑板裂缝问题虽经多年各种方法修补, 但仍未能解决问题。

鉴于北闸以上裂缝情况, 尤其是闸前 54 孔阻滑板全部裂穿, 失去了原有的防渗和拖阻作用, 对闸身在运行时的稳定可能产生较大的威胁。同时, 闸底板也普遍出现裂缝, 并有近一半的裂缝深度超过 40 cm。如果北闸要挡水运行, 则以上两种不利因素将联合作用, 可能使闸身失稳而冲垮。荆江分洪闸对确保荆江大堤、江汉平原众多人民群众和 110 万亩农田, 以及工农业生产的安全防汛起着重要的作用, 因此必须给予充分的重视。该工程经水利部决定, 已加固重建。

## 8. 杜家台汉江分洪闸

杜家台汉江分洪闸位于湖北省沔阳县境内, 是一座 30 孔的钢筋混凝土结构。该闸的裂缝问题也较为严重。主要分布如下:

(1) 闸墩的裂缝。30 孔的闸墩均存在部位基本相同的裂缝, 大致可分为以下三类:

① 闸墩靠公路桥处的裂缝。此类裂缝从闸墩顶面裂到两个侧面并向下延伸, 延伸长度为 2~3 m, 有的(如 28、29 号孔闸墩侧面的裂缝)已由顶面延伸到底板附近。这种裂缝在闸墩顶面的平均宽度约 1.3 mm, 在两侧的平均宽度约 0.5 mm 且位置对称, 很可能已将闸墩裂穿。

② 闸墩牛腿处顶面的裂缝。每个闸墩牛腿均在顶面出现 3~5 条裂缝, 裂缝宽度在 0.5 mm 以上。有的缝口已经风化, 形成喇叭口形状, 这种缝也从牛腿顶面向两侧发展, 深度为 20~30 cm。

③闸墩牛腿处侧面的裂缝。在闸墩牛腿的侧面，闸门臂杆铰支点附近也发现有 450 条左右的倾斜裂缝，裂缝处已经冒浆。同时有的闸墩，如 21 号孔左墩牛腿的左侧面发现有垂直裂缝，裂缝从排水孔开始，向下延伸达 2 m 多长。

闸墩出现的这些裂缝，闸管所一直未做过详细检查和处理。产生这些裂缝的原因，据湖北省水利厅有关人员分析，可能与混凝土设计强度低(仅为  $140 \text{ kg/cm}^2$ )，施工中还未达到设计要求(仅为  $126 \text{ kg/cm}^2$ )，加之公路桥曾频繁通车，并有许多是超载运行(设计荷载 10 t，但有 24 t 卡车通过)有关。同时，该闸启闭次数较多，在闸门开启过程中，尤其是小开度(小于 0.3 m)运行时，闸门振动较大，从而引起牛腿和闸墩承受动荷载，而这点在设计中未加考虑，这也可能是闸墩产生裂缝的一个原因。

(2)闸室溢流面的裂缝。这次调查中发现 22、23、25、26、28、30 号孔闸室溢流面处均存在裂缝，这些裂缝大部分渗水冒浆，有的已从堰顶裂到溢流面底部。

(3)闸公路桥大梁和导水墙存在裂缝。

杜家台汉江分洪闸是座运行较频繁的分洪闸，对确保汉江下游的防汛安全起着重要的作用。经水利部研究决定，1986 年进行了大规模的修补加固。

## 9. 韶山灌区渡槽

韶山灌区建于 1965—1967 年，主要工程包括引水枢纽、总干渠、北干渠、南干渠等，灌溉面积 100 多万亩。调查中发现，该灌区 26 座渡槽及支架(均为混凝土结构)均存在裂缝问题，另外一些隧洞也出现混凝土开裂甚至发生塌顶的事故。据水利局估计，仅此两项修补费用就占整个工程兴建费用的 1/3。

除以上典型工程实例外，水工混凝土建筑物中裂缝问题较为突出的工程还有许多。如河南陆浑水库溢洪道闸墩和泄洪洞、新安江水电站大坝及开关站、古田溪一级水电站大坝、磨子潭水库大坝、梅山水库大坝、湖南镇水电站大坝溢流面和导水墙、富春江水电站和八盘峡水电站机组蜗壳混凝土裂缝等。

### (二)裂缝产生的原因

此次调查的工程较多，建筑物的类型、作用、所处的自然环境、施工条件、使用的原材料等因素也各不相同，而混凝土产生裂缝的原因又是多方面的，在此仅就主要原因分析如下：

#### 1. 温度应力过大

在水工混凝土建筑物的裂缝中，尤其是尺寸或体积较大的结构物中，裂缝的产生往往与温度应力过大有关。

(1)设计中未考虑温度应力。一些中小型水利工程中的闸墩、底板等部位，在设计过程中未考虑温度应力问题(包括施工期和运行期可能产生的温度应力)，没有采取必要的结构措施，也未对施工或管理单位提出温度控制措施，致使结构



物在施工期或运行过程中出现了裂缝。如河南陆浑水库溢洪道闸墩、北京永定河和小清河闸墩施工期就出现裂缝，荆江分洪北闸阻滑板在运行期由于保养不良而引起裂缝等。

(2)温控措施不严而产生裂缝。大部分大坝在混凝土施工中，设计上虽提出了温控指标，但施工中不能很好控制，如入仓温度过高、浇筑块表面保温不够、间歇时间过长、相邻浇筑块高差太大等均会使坝体混凝土产生裂缝。如葛洲水库大坝设计允许基础部位混凝土的最高温度不超过  $32^{\circ}\text{C}$ ，而实际施工时，基础混凝土最高温升达  $45^{\circ}\text{C}$ ，远远超过设计要求，从而使大坝产生较多的裂缝。再如，桓仁水电站地处高寒地带，冬期施工又遇寒潮，施工中保温养护措施跟不上，引起较大的温度应力，使坝体产生较多裂缝。

## 2. 混凝土强度低、均匀性差

混凝土强度低、均匀性差，是产生裂缝的内在原因。

由于设计或施工不良等原因，建筑物混凝土强度较低或均匀性差，则此种混凝土的抗裂性就较低，往往容易引起裂缝。如在柘溪水电站大坝施工中，质量控制不严，混凝土水灰比最大达 0.90，水泥强度低、品种杂，又不适当地压低水泥用量(最少仅  $97\text{ kg/m}^3$ )，并掺用活性很低的烧黏土，从而使混凝土强度较低，在大坝迎水面 126 m 高程以下，达到设计要求的仅 65.6%，这些成为柘溪大坝产生裂缝的内在原因。在桓仁水电站大坝施工中，混凝土质量均匀性差也是引起桓仁大坝产生较多裂缝的一个原因。

## 3. 基础问题

在一些水电站的大坝施工时，前期工作做得不够，有的甚至是边勘察、边设计、边施工，坝基勘察不明，施工中软弱破碎夹层未能很好处理。大坝浇筑以后，产生不均匀沉降，造成坝体裂缝。如陈村水电站、黄龙滩水电站等，均由于基础处理不妥而引起坝体出现严重裂缝。

## 4. 结构布置不妥而引起裂缝

调查中发现，八盘峡、富春江等几个水电站蜗壳混凝土往往产生较多的裂缝，这些裂缝的产生可能与结构设计有关。再如，凤滩水电站大坝 107 m 高程廊道，设计时将底板和顶拱、侧壁分开浇筑，底板以上一次浇筑，而底板又以顶拱中心线分作左右两块分别浇筑，由于底板混凝土的收缩，从而将上部顶拱拉裂。

## 5. 地震或其他原因引起混凝土结构的裂缝

新丰江水电站大坝，地震后在右岸 14~17 号墩 108.5 m 高程处，产生一条长 80 m 贯穿上下游的裂缝。裂缝产生的主要原因是地震应力，据分析，也与坝体在此处的断面形状产生突变有关。另外，河北省唐山地区一些钢筋混凝土闸，由于唐山大地震而产生许多裂缝。如润河防潮闸在 1976 年地震后，各孔胸墙均产生裂缝，缝宽最大 5 mm。又如丰南县(现丰南区)的西排干防潮闸，地震使上