

混凝土大坝保温保湿新技术

杜彬 胡昱 等著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TV-31
2B

混凝土大坝保温保湿新技术

杜彬 胡昱 李鹏辉 焦修刚 黄达海 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书阐述了混凝土保温保湿理论, 通过对大体积混凝土温湿耦合理论的实验研究, 提出了混凝土保温保湿的新方法、新材料和施工工艺, 并结合仿真计算和模型分析, 论证了聚氨酯保温保湿材料的性能特点, 通过工程实例, 完善和创新了混凝土保温保湿新技术。

本书可供水利水电工程设计、施工、科研人员及相关专业的大专院校师生参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

混凝土大坝保温保湿新技术 / 杜彬等著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2012. 2
ISBN 978-7-5084-9480-7

I. ①混… II. ①杜… III. ①水工材料—混凝土—研
究 IV. ①TV431

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第024073号

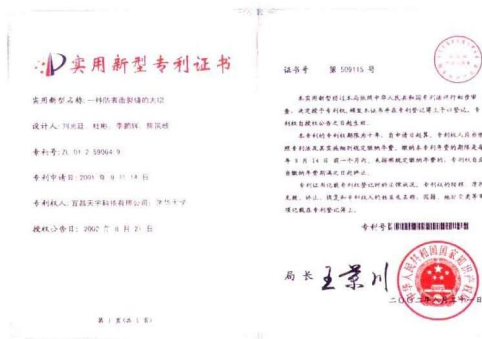
书 名	混凝土大坝保温保湿新技术
作 者	杜彬 胡昱 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、88615574 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	155mm×235mm 16开本 17.5印张 305千字 2插页
版 次	2012年2月第1版 2012年2月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	56.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

宜昌天宇科技有限公司

是一家以大坝保温、保湿、防裂和防渗为主，集水利水电咨询服务、新技术推广与应用、机械设备、五金交电和科技图书销售为一体的新型企业，拥有水利水电工程大坝保温保湿防裂的自主知识产权。



本公司开创性地将聚氨酯喷涂技术引入水利水电工程领域，自行研究的混凝土大坝保温保湿新技术，先后在全国多个水电工程中得到成功应用。



新疆石门子大坝



新疆冲乎尔大坝

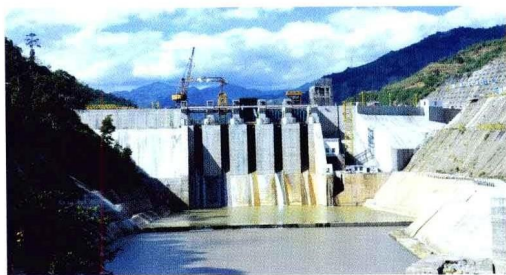


新疆山口大坝

公司对水泥基渗透结晶型防水材料加以研究改进，并推广应用于大坝工程，显著改善了混凝土的抗渗性能。



湖北省云龙河水电站



云南省居甫渡水电站

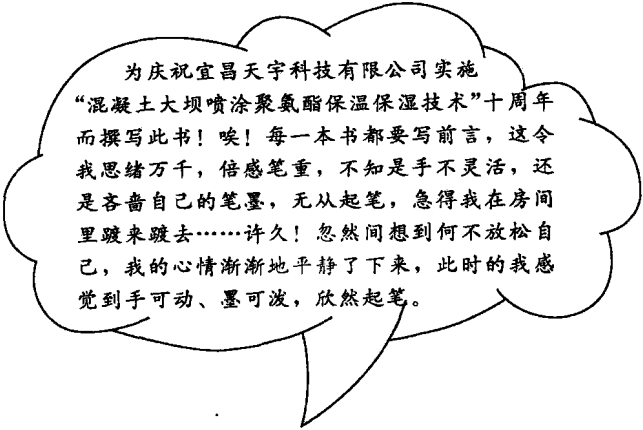
公司承担研究及参与建设的项目，分别荣获大禹水利科学技术奖“一等奖”、湖北省科学技术进步奖“特等奖”、国家科学技术进步奖“二等奖”等多项奖项。



公司奉行“科技为先，厚德为根，服务为本”的企业准则，坚持“以创新促发展，靠诚信拓市场，用管理赢效益”的经营理念。

网址：<http://www.tykjgs.com>

电话：（0717）6798205



为庆祝宜昌天宇科技有限公司实施
“混凝土大坝喷涂聚氨酯保温保湿技术”十周年
而撰写此书！唉！每一本书都要写前言，这令
我思绪万千，倍感笔重，不知是手不灵活，还
是吝惜自己的笔墨，无从起笔，急得我在房间
里踱来踱去……许久！忽然间想到何不放松自
己，我的心情渐渐地平静了下来，此时的我感
觉到手可动、墨可泼，欣然起笔。

前 言

作为水利人，混凝土坝是除水害、兴水利的亲密战友。随着我国水利水电事业的蓬勃发展，混凝土坝建设规模也空前发展，筑坝技术日新月异，但混凝土裂缝一直是萦绕在心头的一块阴影。大坝和人类一样是有生命的，可她更像原始人类，赤身裸体地承受着风霜雨雪，而我们还希望她毫发无损。突然间我想：能否像我们现代人一样，给大坝穿上衣裳，让她冬天不再经受寒风凛冽，夏天不再暴晒于炎炎烈日之下。如果说要给大坝穿衣服，我一定要她穿上“天衣”。“天衣”最适合她尊贵的“身段”，只有“天衣”才能冬暖夏凉，使其不再“伤痕累累”，使其不再“撕心裂肺”。穿上无缝“天衣”的她，体温不再忽高忽低，表面的水分不再快速蒸发流失，让她处于相对恒温、恒湿的环境中缓慢释放温度应力及干缩应力，让她健康地为人类服务。

我可能是一个“理想主义者”和“机会主义者”。

1999年，新疆石门子水库动工兴建，给大坝穿衣的想法得到了设计总工程师（清华大学水利工程系刘光廷教授）及业主的认可。为此，宜昌天宇科技有限公司开始在新疆石门子水库

首次为大坝喷涂聚氨酯，为大坝“穿衣”。2000年工程竣工后，经过两个冬季的工程观测，效果较好。2002年我在《水利水电科技进展》发表了《聚氨酯硬质泡沫在大坝工程中的应用研究》一文，摘要如下：为保持大坝表面相对恒温、恒湿，减少温度梯度变化及干缩裂缝，选用聚氨酯硬质泡沫作为大坝表面的保温材料，采用双组分涂料喷涂系统施工，取得了较好的效果。新疆石门子水库大坝的喷涂实践表明，拱坝表面喷涂聚氨酯硬质泡沫保温层后，对大坝的保温、隔热、保湿作用十分明显。同年，宜昌天宇科技有限公司和清华大学共同向国家知识产权局提出专利申请，并获得了名称为“一种防表面裂缝的大坝”、专利号为“ZL 01 2 59064.9”的实用新型专利，心中得意万分！直到有一天我看到《加强混凝土坝面保护 尽快结束“无坝不裂”的筑坝历史》一文，读后感慨万分。面对现实，大坝保温保湿的理论基础何在！

2005年，为模拟高寒、干燥环境下的拉西瓦水电站混凝土大坝的保温保湿措施，选择与拉西瓦水电站所处地理位置及自然气候条件相接近的李家峡水电站大坝，进行自然环境条件下的聚氨酯泡沫材料喷涂试验，考察在低温环境下喷涂不同色彩、不同厚度聚氨酯泡沫以及表面加喷水泥浆等不同喷涂方案下混凝土的保温保湿效果，并通过预埋在聚氨酯保温保湿层下的温度计和湿度计进行2个月冰冻期的原型观测和分析。试验结果表明，与常规保温材料相比较，喷涂聚氨酯泡沫材料施工工艺简单，产品性能稳定可靠，具有良好的经济性，在各种试验条件下，喷涂聚氨酯泡沫均能很好地满足混凝土保温保湿要求。

2007年，宜昌天宇科技有限公司在自然环境条件相近的工程施工中，根据几种常用保温保湿材料的特点进行现场保温保湿试验及对比分析，选定保温保湿材料；在此基础上再进行不同厚度保温保湿材料情况下的坝体温度、应力有限元分析计算。结果表明：当保温层厚度较小时，增加厚度可以使等效放热系数迅速减少，但当厚度大于一定值后，保温效果上升不明显，从而为工程选定合适的保温保湿方案提供了依据。

2008年，通过理论与实践研究，结合水工大体积混凝土的湿热传导特性研究，通过工程实践中的反复试验与研究，提出了水工混凝土表面喷涂聚氨酯泡沫保温保湿，有效防止早期裂缝的混凝土防裂设计新思路。研究表明：在大坝表面喷涂聚氨酯泡沫材料，不仅具有良好的保温保湿效果，而且能使喷涂的聚氨酯泡沫材料与大坝混凝土达到“无缝粘结”状态，取得永久保温保湿效果，有效地防止了大坝混凝土的裂缝。

2009年，通过现场试验和计算分析，为工程提出合理的保温保湿方案提供了依据，进而研究了喷涂聚氨酯的碾压混凝土坝的施工仿真，并和实测结果进行了对比。研究表明：在大坝表面喷涂聚氨酯泡沫材料具有良好的保温保湿效果，施工仿真分析和实测结果吻合良好。

从试验室的温湿耦合理论到混凝土保温保湿概念的提出，从保温保湿的材料分析选择到保温保湿工艺研究，从大坝表面保温保湿的实施到保温保湿施工仿真，它融入了十年的奋斗、艰辛、和情感。十年来，从工程实践到理论研究，再将理论拿到工程实践中提炼，形成了“混凝土大坝保温保湿新技术”。

总之，付出就有回报。我们承担研究及参与建设的项目都得到了专家和社会的认可，申请发明专利一项；荣获了“大禹水利科学技术一等奖”、“湖北省科学技术进步特等奖”、“国家科学技术进步二等奖”等殊荣。

在本书撰写过程中，得到了清华大学、宜昌天宇科技有限公司参加研究与实验人员的极大帮助，在此，谨向刘光廷教授对“混凝土大坝保温保湿新技术”的研究工作以及为本书提供资料的全体人员表示衷心的感谢！

本书为水利水电工程技术方面的成果专著，可供从事水利水电工程设计、施工、管理和研究的技术人员参考使用。因时间仓促，编著水平所限，不妥之处，敬请读者批评指正。

笔者：杜彬

2011年10月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 混凝土坝现状	1
1.2 大坝裂缝的成因分类及危害性	2
1.3 现今防裂的主要研究方向和常用预防措施	4
1.4 温湿耦合理论研究与试验	7
1.5 混凝土大坝保温保湿新技术	8
1.6 关键技术创新与推广.....	10
第 2 章 大体积混凝土温湿耦合研究	13
2.1 传导耦合机理与耦合特性实验研究.....	15
2.2 混凝土热湿耦合数字分析方法.....	26
2.3 混凝土热湿耦合实验研究.....	51
第 3 章 大坝保温方法及材料比选	80
3.1 大坝混凝土保温、保湿现状.....	80
3.2 保温材料的介绍.....	81
3.3 保温材料性能比较.....	85
3.4 施工方法的比较.....	92
3.5 施工技术与成本	100
第 4 章 聚氨酯保温保湿材料	102
4.1 聚氨酯保温材料介绍	102
4.2 彩色聚氨酯	108
4.3 聚氨酯硬质泡沫保温保湿材料的研究	111
4.4 聚氨酯保温材料优缺点	113
4.5 不同厚度聚氨酯保温保湿效果试验研究与分析	116
4.6 喷涂不同厚度聚氨酯加喷聚酯砂浆保温试验	121
4.7 试验效果分析及其结论	128

第 5 章 混凝土大坝保温保湿施工工艺	144
5.1 聚氨酯喷涂设备	144
5.2 大坝喷涂聚氨酯施工工艺	151
5.3 大坝聚氨酯灌注发泡施工工艺	161
5.4 大坝表面聚氨酯的修补与平整	164
5.5 大坝保温保湿层施工安全管理	167
5.6 大坝保温保湿层防火安全	168
5.7 大坝保温施工质量管理	170
第 6 章 聚氨酯保护下大坝有限元分析	175
6.1 热传导原理	175
6.2 有限元理论	177
6.3 计算分析程序	188
第 7 章 计算模型、参数及边界条件	199
7.1 山口水电站概况	199
7.2 设计基本资料	200
7.3 有限元模型	213
7.4 材料参数	214
7.5 边界条件	219
第 8 章 聚氨酯仿真计算	225
8.1 横缝间距的计算	225
8.2 仿真计算考虑的因素	227
8.3 寒潮情况下表面保温的计算	230
8.4 温度控制措施及其效果分析	234
8.5 温度控制标准	244
第 9 章 保温保湿新技术适用范围及工程实例	247
9.1 概述	247
9.2 保温保湿新技术适用范围	248
9.3 大坝保温保湿新技术使用原则	251
9.4 聚氨酯保温工程实例	251
9.5 聚氨酯砂浆防护层	263
9.6 结论	271
参考文献	272

第 1 章 概 述

在水利水电工程中，保温措施一直是大体积混凝土温度控制中非常重要的措施。课题组最早是着眼于混凝土坝在高寒、温差变化大的地区的保温措施研究，并应用聚氨酯泡沫在新疆石门子碾压混凝土拱坝中进行保温应用，结果发现效果非常好，然后对这种效果进行了分析，发现聚氨酯泡沫不仅具有保温效果还具有很好的保湿效果。课题组通过初步分析后，认为保湿对控制混凝土表面裂缝的形成也是一个很重要的影响因素，为此开展了保湿对混凝土表面裂缝影响的研究，进行了混凝土“等温传湿试验”与“等湿传热试验”等一系列研究。通过分析认为湿度和温度对控制混凝土表面裂缝的形成都是很重要的影响因素，而且两者是同时存在，相互影响的。为此，课题组依托水布垭面板堆石坝工程进行了面板混凝土的温湿耦合研究，最终建立了简化的温湿耦合方程，以及相应的数值计算方法和试验测定手段，解决了温湿耦合理论在实践中进行应用的关键问题。

根据理论分析得出了混凝土温湿耦合的特点以及大体积水工混凝土对温度和湿度控制的要求，创造性地提出在大坝表面喷涂聚氨酯硬质泡沫进行保温保湿的工程措施，以降低混凝土坝体内外的温度梯度和湿度梯度，从而达到降低和防止混凝土坝产生表面裂缝的目的。

根据理论研究结果和实践效果，不断改进了聚氨酯的性能，并研究了一套相应的施工工艺，从而使聚氨酯在控制混凝土表面裂缝方面作用明显，提高混凝土的承载能力与抗侵蚀、抗老化能力。

1.1 混凝土坝现状

混凝土大坝体积庞大，需要采取措施，解决混凝土硬化过程中因水泥水化的发热导致块体内温度变化而带来的应变与应力，减少坝体危害性裂缝。但是，坝体开裂在实际工程是一个较为普遍的现象。在国内外坝工史上，受裂缝损害的混凝土大坝比比皆是，在众多影响混凝土坝安全的因素中，大坝混凝土裂缝受到了坝工界的普遍关注。

早在 20 世纪 30 年代以前，美国建造的奥瓦希大坝就出现了不少裂缝，逐渐引起工程界的重视。日本大森川大头坝（1958～1961 年），1958



年8月在4个坝段上游发生了垂直裂缝,苏联马康宽缝重力坝(1956~1961年)的这类裂缝更为严重,有3个坝段裂缝向内扩展。我国的桓仁大头坝、侵莒重力坝也发生过这类裂缝,最严重的是柘溪大头坝(1958~1962年),该坝1号、2号支墩裂缝都较严重,在大坝投入运行7年后,检测结果显示1号支墩已裂至基础,裂缝切入坝体范围达 2000m^2 ,相当于横断面的45%。

美国垦务局在修建胡佛坝时提出的柱状分块、水管冷却、接缝灌浆形成整体的水工大体积混凝土施工温控工艺,曾一度成为世界各国效仿的样板,但仍无法解决大坝混凝土产生裂缝的问题。自20世纪70年代以来,实体坝上游面发生这类裂缝的例子也不少。美国利贝坝(1966~1971年)坝高127m,有7个坝段上游面产生裂缝,并导致基础廊道漏水。美国的Norfolk重力坝在每个泄洪底孔的侧面至少有4条纵向裂缝,而Dworshak坝(1968~1972年)裂缝更为严重,该坝坝高218m,通仓浇筑,采用了人工预冷等较严格的温控措施,9个坝段均发现有此类裂缝,其中23号坝段裂缝不仅扩展到基岩,而且向坝内深入75m,另外在Richard B. Russel坝的3个坝段也发现了这种裂缝。加拿大的Revelstoke重力坝在上游面产生了严重的劈头裂缝。苏联布拉茨克水电站、克拉斯诺亚尔斯克水电站(1972年)也出现了不少裂缝。法国的Sautet拱坝,右岸上游面裂缝长17m,下游面裂缝长12m,卡斯梯翁拱坝在下游面也出现了裂缝。另外,我国的龙羊峡重力拱坝、紧水滩双曲拱坝、东江双曲拱坝、白山重力拱坝、乌江渡拱形重力坝、刘家峡实体重力坝、潘家口低宽缝重力坝、新安江宽缝重力坝、丹江口宽缝重力坝、柘溪单支墩大头坝、葛洲坝重力坝、枫树空腹宽缝重力坝、大黑汀宽缝重力坝等混凝土坝也都不同程度地产生了裂缝。

尽管从20世纪30年代开始,水利工程师已开始重视如何防止混凝土坝裂缝的问题,并做了大量工作,也取得了不少成就,但到目前为止,国内外的混凝土坝几乎都出现了一些裂缝,虽然裂缝数量和危害程度有所不同,但“无坝不裂”已成为不争的事实。

1.2 大坝裂缝的成因分类及危害性

1.2.1 大坝产生裂缝的主要原因

随着人们对混凝土裂缝问题认识的不断加深,目前学术界普遍认为混凝土产生裂缝是多种因素共同作用的结果,除了温度变化会导致混凝土产生裂缝之外,混凝土自身体积收缩、失水干燥收缩及与混凝土体积变形相关的其他收缩变形均会导致混凝土产生裂缝,而其中温度变化起主导

作用。

水工大坝混凝土所产生的早期收缩裂缝中，绝大多数是表面裂缝，其中一部分会发展成深层裂缝或贯穿性裂缝，引起大坝产生表面裂缝的原因主要是由于混凝土存在温度差与湿度差。混凝土的温度差，即温度梯度，使混凝土表面部位产生温度应力；混凝土的湿度差，即湿度梯度，会使混凝土表面产生湿差应力或称为干缩应力。研究表明，混凝土的温度变形和干缩变形是造成混凝土表面裂缝乃至深层裂缝的主要因素。

1.2.2 大坝裂缝的分类及危害性

1. 基础贯穿裂缝

基础贯穿裂缝位于坝块基础部位，裂缝宽度大，其深度穿过一个甚至几个浇筑层。这类裂缝一般发生于坝块后期的整体降温过程中，或是由长间歇的基础约束区混凝土受到气温骤降及内部降温的联合作用引起的。缝宽表现为上大下小，这是由于基础约束区限制了坝块底部变形的缘故。

基础贯穿裂缝危害性较大，影响坝体的整体性与安全，防止基础贯穿裂缝是大体积混凝土温控设计的主要指标。坝体一旦发生这类裂缝，必须查清原因，认真处理，清除影响并防止继续向上发展。

2. 深层裂缝

深层裂缝限于坝块表层，但其深度及长度较大，贯穿了整个仓面及浇筑层，由于其位于块体表面，又是从表面裂起的，也可称为表面深层裂缝。这类裂缝发生于大坝施工过程中，多为长间歇浇筑层顶面不断受气温骤降的联合作用引起的；另外，如果浇筑层底部不平整成台阶状，也会引发这种裂缝。这类裂缝比较常见，需根据发生的部位、裂缝危害性以及坝块内温度状态及边界条件，做妥善处理，以防止继续发展为基础贯穿裂缝。

3. 表面裂缝

表面裂缝是大体积混凝土最常见的裂缝，分为竖向或水平向，即位于浇筑层顶面或水平施工缝上，其长度与深度一般较小，未贯穿整个仓面和浇筑层。它主要发生在大坝施工过程中，多为层面间歇受气温骤降作用引起的，以混凝土龄期6~20d期间最容易出现。

表面裂缝的危害性一般较小，但其程度也视发生的部位以及坝体内温度状况而定。如果位于基础约束区及上游面等敏感部位，且块体内温度较高，须作适当处理，以防止它继续发展和恶化，而成为基础贯穿裂缝或深层裂缝。



4. 网状裂缝

网状裂缝一般发生在混凝土块体的暴露面，裂缝的形态与分布很不规则，且深度极浅，一般小于 10cm，主要是由于混凝土浇筑后养护不当造成的，尤其是高标号混凝土的表面在早期更容易出现这类裂缝。

网状裂缝主要由块体表面混凝土干缩引起的，因此混凝土浇筑后，必须及时洒水进行保湿养护，特别是高标号混凝土。虽然网状裂缝本身危害性不大，但混凝土干缩会与坝块降温收缩相叠加，共同作用产生危害较大的裂缝。

5. 劈头缝

劈头缝是发生在坝体上游的竖向裂缝；它虽然从性质上不能单独列一类，但由于其发生的位置特殊，发展后带来的危害程度相当大，因此予以特别强调。

强调并单独提出劈头缝，一方面是由于这种裂缝发展的可能性很大且后果严重；同时也表明把裂缝按其发生的性质来分类是不全面的。事实上裂缝的性质是可以转化而不是固定不变的，表面裂缝可以在一定条件下发展为深层或基础贯穿裂缝。因此，当对裂缝进行处理时，除根据当时裂缝情况大致分为哪一性质的裂缝外，还需要考虑块体内温度是否已经下降到足够程度，距稳定温度还有多少差距，以及块体的约束条件、暴露条件和整体性等要求，也就是说，既要根据当时裂缝性质，又要考虑今后发展的可能和危害性，作出妥善处理。

1.3 现今防裂的主要研究方向和常用预防措施

1.3.1 现今防裂的主要研究方向

目前，国内外在大体积混凝土结构温度场、温度应力及温度控制系统方面的研究较多，我国在水工混凝土温度场与徐变应力场仿真分析技术上，已经处于世界先进水平甚至领先水平。随着人们对混凝土材料特性、温控防裂措施认识的进一步加深，以及现代坝体施工技术、施工设备与施工工艺等多方面的技术进步，对水工混凝土温控防裂问题也有了更进一步的认识，为在水工混凝土工程中解决防裂问题提供了新的思路。

相比温度场和温度应力的研究而言，有关混凝土湿度场及其干缩应力，人们了解相对较少。由于混凝土的湿度参数及湿度边界条件往往不易确定，而湿度参数的准确与否往往是决定干缩变形及干缩应力计算结果准确与否的关键。因此，从研究混凝土的湿度场出发，探求混凝土内部湿度

场的变化规律及湿度变形与相对湿度的关系,是合理分析混凝土干缩及干缩开裂机理的重要内容。

国外对湿度场与干缩应力的研究起步较早,早期研究主要涉及高温混凝土的湿度扩散及其扩散模型等方面的问题。其中 Bazant (1976)、Becker and Bresler (1977)、Bremer (1977)、Cheung and Baker (1976)、Dougill (1972)、Fischer (1970)、Hannarthv (1970, 1971)、Hundt (1977)、Mcdonald (1975)、Neville (1973)、Pihlajavaara and Tivsanen (1970) 等人从理论、试验和计算方法等方面开展研究工作,基本形成了湿度扩散和干缩应力计算理论框架。另外,对湿度扩散理论作出贡献的学者还有 Herdenblad 和 Y. Xi 等。

对混凝土温湿耦合机理的研究是近年来一个研究热点,国外在这方面进行了较多研究,Bazant 在试验结果的基础上,对高温状态下混凝土温湿耦合效果进行了研究,给出了温湿耦合的一维高阶非线性有限元解法;比奥—考斯(Biot-Coussy)较为系统提出了的热—湿—力耦合作用的相关理论;Meschke 和 Grasberger 基于比奥—考斯理论考虑混凝土材料为非饱和多孔介质,研究水泥基材料在湿—热—力耦合作用下的干缩开裂问题,在塑性有效应力架构空间上,应用多相弹塑性损伤模型来描述混凝土材料失效前后的力学性能,建立了热—湿—力耦合的有限元数值仿真模型。K. van Breugela 和 E. Koendersb 则研究了混凝土内部相对湿度的大小对水泥水化作用的影响。

我国最早开始混凝土温湿耦合传导方面研究工作的是清华大学王补宣院士领导的工程热物理课题组,但其研究工作侧重于建筑工程中的多孔混凝土、轻质混凝土等材料,这类材料的含水率一般较高且变化幅度也很大,其主要研究成果主要表现在“等效导热系数”与“等效导湿系数”的预测与测定上。以往的研究表明,在水工大体积混凝土的干缩扩散速率仅相当于温度扩散速率的 $1/1000$ 左右,因此,以往对水工大体积混凝土的传导热湿研究重点集中在混凝土的传热即温度场的研究方面,对其导湿研究得很少。近年来,水工大体积混凝土结构中出现的表面裂缝越来越多,并且在一些不利因素的诱导下,这些表面裂缝常常会进一步扩展并导致形成深层裂缝或贯穿性裂缝。对于薄壁结构,由于干缩变形的影响深度相对较大,其表面裂缝带来的危害性就更显突出,大体积混凝土表面裂缝的形成机理引起了越来越多学者的重视与关注。

本课题组人员在国内率先开展了对水工大体积混凝土的温湿传导特性的研究,为避免求解复杂的温湿耦合方程组,而将温湿耦合中水对热的影



响或热对水的影响以等效的模式予以表达,并分别完成了“等温传湿试验”与“等湿传热试验”的设计与实施。研究成果表明,混凝土温湿耦合机制是研究混凝土表面裂缝机制的重要基础,并且温湿线性耦合理论得到的温度与湿度的变化趋势均相对平缓,达到平衡的时间也比较长,对于混凝土表面开裂问题,应以温湿非线性耦合理论为基础开展研究工作,水工大体积混凝土表面保温保湿是防止其表面产生裂缝的重要手段。

总体而言,国内对水工大体积混凝土温湿耦合机理及其应用的研究才刚刚起步,温湿耦合是水工大体积混凝土产生表面裂缝的重要基础,为了更好地探索水工大体积混凝土表面开裂的深层次机理,在这方面的研究还有待进一步深入开展。

1.3.2 避免和减缓混凝土坝裂缝的常用预防措施

1. 防止混凝土裂缝的结构措施

实践经验表明,现有的混凝土结构裂缝,绝大多数与温度应力有关,结构型式选择恰当,能有效地减少温度应力,从而减少裂缝。混凝土浇筑中合理的分层分块对防止混凝土温度裂缝也具有重要作用,配筋也可以限制裂缝的开展;例如,对预计要长期暴露的混凝土层面或过水度汛的混凝土表面,在其上配置适当数量的钢筋网,可防止贯穿性或深层裂缝的产生。

2. 防止混凝土裂缝的材料措施

在混凝土配合比设计和混凝土施工中,应保证混凝土具备设计所必需的极限拉伸值或抗拉强度值、施工匀质性指标和强度保证率,有条件时,宜优先选用热膨胀系数较低的砂石料,提高混凝土的抗裂能力。控制混凝土水化热,通过采用发热量低的中热硅酸盐和低热矿渣硅酸盐水泥,选择较优骨料级配和掺粉煤灰、外加剂,以减少水泥用量和延缓水化热散发速率等措施,以控制混凝土的水化热。控制混凝土自身体积变形,采用微膨胀混凝土能补偿部分混凝土温降引起的收缩变形,与此相反,混凝土自身体积变形为收缩者将增大混凝土出现裂缝的可能性。因此,可采取措施控制混凝土自身体积变形使其具有一定的膨胀性。

3. 防止混凝土裂缝的施工措施

合理安排混凝土施工程序和施工进度是防止基础贯穿裂缝,减少表面裂缝的主要措施。控制坝体最高温度,采取必要温控措施,使坝块实际出现的最高温度不超过坝体设计允许最高温度,控制坝体实际最高温度的有效措施是降低混凝土浇筑温度,控制混凝土水化热温升。

4. 防止混凝土裂缝的综合管理措施

温控防裂工作是一项复杂的系统工程,除了从配合比设计、拌和、浇筑、冷却通水、养护、外露面保护几个环节做好工作外,合理安排仓位、科学配备资源、加快入仓速度及加强仓面保护等综合管理方面对混凝土温控也有重要作用。

从工程实践应用情况来看,以上这些措施是基于温度梯度过大产生裂缝的认识提出的,虽然能在某种程度上减少裂缝产生的几率,但未同时考虑到湿度场的存在所致温湿耦合机制对混凝土裂缝产生的作用,因此要从干缩应力和温度应力超标上防止混凝土裂缝的产生,可以从水工大体积混凝土温湿度机理出发,研究对混凝土保温保湿的防裂措施。

5. 混凝土保温保湿防裂措施

引起水工大体积混凝土表面裂缝的原因是干缩应力和温度应力,因此,防止大坝混凝土表面裂缝要从对大坝混凝土表面进行保温保湿入手。为保持大坝混凝土相对恒温恒湿,减少温度梯度变化及干缩产生的裂缝,宜昌天宇科技有限公司与多个科研单位合作,在长期研究实践中观察发现,喷涂聚氨酯硬质泡沫用于大坝混凝土保温保湿,具有外形美观、保温隔热与保湿性良好、快速固化、不污染环境、施工简单方便、粘合牢固、耐久性好等优点,其保温隔热与保湿性能稳定,被保护的混凝土表面不因气候变化而发生大的波动。由于聚氨酯属于胶凝材料,其喷涂施工工艺可形成混凝土表面无缝粘结,提高了保湿性能,有效地降低坝内混凝土的温度应力及干缩应力超标。该项技术在新疆石门子碾压混凝土拱坝工程中首次成功应用实践表明,喷涂聚氨酯对大坝混凝土进行保温保湿,其防裂效果明显,效益显著,为高寒地区混凝土坝的建设提供了保温保湿技术参数,也为混凝土坝保温保湿防裂提供了新的解决方案。

1.4 温湿耦合理论研究 with 试验

混凝土结构的温度裂缝和干缩裂缝是水工结构学科中的重要研究课题。现在的方法都注重计算温度应力引起的裂缝,而对引起干缩裂缝的湿度变化缺乏定量分析。传统上仅研究水工混凝土由于湿度变化而引起的干缩,并用线性叠加理论进行分析,这与水工混凝土实际工作机理不相符合,导致混凝土的湿传导研究进展缓慢,此前研究两者耦合作用机理在国内水工混凝土领域内未见报道。

1.4.1 水工大体积混凝土温湿耦合理论

温湿耦合理论主要是研究水工混凝土温湿耦合机理和混凝土表面裂缝