

# 大体积混凝土裂缝防治 及诊断关键技术

李松辉 著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 大体积混凝土裂缝防治 及诊断关键技术

李松辉 著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书系统地论述了大体积混凝土裂缝防治及诊断关键技术的最新研究进展,以工程实例阐述了混凝土坝防裂智能监控技术构成及应用,详细阐述了作者提出的基于泄流激励的水工结构损伤诊断方法,解决了大体积混凝土结构水下损伤识别难的技术难题。

本书适用于从事大体积混凝土施工及水工结构领域的科研人员使用,其他施工技术人员可参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

大体积混凝土裂缝防治及诊断关键技术 / 李松辉著. —北京: 中国电力出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-5198-0292-9

I. ①大… II. ①李… III. ①混凝土结构—裂缝—防治②混凝土结构—裂缝—处理 IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 321981 号

---

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 孙建英 (010-63412369)

责任校对: 王开云

装帧设计: 张俊霞 赵姗姗

责任印制: 蔺义舟

---

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2017 年 12 月第一版

印 次: 2017 年 12 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 16 开本

印 张: 9

字 数: 200 千字

定 价: 55.00 元

---

### 版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

# 前 言

大体积混凝土结构被广泛应用于水利水电工程、核电工程等基础设施建设中,尤以混凝土坝应用最为广泛。进入 21 世纪以来,中国已经成为世界高坝建设的中心(坝高位列世界前三的坝均在中国)。以二滩拱坝(240m)的建成为标志,已建成的如锦屏一级(坝高 305m)、小湾(292m)、溪洛渡(坝高 285.5m)、拉西瓦(250m)、构皮滩(232.5m)、龙滩(216.5m)、光照(200.5m)等高坝;正在建设中的白鹤滩(289m)、乌东德(270m);计划建设的马吉(290m)、QBT(240m)等特高混凝土坝也将陆续开工,这些高坝的建成将对缓解我国电力紧张、解决水资源短缺问题发挥重要作用,具有重大的社会和经济效益。

大体积混凝土的裂缝问题是长期困扰工程界的难点之一。裂缝的出现会影响工程的安全性和耐久性,增加后期修补费用,带来经济损失和不利社会影响。温度控制是混凝土防裂的主要手段。虽然从 20 世纪 30 年代起,人们发展了一系列混凝土防裂措施,包括改善混凝土抗裂性能、分缝分块、水管冷却、混凝土骨料预冷、表面保温等,但“无坝不裂”仍是一个现实。近期建设的高混凝土坝多存在浇筑仓面大、混凝土标号高、筑坝条件恶劣等特点,这些特点增加了混凝土的开裂风险,提高了温控防裂难度,仅靠传统的防裂方式,已难以保证大坝不出现危害性裂缝。随着信息技术的发展,利用智能化技术进行大坝施工质量、施工期及运行期工作性态的监控已成为保障大坝安全的新手段。本书重点就混凝土裂缝防治技术进展进行了介绍。

混凝土出现裂缝等的损伤检测是指导缺陷处理的基本依据,在现有的结构损伤诊断方法中,从大类上讲可以分为有损检测和无损检测两种方法。有损检测方法因其会对建筑物结构产生一定程度的破坏,故不适宜于服役工程,其主要是应用于结构的故障解剖,以期详细研究损伤的产生及形成机理。鉴于大型水利水电工程结构昂贵的造价和结构在使用中不宜中断等特点,在役结构的安全评估方法首先应该是无损或微损的。常规的一些无损检测方法主要包括目测法、X 光检测、超声波检测、工业 CT 和热成像等,上述方法多不适用于水下结构或大体积混凝土结构。结构损伤将会引起结构刚度等物理参数的变化,实际表现为结构动力参数(如固有频率、振型、阻尼比等)的变化。本书基于此提出了泄流激励下水工结构的损伤诊断方法,成功解决了服役水工建筑物水下构件或隐蔽部位损伤诊断难的问题。

本书重点就大体积混凝土的裂缝成因、裂缝防治、裂缝诊断、裂缝处理四个方面进行了介绍，共分6章。第1章为概述；第2章介绍了裂缝成因及分类；第3章介绍了混凝土裂缝防治关键技术进展；第4章介绍了泄流激励下混凝土结构损伤诊断关键技术；第5章介绍了混凝土结构的常规的无损检测方法；第6章简要介绍了裂缝处理方法。

本书由李松辉撰写。参与本书编写工作的还有张龔、李玥、刘玉、王富强、林晓贺、张瑞雪、张通等。衷心感谢作者所在的中国水利水电科学研究院结构材料研究所研究团队各位领导、同事对我的支持和帮助。本书中泄流激励下水工结构的损伤诊断方法为作者在天津大学博士期间的研究成果，借此机会向所在天津大学的各位老师及同学给予的帮助表示由衷的感谢。

由于作者的学识和水平所限，书中难免存在疏漏和不妥之处，诚恳希望读者和专家批评指正。

李松辉

2017年8月于北京

# 目 录

前言

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第 1 章 概述                | 1   |
| 参考文献                    | 4   |
| 第 2 章 混凝土裂缝成因及分类        | 5   |
| 2.1 裂缝成因                | 5   |
| 2.2 裂缝分类                | 5   |
| 第 3 章 混凝土裂缝防治关键技术进展     | 7   |
| 3.1 国内外研究现状             | 7   |
| 3.2 混凝土结构关键部位防治措施       | 8   |
| 3.3 高寒区混凝土降雪保温措施        | 15  |
| 3.4 小温差早冷却缓慢冷却          | 19  |
| 3.5 “九三一”温控模式           | 20  |
| 3.6 大体积混凝土防裂智能监控系统      | 21  |
| 3.7 本章小结                | 31  |
| 参考文献                    | 31  |
| 第 4 章 基于机器学习的泄流结构损伤诊断技术 | 33  |
| 4.1 总体思路                | 33  |
| 4.2 国内外研究现状             | 34  |
| 4.3 信号预处理理论方法           | 41  |
| 4.4 混凝土结构模态参数识别方法       | 52  |
| 4.5 基于模态参数识别的损伤诊断方法与技术  | 84  |
| 4.6 本章小结                | 115 |
| 参考文献                    | 117 |
| 第 5 章 混凝土结构无损检测技术       | 121 |
| 5.1 人工检查                | 121 |
| 5.2 混凝土声波检测方法           | 122 |
| 5.3 电磁波方法               | 123 |
| 5.4 红外成像法检测技术           | 124 |
| 5.5 X 射线扫描法             | 124 |
| 5.6 探地雷达                | 125 |
| 5.7 回弹法                 | 125 |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 5.8 本章小结 .....                    | 126        |
| 参考文献 .....                        | 126        |
| <b>第 6 章 大体积混凝土裂缝处理关键技术 .....</b> | <b>127</b> |
| 6.1 表面处理 .....                    | 127        |
| 6.2 灌浆处理 .....                    | 129        |
| 6.3 抽槽回填混凝土 .....                 | 130        |
| 6.4 结构加固法 .....                   | 130        |
| 6.5 混凝土置换法 .....                  | 133        |
| 6.6 仿生自愈法 .....                   | 133        |
| 6.7 本章小结 .....                    | 136        |
| 参考文献 .....                        | 136        |



# 第 1 章

## 概 述

混凝土坝是坝工建设的主要坝型之一。我国已建和在建混凝土坝的数量及高度均居世界首位，特别是改革开放以来，一些高坝工程的设计建设和安全运行，标志着我国坝工技术整体上达到了国际领先水平。如坝高 305m 的锦屏一级拱坝、292m 的小湾拱坝以及 285.5m 的溪洛渡拱坝，其高度不但超过了世界最高的英古里拱坝（275m），也超过了世界最高的大狄克逊重力坝（286m），这些工程的建设规模和难度均居世界之最。

截至 2016 年，我国已建成 200m 以上的高坝九座（包括坝高世界排名前三的锦屏一级、小湾及溪洛渡高坝），“十三五”期间，还将建成十余座高混凝土坝，如乌东德、白鹤滩、叶巴滩等工程（见表 1-1）。

表 1-1 我国建成 200m 以上的高混凝土坝统计表

| 序号 | 项目名称 | 坝高（m） | 所属流域 | 装机容量    | 总投资      | 建成年份 |
|----|------|-------|------|---------|----------|------|
| 1  | 锦屏一级 | 305   | 雅砻江  | 3600MW  | 232.3 亿  | 2013 |
| 2  | 松塔   | 295   | 怒江   | 3600MW  | 370.9 亿  | 2013 |
| 3  | 小湾   | 292   | 澜沧江  | 4200MW  | 277.31 亿 | 2010 |
| 4  | 马吉   | 290   | 怒江   | 4200MW  | 184 亿    | 2020 |
| 5  | 白鹤滩  | 289   | 金沙江  | 16000MW | 846 亿    | 2022 |
| 6  | 怒江桥  | 288   | 怒江   | 2400MW  | —        | —    |
| 7  | 溪洛渡  | 285.5 | 金沙江  | 13860MW | 792 亿    | 2015 |
| 8  | 同卡   | 276   | 怒江   | 1800MW  | —        | —    |
| 9  | 罗拉   | 275   | 怒江   | 2600MW  | —        | —    |
| 10 | 乌东德  | 270   | 金沙江  | 10200MW | 967 亿    | —    |
| 11 | 拉西瓦  | 250   | 黄河   | 4200MW  | 149.86 亿 | 2010 |
| 12 | 二滩   | 240   | 雅砻江  | 3300MW  | 286 亿    | 2000 |
| 13 | 孟底沟  | 240   | 雅砻江  | 2000MW  | 143.58 亿 | —    |
| 14 | 古学   | 240   | 金沙江  | 90MW    | 10.55 亿  | 2014 |
| 15 | QBT  | 240   | 布尔津河 | 524MW   | 45 亿     | —    |
| 16 | 构皮滩  | 232.5 | 乌江   | 3000MW  | 138 亿    | 2011 |
| 17 | 东庄   | 230   | 泾河   | 90MW    | 127 亿    | —    |
| 18 | 叶巴滩  | 224   | 金沙江  | 2240MW  | 389.12 亿 | —    |
| 19 | 龙滩   | 216.5 | 红水河  | 6300MW  | 300 亿    | 2009 |
| 20 | 大岗山  | 210   | 大渡河  | 2600MW  | 174.48 亿 | 2014 |
| 21 | 黄登   | 203   | 澜沧江  | 1900MW  | 173.28 亿 | —    |
| 22 | 光照   | 200.5 | 北盘江  | 1040MW  | 69.03 亿  | 2007 |



混凝土坝施工过程十分复杂，需要综合考虑结构形式、施工工艺、防洪度汛、温度控制和浇筑能力等众多影响因素，其中施工期混凝土坝的裂缝控制问题是工程建设的重要技术问题之一，决定了工程的成败<sup>[1]</sup>。如美国德沃夏克混凝土重力坝（见图 1-1），坝高 219m，大坝建成后 9 个坝段产生了劈头缝，深达 40~50m。奥地利柯恩布莱恩拱坝（见图 1-2），坝高 200m，建成蓄水后坝踵产生了第一条严重裂缝，被迫放空水库，采取坝体环氧灌浆、地基内设冰冻帷幕、上游库底建造混凝土防渗护坦等一系列加固措施，再次蓄水后又产生了第二条大裂缝，最后只好在下游修建一座重力坝对大坝予以支撑。俄罗斯萨扬舒申斯克坝（见图 1-3），由于施工期坝踵开裂，导致运行期漏水严重，给水资源开发带来严重的影响。我国近期建设的一些工程也发生了比较严重的开裂事故（见图 1-4）。

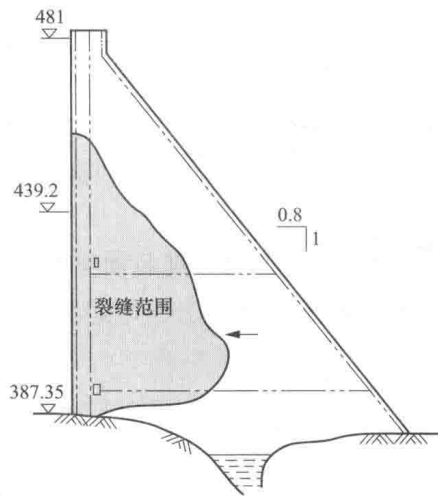


图 1-1 美国德沃夏克某坝段裂缝图

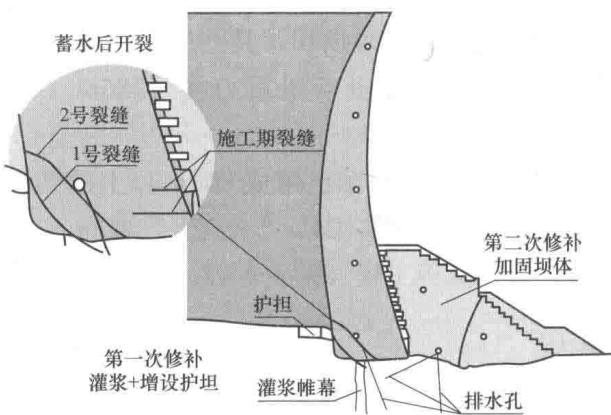


图 1-2 奥地利柯恩布莱恩拱坝裂缝分布图

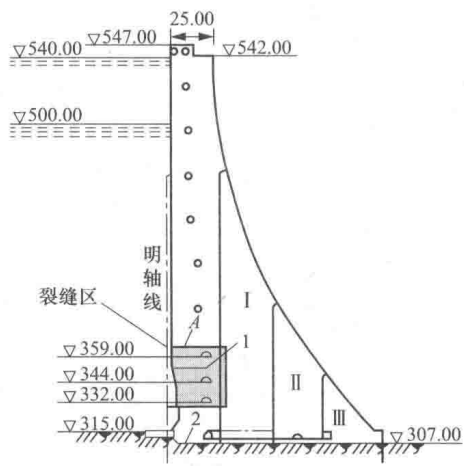


图 1-3 俄罗斯萨扬舒申斯克坝裂缝分布图  
1—混凝土内裂缝；2—接触部位裂缝

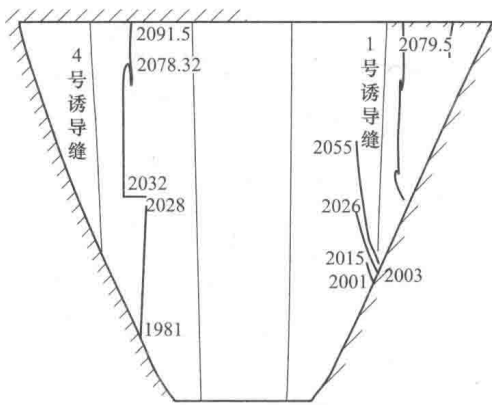


图 1-4 国内某坝上游面裂缝分布图

混凝土坝的运行安全问题不容忽视，其不仅关系到防洪、供水、粮食安全，而且关系到经济、生态以及生命安全。大坝一旦失事，将带来不可估量的生命财产损失。我国的大坝、水电站等水工建筑物大部分都建于 50 年代初期，服役期有的已超过半个世纪。

在此期间由于施工期裂缝、混凝土老化、钢筋锈蚀等因素，许多已成为陷入危境的“病坝”。故正确评定水工结构的实际工作性态和对建筑物进行有效的诊断，是结构可靠工作的基本前提。

我国已建的水工建（构）筑物中，服役期较长的建筑仍然占有很大的比例。据统计，截至 1997 年底，佛子岭、梅山、响洪甸三座老坝由于混凝土老化、结构破损等因素共亏损 1 亿多元。仅佛子岭 1997 年一年就亏损 1700 多万元，而在修补佛子岭的设计预算中，只修两个拱就需要花费 1400 万余元。20 世纪 80 年代，原水电部水工混凝土耐久调查组对全国 32 座大型混凝土坝进行了调查，结论为：被查坝体全部存在裂缝<sup>[2-3]</sup>。调查报告还表明：我国水工混凝土的冻融破坏发生在“三北”地区的工程占 100%，这些大型混凝土工程一般运行也就 30 年左右，有的甚至不到 20 年，如云峰宽缝重力坝，运行 19 年后下游面受破损显著，表面剥蚀露出骨料，总面积约 8500m<sup>2</sup>；而丰满重力坝自从开始运行就年年维修，运行 33 年后，上、下游面及尾水闸闸墩破损明显，表面露出钢筋，冻害严重，致使坝顶抬高 10 余厘米，2014 年被迫重建。中国建筑科学研究院对我国水工建筑物的耐久性调查表明，20 世纪 50 年代后期到 70 年代是我国大坝建设的一个高速发展期，这一时期，水利工程的数量急剧增加，建成了新安江、密云、三门峡、新丰江、丹江口、刘家峡、青铜峡等一大批水利水电工程。在这个时期，由于许多工程采用了群众运动的建设方式，技术措施不到位，管理混乱，致使很多工程遗留了很多问题，这些大坝蓄水运行以后，持续受到渗流、溶蚀、冲刷、冻融等有害作用，有的还受到超标准洪水和大地震的破坏，筑坝材料逐渐老化，大坝承受水压力、渗透压力等巨大荷载的能力不断降低，因而必须及时通过有效的手段对其进行评价分析，准确把握结构的工作性态变化规律，确定危及大坝安全的主要问题并设法加以处理消除，以保证大坝的安全运行。此外，据水利部和国家电力公司（原电力部）对所属大坝的安全定期检查发现，截至 1999 年底，我国已建水利堤坝（即以防洪、灌溉和供水为主的大坝并由水利部门管理）中，有 30413 座为病险坝，其中大型坝 145 座、中型坝 1118 座、小型坝为 29150 座，从 1999~2002 年垮坝达 245 座；电力部门管理的以发电为主的 130 多座水电站大坝中有 9 座为病险大坝。大坝的主要重大缺陷和隐患是由于设计洪水、坝基及库岸地质、施工质量、工程设计和运行管理等方面的问题所引起，尤其是 20 世纪 60~70 年代修建的大坝，由于当时施工技术水平等多种原因，隐患病害尤为严重，其中高混凝土坝存在裂缝、溶蚀、冻融、温度疲劳和日照碳化等病害，特别是裂缝问题严重。电力部门第一轮定期检查 96 座水电站大坝的结果如表 1-2 所示<sup>[2-4]</sup>。

表 1-2 96 座大中型水电站大坝病患和病险统计

| 序号 | 隐患或病险                                                      | 数量（座） | 比例（%） |
|----|------------------------------------------------------------|-------|-------|
| 1  | 防洪标准低，不满足现行规范的规定，有的大坝在运行中曾发生洪水漫顶事故，造成巨大损失                  | 38    | 39.6  |
| 2  | 坝基存在重大隐患，断层、破碎带和软弱夹层未做处理或处理效果差，有的在运行中局部发生性态恶化，使大坝的抗滑安全明显降低 | 14    | 14.6  |

续表

| 序号 | 隐患或病险                                                           | 数量 (座) | 比例 (%) |
|----|-----------------------------------------------------------------|--------|--------|
| 3  | 坝体稳定安全系数偏低、不满足现行规范的规定                                           | 5      | 5.2    |
| 4  | 坝体裂缝破坏大坝的整体性和耐久性, 有的裂缝贯穿上下游, 渗漏严重, 有的裂缝规模大且所在部位重要, 已影响到大坝的强度和稳定 | 70     | 72.9   |
| 5  | 结构强度不满足要求, 坝基、坝体在设计荷载组合下出现超过允许的拉、压应力                            | 10     | 10.4   |
| 6  | 坝基扬压力或坝体浸润线偏高, 坝基或坝体渗漏量偏大, 有的坝体大量析出钙质 (溶融)                      | 32     | 33.3   |
| 7  | 泄洪建筑物磨损、空蚀损坏严重, 有的大坝坝后冲刷坑已影响到坝体的稳定                              | 23     | 24     |
| 8  | 混凝土遭受冻融破坏严重, 表层混凝土剥蚀或碳化较深, 有的大坝在泄洪时溢流面发生大面积混凝土被冲毁事故             | 10     | 10.4   |
| 9  | 近坝区上下游边坡不稳定, 有的曾发生较大规模的滑坡                                       | 10     | 10.4   |
| 10 | 水库淤积严重                                                          | 10     | 10.4   |
| 11 | 水工闸门和启闭设备存在重大缺陷, 有的已不能正常挡水和启闭运行, 影响安全度汛                         | 27     | 28.1   |
| 12 | 合计                                                              | 249    |        |

总之, 施工期如何运用有效的技术措施防止混凝土裂缝的发生, 运行期如何就裂缝发生后的损伤进行诊断及处理, 是目前工程界研究的重点之一。本书主要从大体积混凝土结构的裂缝成因、裂缝防治、裂缝诊断及裂缝处理四个方面进行重点阐述。

参考文献

[1] 张国新, 李松辉, 等. 大体积混凝土防裂智能化温控关键技术 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2010.

[2] 陈德亮. 水工建筑物 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.

[3] 吴中如. 重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.

[4] 陈德亮. 结构损伤检测与诊断的方法研究进展 [J]. 沈阳工业大学学报, 2004, 26 (4): 457-460.



## 第 2 章

# 混凝土裂缝成因及分类

### 2.1 裂缝成因

混凝土裂缝成因复杂，主要机理为开裂驱动力大于混凝土抗拉强度，导致裂缝的产生（见图 2-1）。

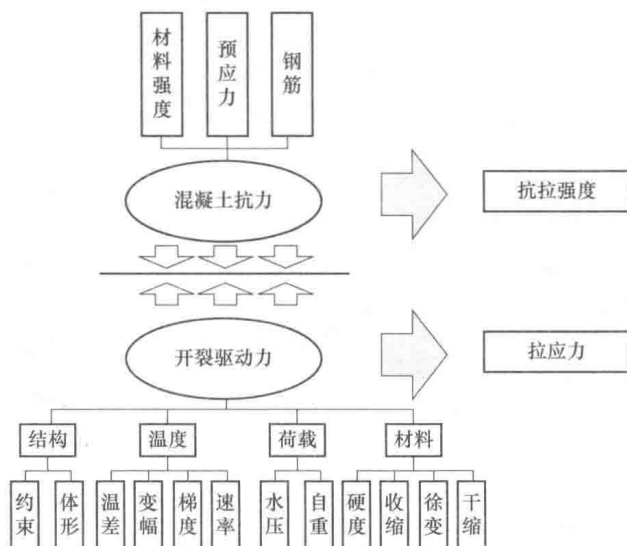


图 2-1 混凝土裂缝产生的机理图

### 2.2 裂缝分类

(1) 裂缝根据性质主要归纳为以下几类：

1) 基础贯穿裂缝。位于坝块基础部位，裂缝宽度较大并穿过几个浇筑层。这类裂缝一般发生于坝块浇筑后期的整体降温过程中，或长间歇的基础浇筑层受气温骤降、内部降温、基础强约束的联合作用，缝宽表现为上大下小，这是由于基础约束限制了坝块底部变形的缘故。

2) 深层裂缝。裂缝限于坝块表层，但其深度及长度较大，贯通了整个仓面浇筑层，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作用或长期暴露受气温年变化引起的内外温差与气温骤降联合作用，或浇筑层底部成台阶状造成的，需根据发生的部位、坝体内部温度状态及边界条件，作妥善处理，以防止裂缝发展为基

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,分水平向和竖向,其长度及深度一般较小,未贯通整个仓面和浇筑层,主要是坝块在浇筑过程中,层面间歇受气温骤降作用引起的。这类裂缝多发生在混凝土早龄期,具有明显的规律性。

4) 网状裂缝。一般发生在坝块的暴露面,裂缝性态及分布很不规则,且深度极浅,往往是由于混凝土浇筑后养护不善造成的,尤其是高标号混凝土的表面在早期极易出现这类裂缝,这是由于表面干缩造成的。

5) 劈头缝。劈头缝是发生在坝体上游面的竖向裂缝,一般在早期只发生在坝体上游面的表面裂缝,但由于长期暴露,气温骤降或初次蓄水作用,尤其蓄水后受水温及渗压的作用,极易向纵深发展。

(2) 根据缝宽及缝深将裂缝分为以下四类:

1) I类裂缝:一般缝宽  $\delta < 0.2\text{mm}$ , 缝深  $h < 30\text{cm}$ , 性状表现为龟裂或呈细微规则特性。

2) II类裂缝:表面(浅层)裂缝,一般缝宽  $0.2\text{mm} \leq \delta < 0.3\text{mm}$ , 缝深  $30\text{cm} \leq h < 100\text{cm}$ , 平面缝长  $3\text{m} \leq L < 5\text{m}$ 。

3) III类裂缝:表面深层裂缝,一般缝宽  $0.3\text{mm} \leq \delta < 0.5\text{mm}$ , 缝深  $100\text{cm} \leq h < 500\text{cm}$ , 平面缝长大于  $500\text{cm}$ , 或平面大于或等于三分之一坝块宽度,侧面大于  $1 \sim 2$  个浇筑层厚,呈规则状。

4) IV类裂缝:缝宽  $\delta \geq 0.5\text{mm}$ , 缝深  $\geq 500\text{cm}$ , 侧(立)面长度  $h > 500\text{cm}$ , 或平面上贯穿全坝段的贯穿裂缝。



## 混凝土裂缝防治关键技术进展

### 3.1 国内外研究现状

大体积混凝土结构裂缝大部分为温度裂缝,其产生大多是由施工期温控问题带来。人们对混凝土温度裂缝的认识与研究始于 20 世纪初,1938 年美国对波尔德坝成功地采取了温控措施,包括采用纵横缝分缝、低热水泥、控制浇筑层厚及限制间歇期等。40~50 年代,美国发展了混凝土预冷技术,1953 年基本形成了温度控制的基本施工工艺框架。60 年代初期提出了一种初步定型的设计与施工模式,主要包括:①采用具有低水化热的水泥,或采用一部分活性掺料来替代;②采用低水泥含量以降低总的发热量;③限制浇筑层厚度和合理的浇筑间歇期;④采用人工冷却混凝土组成材料的方法来降低混凝土的浇筑温度;⑤在混凝土浇筑以后,采用预埋冷却水管,通循环水来降低混凝土的水化热温升;⑥保护新浇混凝土的暴露面,以防止突然的降温,如果需要,就把所有的浇筑面都掩盖起来,在极端寒冷的地区,掩盖在棚内进行人工加热;在酷热季节,如果有必要的话就采用棚盖来防止新浇混凝土暴露面避免日光直射,并同时采用喷雾的方法来防止混凝土过早的凝结和干燥<sup>[1-3]</sup>。

前苏联混凝土坝建设始于 20 世纪 60 年代,由于其恶劣的气候条件,温控防裂问题难度更大,先后采用过错缝、直缝柱状块、薄层长条浇筑、水管冷却、混凝土预冷及保温等措施,这在一定程度上缓解了混凝土的开裂问题,但裂缝问题并没有完全防治,如建设在安加拉河上的坝高 125m,坝体混凝土近 1400 万  $\text{m}^3$  的布拉茨克电站以及建设在叶尼塞河上的坝高 124m,坝体混凝土 435 万  $\text{m}^3$  的克拉斯诺亚尔斯克电站,虽然在设计施工方面,对大坝混凝土的温控防裂问题也采取了比较严格的措施,但还是出现了不少裂缝。一直到 1977 年兴建在纳伦河上的坝高 215m,坝体混凝土 320 万  $\text{m}^3$ ,装机容量 124 万 kW 的托克古尔电站建成后,才宣布他们在温控防裂方面取得一定的成功<sup>[1-3]</sup>。

我国的混凝土坝建设起步于 20 世纪 50 年代初,比发达国家落后数十年,经过近四十年的发展,大坝建设规模不断取得突破,相关技术成果走在世界前列,目前世界上最高的三座混凝土坝(锦屏一级、小湾、溪洛渡)均已投产运行。现阶段,温控防裂主要思路是根据工程特点制定适合的温控标准以及与其配套的温控措施,并在施工过程中贯彻执行,主要包括结构分缝、低温浇筑、通水冷却及表面保温,但“无坝不裂”仍是一个现实问题。

随着信息化的发展,利用信息技术进行大坝施工质量、施工期及运行期工作性态的

监控已成为保障大坝安全的新手段。混凝土坝智能监控也成为当今坝工领域的重要研究方向。

2006年,朱伯芳院士提出了数字水电站的概念,即水电站规划、设计、科研、建设及管理的最优化、可视化和网络化,开发出国内第一个数字化温控系统——混凝土温度与应力控制决策支持系统,并在周公宅工程获得应用。该系统可在大坝施工过程中根据实际施工条件和温控措施,对全坝进行全过程仿真分析,及时了解坝体各坝块的温度与应力状态以及各种温控措施的实际效果,并可预报竣工后运行期的温度和应力状态<sup>[4-6]</sup>。2007年,朱伯芳院士提出了“数字监控”的概念<sup>[5,6]</sup>,即将传统的仪器监测与工程施工期、初次蓄水期乃至运行期全过程数字仿真分析相结合,实现对大坝温度、变形、应力等关键要素的全过程全场实时监控,有效克服了仪器监测“空间上离散”“时间上断续”的不足。2009年,“数字监控”技术在锦屏一级<sup>[7,9]</sup>及溪洛渡工程开始应用,运用该系统可以实时开展大坝工作性态评估,降低事故风险,同时可以为施工期动态设计提供决策支持。

以“信息化”“数字化”为基础,结合人工智能、自动化等技术,便可实现施工过程中影响质量的若干工序的智能化<sup>[9-11]</sup>。在水利工程领域,张国新<sup>[9]</sup>2012年在温控防裂方面提出了“数字大坝”朝“智能大坝”转变的设想,指出可将智能化技术应用于浇筑温度、仓面温度控制、通水冷却、混凝土养护等各个环节。

李庆斌于2014年就智能大坝进行了详细论述,提出了基于物联网、自动测控和云计算技术实现个性化管理与分析、并实施对大坝性能进行控制的综合构想,提出“智能大坝是在对传统混凝土大坝实现数字化后,采用通信与控制技术对大坝全生命周期实现所有信息的实时感知、自动分析与性能控制的大坝”<sup>[10]</sup>。谭恺炎<sup>[12]</sup>针对大体积混凝土冷却通水系统也进行了相关的研究和实践。

信息化、数字化、数值模拟仿真、大数据等技术的迅速发展为大坝温控防裂的智能化提供了机遇。2013年张国新教高针对大体积混凝土温控施工及数字监控存在的问题,提出了“九三一温度控制模式”<sup>[13]</sup>，“九”是九字方针即“早保护、小温差、慢冷却”；“三”是三期冷却即“一期冷却”“中期冷却”和“二期冷却”；“一”为一个监控即“智能监控”。通过“九三一”温控模式,配合智能化控制可有效解决“四不”（即“不及时、不准确、不真实、不系统”），控制“四大”（即“温差大、降温速率大、降温幅度大、温度梯度大”），从根本上达到混凝土温控防裂的目的。

## 3.2 混凝土结构关键部位防治措施

### 3.2.1 基础约束区裂缝

混凝土大坝基础约束区一般分为基础强约束区和基础弱约束区,基础强约束区是指以浇筑坝段基础面平均高程计算,距基础面 $0\sim 0.2L$ 高度范围内的混凝土( $L$ 为浇筑块长边的最大长度),基础弱约束区是指对于坝段底部和基础区相连接的部位,以浇筑坝段基础面平均高程计算,距基础面 $0.2L\sim 0.4L$ 高度范围内的混凝土。由于此部分混凝土与基础相连,约束较强;此外若有垫层混凝土存在,冬季长间歇无任何温控措施的条



件下，薄层混凝土温度降低很快，基础温差较快达到，叠加较大的内外温差，开裂风险较大。

基础约束区裂缝的防治措施主要有：①埋设冷却水管进行通水冷却；②当混凝土尤其是垫层混凝土遭遇长间歇期寒潮作用时，应注重混凝土的保温工作。下面通过两个实例进行说明。

图 3-1 和图 3-2 为某混凝土坝有水管与无水管条件下冷却温度过程线和应力过程线<sup>[13,14]</sup>。

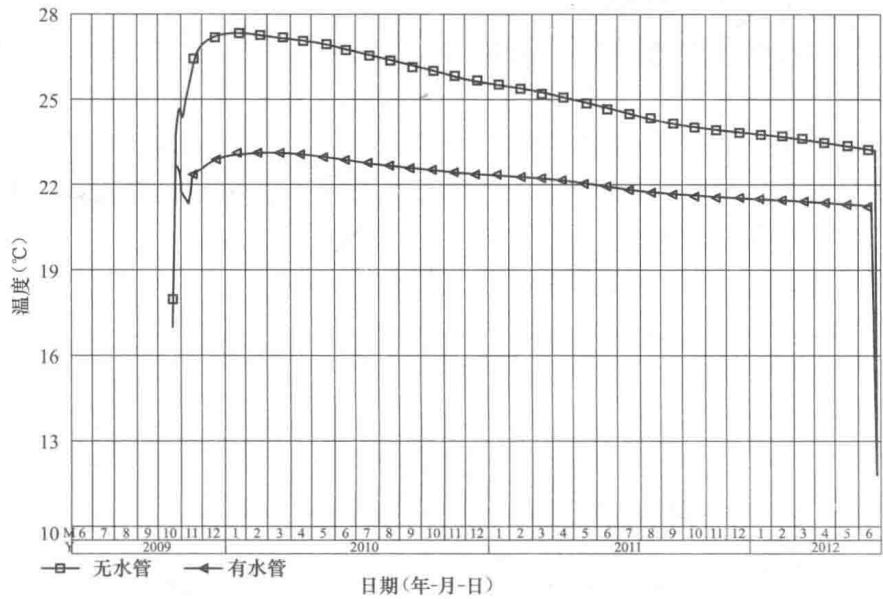


图 3-1 强约束区有无水管冷却温度过程线

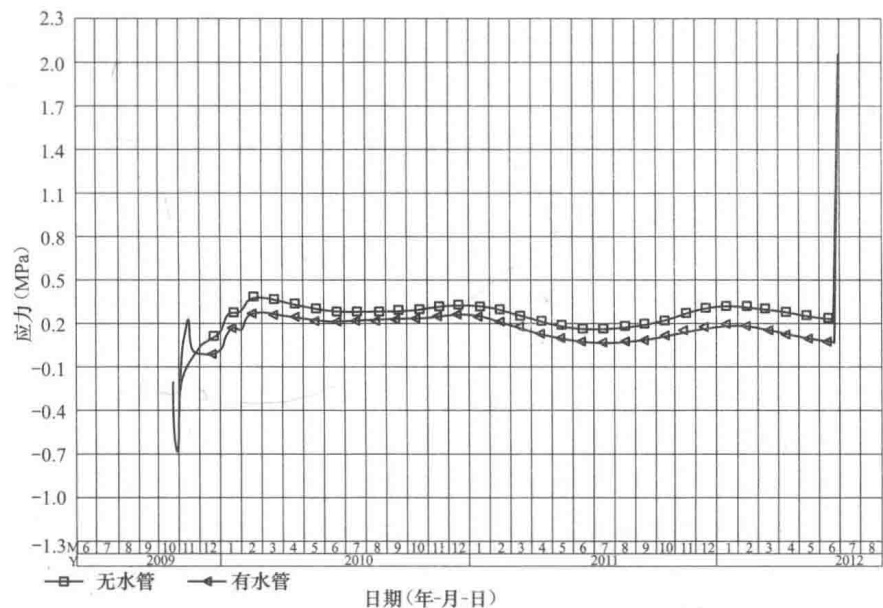


图 3-2 强约束区有无水管冷却应力过程线



通过图 3-1 和图 3-2 可知, 坝体若无任何温控措施, 强约束区最高温度为 27.91℃, 基础强约束区最大顺河向应力为 2.17MPa, 安全系数 1.61, 横河向应力为 2.06MPa, 安全系数 1.69, 存在开裂风险。经水管冷却后 (1.5m×1.5m 的水管 25d 的冷却), 最高温度降为 22.50℃, 最大顺河向应力减小为 1.59MPa, 安全系数 2.20, 横河向应力减小为 1.45MPa, 安全系数 2.41, 可大大降低开裂风险。

在混凝土大坝浇筑过程中, 有的需在基础设置混凝土垫层, 混凝土垫层具有薄层长间歇、受基础约束大的特点, 开裂风险较大。图 3-3 为某混凝土重力坝垫层混凝土无保温条件下叠加短周期应力过程线<sup>[15]</sup>, 由图可知:

- (1) 混凝土仓面冬季长间歇, 温度下降快、内外温差大, 长周期最大温度应力 1.00MPa。
- (2) 混凝土在长间歇期间遭遇寒潮频繁且无保温, 50d 龄期长周期应力 0.51MPa, 短周期温度应力 1.31MPa, 总应力 1.81MPa, 按照该部位混凝土抗拉强度控制, 安全系数仅 0.99, 开裂风险较大。
- (3) 混凝土保温可大大减低寒潮应力, 降低开裂风险。

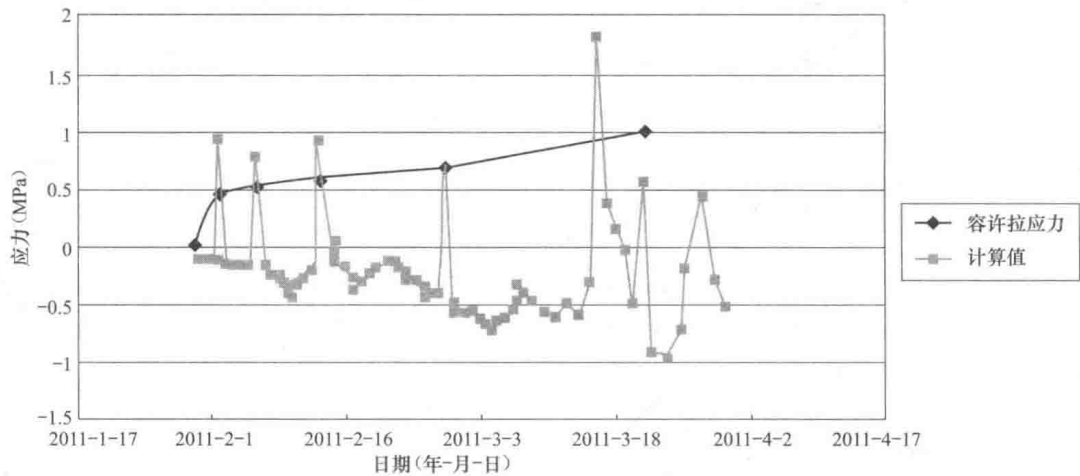


图 3-3 垫层混凝土无保温条件下叠加短周期应力过程线

3.2.2 混凝土表面裂缝

混凝土常见的裂缝, 大多数是一些不同深度的表面裂缝, 裂缝发生的部位主要是混凝土的暴露面, 如①刚浇筑尚在凝固硬化过程中的新浇筑块表层; ②相邻坝块高差悬殊长期暴露的侧表面; ③大坝的上下游面。

早期由于水泥水化热, 混凝土内升温很高, 拆模后表面温度较低, 尤其在低温季节, 易在表面部分形成很陡的温度梯度, 发生很大的拉应力; 而早期混凝土强度低, 极限拉伸值小, 再加上养护不善, 易于形成裂缝。因此, 表面裂缝常常发生于早期。在冬季负温或在早春晚秋气温骤降寒潮频繁季节, 由于混凝土表面处于负温或表面温度骤降, 也容易形成裂缝。因此, 表面裂缝也会出现于晚期。这种现象在寒冷地区或低温季节更为明显。

低温季节的表面防裂措施主要包括: ①对表面进行保温; ②在过冬前通水进行二期冷却。