



# 高混凝土坝结构安全与 优化理论及应用

GAOHUNNINGTUBA JIEGOU ANQUAN YU  
YOUHUA LILUN JI YINGYONG

常晓林 周 伟 赖国伟 刘杏红 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)



# 高混凝土坝结构安全与 优化理论及应用

常晓林 周 伟 赖国伟 刘杏红 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书以高混凝土坝的结构安全与优化为主题,重点阐述高混凝土坝的结构安全与优化理论和模型,提出了高混凝土坝宏观力学参数模型、高混凝土重力坝坝基失稳机理及控制标准、高混凝土坝稳定安全设计理论、高混凝土坝非线性徐变模型、高混凝土坝体形优化理论,系统介绍了适用于重力坝坝基多滑面抗滑稳定分析的广义等K法、重力坝坝基深层抗滑稳定分析的新设计表达式及分项系数、高混凝土坝抗滑稳定分析的分项系数有限元法,以及所建立的高混凝土坝结构稳定安全的多层次仿真模拟平台、高混凝土坝施工期至运行期全过程温控防裂仿真模拟平台和高混凝土坝结构体形优化分析平台。在论述高混凝土坝的结构安全与优化理论及数值模拟方面,既以作者及团队的研究成果为主,又力图兼顾国内外的研究现状与主要成果。

本书适用于水利、水电、岩土等行业从事水工结构和岩土力学的科研人员使用,也可作为高等院校和科研院所相关专业研究生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高混凝土坝结构安全与优化理论及应用 / 常晓林等  
著. — 北京:中国水利水电出版社, 2014. 12  
ISBN 978-7-5170-2795-9

I. ①高… II. ①常… III. ①混凝土坝—研究 IV.  
①TV642

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第308696号

|      |                                                                                                                               |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 高混凝土坝结构安全与优化理论及应用                                                                                                             |
| 作 者  | 常晓林 周伟 赖国伟 刘杏红 著                                                                                                              |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sales@waterpub.com.cn<br>电话: (010) 68367658 (发行部) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>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  | 北京瑞斯通印务发展有限公司                                                                                                                 |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 18.5印张 438千字                                                                                                 |
| 版 次  | 2014年12月第1版 2014年12月第1次印刷                                                                                                     |
| 印 数  | 0001—1500册                                                                                                                    |
| 定 价  | 55.00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

# 序



高混凝土坝结构安全与优化设计计算方法及完善理论体系，一直是坝工界的研究热点问题。随着我国西部大开发战略的实施，一批大型、特大型水电站已开工兴建或即将开工。这些工程中的高坝岩基稳定、大体积混凝土温度控制、结构体形优化等问题复杂。要解决这些重大工程问题，必须在基础理论上有所突破，在关键技术上有所创新。本书正是瞄准了这方面的理论发展要求和这些重大工程的应用需要，经过课题组多年系统科学研究的逐步积累，在反复凝练的基础上形成的系列研究成果。

高混凝土坝结构安全与优化设计计算方法及完善理论体系研究，包括了高混凝土坝工程设计和科学研究中的两大科学问题与关键技术，其一为高混凝土坝设计周期内的坝体坝基系统的结构稳定安全与坝体混凝土温控防裂安全，其二为考虑各种复杂条件下的高混凝土坝体形最优化和复杂坝基加固处理方案最优化。坝工领域的这两个科学问题虽然侧重点不同，但却是相互影响、相辅相成、共成体系的。大坝是置身于自然地质和水环境中的人工建筑物，必须遵循自然规律、适应环境条件进行塑造（如准确获得和表征地质结构、材料参数，科学合理设计大坝结构和体形优化等），同时可以依照规律与法则有限改造自然环境和创造有利条件（如复杂坝基加固处理、坝体混凝土温控、施工过程控制等）。高混凝土坝的结构安全是坝体体形优化的前提条件，而体形优化则是实现坝体结构的稳定安全与工程投资最省的必要手段，是任何一个高混凝土坝工程达到安全、经济的重要设计环节。本书从试图构建理论和方法体系入手，选择了材料宏观力学参数表征、坝基破坏失稳机理、抗滑稳定分析方法和安全标准、大体积混凝土温控防裂、坝体体形优化等一系列重要科学问题进行系统研究，并结合工程贯穿于勘测、设计、施工乃至运行管理全过程。

本书的研究成果具有重要的理论意义和广泛的应用前景。首先，有助于从变形的观点加深对高混凝土坝的失稳机制及渐进变形演化规律的认识，从而丰富了高混凝土坝的安全稳定分析理论和方法；其次，基于大体积混凝土温度控制、开裂过程的研究帮助工程技术人员从理论上加深对大体积混凝土

设计、施工措施优化等方面的认识，并为大体积混凝土施工采取合理的控制措施提供理论依据和有效设计分析平台；再次，基于全有限元法和序列二次规划法（SQP）的多目标体形优化方法增强对大坝体形的优选能力。本书所形成的高混凝土坝结构安全及优化理论成果体系丰富了高混凝土坝结构安全与优化方面的学术思想，提高了理论研究水平，促进了设计理论与分析方法的发展和完善，解决了应用基础研究中的一些关键技术问题，同时在我国西南地区大型水电工程建设中也将发挥重要的作用，具有广阔的工程应用前景。

作者对水利水电工程领域的研究始于20世纪80年代，近30年来热爱教育教学，潜心科学研究，治学严谨，博学笃行，深得同事尊敬和学生爱戴。作者和研究团队为本书的编著也倾注了大量的心血。我祝贺这本专著的出版，并希望能得到同行的厚爱，同时也相信读者会从中受益，进一步促进坝工科技发展。

中国工程院院士、长江水利委员会原总工程师

郑守仁

2014年6月

# 前言



水工结构工程是力学、材料学及岩土工程交叉形成的一门学科。高混凝土坝结构安全与优化又是水工结构工程近 20 多年来形成的一个重要研究方向。笔者涉及高坝结构稳定问题是在 1989 年,与导师王宏硕、陆述远教授一起承担“八五”科技攻关项目子题“龙滩碾压混凝土重力坝渐进破坏过程稳定审查方法及其设计安全系数的探讨”。这一研究当时在国内刚刚起步,“八五”科技攻关的研究主要集中在采用等比例降强度方法研究重力坝渐进破坏过程。随后课题组承担的“九五”国家重点科技攻关项目“碾压混凝土筑坝技术研究”课题中的“高碾压混凝土重力坝设计方法的研究”专题的 01(1)子题“高碾压混凝土重力坝应力计算方法和极限承载能力研究”,在“八五”科技攻关成果的基础上,提出了适用于 200m 级高碾压混凝土重力坝的弹塑性有限元计算方法、高碾压混凝土重力坝的渐进破坏过程、破坏机理、失稳(稳定)准则和极限承载能力以及适用于 200m 级高碾压混凝土重力坝的稳定和强度审查公式及与之相配套的设计安全系数标准。在 1992 年批准的国家自然科学基金重点项目(批准号 59239171)课题“碾压混凝土高重力坝的静、动力安全度分析”又将研究范围扩展到了碾压混凝土重力坝的渗流、温控、动力等方面,全面地探讨了高混凝土重力坝的结构安全设计理论。2000 年以后,结合向家坝、金安桥、彭水等一批高重力坝的结构安全稳定分析,以及国家自然科学基金项目“基于自组织演化理论的重力坝坝基深层抗滑稳定理论研究”、国家自然科学基金项目“基于稳定临界准则的重力坝抗滑稳定审查方法及控制标准”、国家教委优秀青年教师基金项目“碾压混凝土重力坝安全可靠度理论及设计方法研究”、教育部骨干教师基金项目“基于随机场描述的碾压混凝土坝失效模式和可靠度分析”、湖北省自然科学基金项目“基于全有限元静、动力的拱坝体形多目标优化研究”、“混凝土重力坝设计规范(DL 5099)”专题修编课题《混凝土重力坝抗滑稳定机理和深层抗滑稳定设计表达式及分项系数专题研究》等 50 余项科研项目,深入研究了高混凝土坝的强度和稳定审查方法及与之相配套的设计安全系数标准、高混凝土坝分期施工和蓄水过程仿真分析方法、复杂坝基综合加固处理工程措施及其设计优化、高混凝土坝

可靠度理论与设计方法、岩土与混凝土类材料力学参数分析的随机—临界理论和方法、高混凝土坝施工期至运行期全过程温度场、温度应力场仿真分析及温控措施、高混凝土坝坝体体形优化方法等理论研究，建立了高混凝土坝结构安全与优化的理论模型，构建了高混凝土坝结构安全与优化的分析方法，提出了一套符合实际的高混凝土坝结构安全分析理论与方法体系、坝基稳定评价方法和标准，研究开发了高混凝土坝施工期至运行期全过程温控仿真平台、高混凝土坝体形优化方法及程序。本书是对 20 多年来研究团队在这一领域系列研究成果的系统介绍和阶段总结。

本书共分为 9 章，第 1 章为绪论，介绍高混凝土坝的结构安全与优化的内涵、研究思路、研究内容及研究方法；第 2 章论述了高混凝土坝宏观力学参数确定的理论方法；第 3、4 章论述了高混凝土坝结构安全分析的非线性数值分析方法，包括概率可靠度方法和非概率可靠度方法；第 5 章至第 7 章论述了高混凝土坝结构安全分析的机理、方法以及控制标准；第 8 章论述了高混凝土坝温控仿真理论及温控仿真平台；第 9 章论述了高混凝土坝体形优化理论及程序。

笔者所在的高坝结构课题研究组全体成员为本书的编著倾注了大量心血，笔者的研究生也为本书付出了辛勤的劳动，在此谨表示衷心感谢。笔者还要向本书所引用的文献作者致谢。最后还要感谢国家自然科学基金委、中国长江三峡开发总公司、中南勘测设计研究院、长江水利委员会长江勘测规划设计研究院、昆明勘测设计研究院、华东勘测设计研究院、成都勘测设计研究院、西北勘测设计研究院、湖北宣恩洞坪水电有限责任公司和乌江水电开发公司等单位在本书的应用研究方面所给予的大力支持！

**常晓林**

2013 年 8 月 28 日于武昌珞珈山

# 目 录

序

前言

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                     | 1  |
| 1.1 研究对象及研究意义 .....                | 1  |
| 1.2 研究现状及发展趋势 .....                | 3  |
| 1.2.1 高混凝土坝坝基失稳机理研究 .....          | 3  |
| 1.2.2 高混凝土坝抗滑稳定分析方法与控制标准研究 .....   | 3  |
| 1.2.3 高混凝土坝温度及徐变应力仿真分析方法研究 .....   | 5  |
| 1.2.4 高混凝土坝体形优化研究 .....            | 7  |
| 1.3 研究内容 .....                     | 9  |
| 1.4 研究思路 .....                     | 11 |
| 主要参考文献 .....                       | 12 |
| 第 2 章 高混凝土坝宏观力学参数研究 .....          | 15 |
| 2.1 大尺度坝工材料宏观抗剪强度的随机——临界研究 .....   | 15 |
| 2.1.1 大尺度材料性能的随机场概率模型 .....        | 15 |
| 2.1.2 基岩材料抗剪强度的随机参数估计方法 .....      | 16 |
| 2.1.3 逾渗 (Percolation) 理论的启示 ..... | 19 |
| 2.1.4 大面积软弱结构面的抗剪强度 .....          | 20 |
| 2.1.5 大体积岩土、混凝土的抗剪强度 .....         | 24 |
| 2.2 混凝土坝基面的宏观抗剪强度研究 .....          | 38 |
| 2.2.1 坝基面宏观屈服的临界条件 .....           | 38 |
| 2.2.2 混凝土坝基面的宏观抗剪强度 .....          | 40 |
| 2.2.3 坝基面宏观抗剪强度的数值求解方法 .....       | 42 |
| 2.3 大体积岩土混凝土宏观力学的计算机随机模拟方法研究 ..... | 48 |
| 2.3.1 大体积岩土混凝土宏观力学性质 .....         | 48 |
| 2.3.2 深厚覆盖层高压旋喷凝结体的宏观力学参数研究 .....  | 51 |
| 2.4 小结 .....                       | 54 |
| 主要参考文献 .....                       | 54 |
| 第 3 章 高混凝土坝坝基岩体力学模型研究 .....        | 56 |
| 3.1 坝基岩体力学模型概述 .....               | 56 |

|       |                      |    |
|-------|----------------------|----|
| 3.1.1 | Mohr-Coulomb 屈服准则    | 56 |
| 3.1.2 | 广义 Mises 屈服准则        | 57 |
| 3.1.3 | 坝基软弱结构面的各向异性屈服准则     | 58 |
| 3.1.4 | 节理力学模型               | 59 |
| 3.1.5 | 坝基岩体的本构模型            | 60 |
| 3.2   | 坝基稳定分析的广义 Mises 屈服准则 | 60 |
| 3.2.1 | Mohr-Coulomb 屈服准则的改进 | 61 |
| 3.2.2 | 广义 Mises 屈服准则精度的研究   | 63 |
| 3.3   | 坝基稳定分析的弹塑性损伤演化本构模型   | 75 |
| 3.3.1 | 弹塑性损伤演化的一般格式         | 76 |
| 3.3.2 | 损伤场的计算策略             | 77 |
| 3.3.3 | 损伤场的半解耦计算            | 78 |
| 3.4   | 小结                   | 79 |
|       | 主要参考文献               | 80 |

## 第 4 章 高混凝土坝结构安全的非线性随机有限元法及非概率可靠性分析

|       |                           |     |
|-------|---------------------------|-----|
| 4.1   | 高混凝土坝结构非线性随机有限元分析         | 81  |
| 4.1.1 | 非线性随机有限元的迭代格式             | 81  |
| 4.1.2 | 基于非线性随机有限元法的可靠度计算         | 84  |
| 4.1.3 | 算例                        | 85  |
| 4.2   | 随机渗流场分析                   | 87  |
| 4.2.1 | 确定性渗流场                    | 87  |
| 4.2.2 | 随机性渗流场                    | 88  |
| 4.3   | 基于集合理论凸模型的非概率分析方法         | 91  |
| 4.3.1 | 非概率凸集模型理论的鲁棒性准则           | 91  |
| 4.3.2 | Ben-Haim 鲁棒可靠性准则剖析        | 92  |
| 4.3.3 | 基于区间分析的非概率可靠性指标计算         | 96  |
| 4.3.4 | 可靠性非概率模型与概率模型的比较          | 98  |
| 4.4   | 高拱坝的非概率可靠性分析              | 99  |
| 4.4.1 | 基于随机有限元响应面法的非概率可靠度计算模型的建立 | 100 |
| 4.4.2 | 分析算例                      | 102 |
| 4.5   | 小结                        | 104 |
|       | 主要参考文献                    | 105 |

## 第 5 章 重力坝深层抗滑稳定设计表达式及分项系数研究

|     |                          |     |
|-----|--------------------------|-----|
| 5.1 | 概述                       | 106 |
| 5.2 | 深层抗滑稳定分析分项系数极限状态设计方法产生背景 | 107 |

|       |                                  |     |
|-------|----------------------------------|-----|
| 5.3   | 深层抗滑稳定分析的极限平衡法 .....             | 108 |
| 5.3.1 | 深层抗滑稳定传统计算方法与 99 版规范建议公式 .....   | 108 |
| 5.3.2 | 对 99 版规范建议公式的讨论 .....            | 109 |
| 5.3.3 | 基于 Sarma 法的安全系数广义计算公式 .....      | 110 |
| 5.3.4 | 双滑面等 $K'$ 法计算公式 .....            | 112 |
| 5.3.5 | 多滑面等 $K'$ 法计算公式 .....            | 112 |
| 5.4   | 坝基双滑面抗滑稳定可靠度分析和目标可靠指标确定 .....    | 114 |
| 5.4.1 | 极限状态方程 .....                     | 114 |
| 5.4.2 | 可靠指标计算 .....                     | 116 |
| 5.4.3 | 目标可靠指标确定 .....                   | 128 |
| 5.5   | 混凝土重力坝深层抗滑稳定极限状态设计表达式和分项系数 ..... | 128 |
| 5.5.1 | 分项系数的种类 .....                    | 129 |
| 5.5.2 | 重力坝深层抗滑稳定分项系数极限状态设计表达式 .....     | 130 |
| 5.5.3 | 标准值和分项系数 .....                   | 131 |
| 5.5.4 | 结构系数计算 .....                     | 131 |
| 5.5.5 | 成果分析 .....                       | 138 |
| 5.5.6 | 建议的设计表达式以及相应分项系数 .....           | 138 |
| 5.6   | 工程算例 .....                       | 140 |
| 5.7   | 小结 .....                         | 147 |
|       | 主要参考文献 .....                     | 147 |

## 第 6 章 高混凝土坝抗滑稳定分析的分项系数有限元法研究 .....

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 6.1   | 基于非线性有限元法的渐进破坏过程模拟 .....    | 149 |
| 6.2   | 分项系数有限元法 .....              | 151 |
| 6.3   | 基于非线性有限元法的系统整体失稳判据 .....    | 153 |
| 6.3.1 | 塑性屈服区贯通法 .....              | 153 |
| 6.3.2 | 位移突变法 .....                 | 153 |
| 6.3.3 | 有限元迭代不收敛判据 .....            | 154 |
| 6.3.4 | 变形稳定判据 .....                | 155 |
| 6.3.5 | 能量法 .....                   | 155 |
| 6.4   | 影响重力坝深层抗滑稳定分析的因素研究 .....    | 155 |
| 6.4.1 | 参与降强度参数的区域对坝基稳定性的影响分析 ..... | 156 |
| 6.4.2 | 弹性模量和泊松比对坝基稳定性的影响分析 .....   | 160 |
| 6.5   | 运用分项系数有限元法的算例分析 .....       | 166 |
| 6.6   | 小结 .....                    | 168 |
|       | 主要参考文献 .....                | 168 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| <b>第 7 章 高混凝土重力坝坝基失稳机理及控制标准研究</b> | 170 |
| 7.1 高混凝土重力坝均质坝基的失稳机理研究            | 170 |
| 7.1.1 计算分析方法                      | 170 |
| 7.1.2 坝基破坏过程及失稳机理分析               | 173 |
| 7.2 重力坝坝基失稳准则以及稳定审查方法研究           | 178 |
| 7.2.1 坝基失稳形态                      | 178 |
| 7.2.2 坝基稳定设计的“准弹性”准则              | 180 |
| 7.2.3 “准弹性”准则的公式及算例分析             | 181 |
| 7.3 高碾压混凝土重力坝的失稳机理研究              | 183 |
| 7.4 高混凝土重力坝的稳定临界准则及设计安全系数研究       | 186 |
| 7.4.1 稳定临界准则公式                    | 187 |
| 7.4.2 等比例降强度稳定临界准则公式的设计安全系数研究     | 188 |
| 7.4.3 不等比例降强度稳定临界准则公式的设计安全系数研究    | 192 |
| 7.5 小结                            | 195 |
| 主要参考文献                            | 196 |
| <b>第 8 章 高混凝土坝温度控制理论及温控仿真分析方法</b> | 197 |
| 8.1 高混凝土坝水库水温数值分析方法               | 197 |
| 8.1.1 水库水温一维数值分析模型                | 197 |
| 8.1.2 水库水温二维数值分析模型                | 200 |
| 8.1.3 考虑淤沙影响的二滩水库水温数值分析           | 201 |
| 8.1.4 考虑淤沙影响的水库水温对封拱温度及运行期坝体应力的影响 | 204 |
| 8.2 高混凝土坝温度场及温度应力分析理论             | 206 |
| 8.2.1 温度场计算的基本原理                  | 206 |
| 8.2.2 混凝土坝弹性徐变温度应力场计算方法           | 211 |
| 8.2.3 温度场及温度应力全过程仿真流程             | 215 |
| 8.3 大体积混凝土非线性徐变模型理论               | 217 |
| 8.3.1 混凝土非线性徐变模型                  | 217 |
| 8.3.2 基于非线性徐变模型的温度应力仿真计算方法        | 218 |
| 8.3.3 混凝土非线性徐变模型的试验验证             | 220 |
| 8.3.4 大体积混凝土气温骤降条件下的表面温度应力计算      | 222 |
| 8.4 大体积混凝土温度应力分析的时间非线性弥散裂缝模型      | 224 |
| 8.4.1 单个时步内温度应力的增量                | 225 |
| 8.4.2 考虑时间效应的混凝土本构模型和破坏准则         | 225 |
| 8.4.3 混凝土时间非线性弥散裂缝模型              | 227 |
| 8.5 大体积混凝土温度裂缝扩展分析的无网格方法          | 228 |
| 8.5.1 热传导问题的无网格法控制方程              | 228 |

|       |                               |     |
|-------|-------------------------------|-----|
| 8.5.2 | 无网格法求解瞬态热传导的过程 .....          | 229 |
| 8.5.3 | 混凝土温度裂缝扩展过程模拟 .....           | 230 |
| 8.5.4 | 数值算例验证 .....                  | 232 |
| 8.6   | 高拱坝施工期横缝接触模型及横缝开合度模拟方法 .....  | 234 |
| 8.6.1 | 接触摩擦算法 .....                  | 235 |
| 8.6.2 | 基于扩展拉格朗日算法的接触单元 .....         | 236 |
| 8.6.3 | 横缝三维有厚度接缝单元 .....             | 237 |
| 8.6.4 | 接触-接缝复合单元格式 .....             | 239 |
| 8.7   | 基于可靠度理论的混凝土坝随机开裂模型及安全评价 ..... | 240 |
| 8.7.1 | 混凝土坝的随机开裂模型 .....             | 240 |
| 8.7.2 | 大体积混凝土裂缝的可靠度分析算例 .....        | 245 |
| 8.8   | 小结 .....                      | 247 |
|       | 主要参考文献 .....                  | 248 |

## 第9章 高混凝土坝体形优化理论研究 .....

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 9.1   | 概述 .....                 | 253 |
| 9.2   | 优化原理和方法 .....            | 253 |
| 9.2.1 | 最优化问题的数学模型 .....         | 253 |
| 9.2.2 | 最优化问题的分类 .....           | 254 |
| 9.2.3 | 最优化问题的求解方法概述 .....       | 254 |
| 9.3   | 混凝土坝体形优化中常用的优化求解算法 ..... | 256 |
| 9.3.1 | 复合形法 .....               | 256 |
| 9.3.2 | 序列二次规划法 (SQP 法) .....    | 257 |
| 9.4   | 常态混凝土重力坝体形优化方法 .....     | 260 |
| 9.4.1 | 优化变量 .....               | 260 |
| 9.4.2 | 目标函数 .....               | 260 |
| 9.4.3 | 约束条件 .....               | 260 |
| 9.4.4 | 荷载计算 .....               | 260 |
| 9.4.5 | 抗滑稳定和应力 .....            | 261 |
| 9.5   | 碾压混凝土重力坝体形优化方法 .....     | 261 |
| 9.5.1 | 碾压重力坝坝体断面优化设计的数学模型 ..... | 262 |
| 9.5.2 | 碾压重力坝坝体断面优化设计的程序框图 ..... | 264 |
| 9.6   | 混凝土拱坝体形优化方法 .....        | 265 |
| 9.6.1 | 混凝土拱坝体形优化设计的数学模型 .....   | 266 |
| 9.6.2 | 拱坝有限元分析的自动化实现 .....      | 268 |
| 9.6.3 | 拱坝优化程序设计 .....           | 278 |
| 9.7   | 小结 .....                 | 279 |
|       | 主要参考文献 .....             | 280 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究对象及研究意义

高混凝土坝结构安全分析与优化以“九五”国家重点科技攻关项目子题《高碾压混凝土重力坝应力计算方法和极限承载能力研究》、国家自然科学基金重点项目《碾压混凝土高重力坝的静、动力安全度分析》、国家自然科学基金项目《基于自组织演化理论的重力坝坝基深层抗滑稳定理论研究》、国家自然科学基金项目《基于稳定临界准则的重力坝抗滑稳定审查方法及控制标准》、国家教委优秀青年教师基金项目《碾压混凝土重力坝安全可靠度理论及设计方法研究》、教育部骨干教师基金项目《基于随机场描述的碾压混凝土坝失效模式和可靠度分析》、湖北省自然科学基金项目《基于全有限元静、动力的拱坝体形多目标优化研究》、“混凝土重力坝设计规范 (DL 5099)”专题修编课题《混凝土重力坝抗滑稳定机理和深层抗滑稳定设计表达式及分项系数专题研究》、中国水电顾问集团科技攻关项目课题《非线性有限元法重力坝深层抗滑稳定和基础处理研究》，以及重点工程科研专题项目《向家坝水电站大坝深浅层抗滑稳定分析及加固方案研究》、《金安桥水电站重力坝坝基深浅层抗滑稳定及加固方案研究》、《小湾高拱坝施工期温度仿真及横缝开合度三维有限元仿真研究》、《乌江构皮滩水电站双曲拱坝大坝温度应力仿真分析》、《大岗山水电站双曲拱坝徐变温度应力仿真分析》、《金安桥水电站碾压混凝土重力坝温度及应力仿真分析》、《乌江彭水碾压混凝土重力坝温度仿真分析研究》等 50 余项科研项目为背景，通过开展高混凝土坝的弹塑性有限元应力计算方法，高坝及坝基的渐进破坏过程、破坏机理、失稳准则和极限承载能力，高混凝土坝的强度和稳定审查方法及与之相配套的设计安全系数标准，高混凝土坝分期施工和蓄水过程仿真分析方法，复杂坝基综合加固处理工程措施及其设计优化，高混凝土坝可靠度理论与设计方法，岩石、混凝土类材料力学参数分析的随机—临界理论和方法，高混凝土坝施工期至运行期全过程温度场、温度应力场仿真分析及温控措施，高混凝土坝坝体体形优化方法等理论研究，模拟高混凝土坝在复杂条件下的结构应力变形演化规律，建立高混凝土坝结构安全与优化的理论模型，构建高混凝土坝结构安全与优化的分析方法，结合向家坝、金安桥、小湾、构皮滩、大岗山等大型水电工程，提出一套符合实际的高混凝土坝结构安全分析理论与方法体系、坝基稳定评价方法和标准、高混凝土坝施工期至运行期全过程温控仿真平台、高混凝土坝体形优化方法及程序。

本书中的“高混凝土坝”包括三重意义：一是指坝高为 200 米级及以上的混凝土重力坝和拱坝；高混凝土坝在设计理念、施工技术和科学问题等方面与 100 米级的混凝土坝会发生质的差别。二是指由于坝高的增加随之带来的一系列结构分析方法的变革。对于低坝



常用的稳定分析方法如刚体极限平衡法不足以完全揭示高混凝土坝基的变形过程和失稳机理,而对于低坝常用的应力分析方法如材料力学法和拱梁分载法也不足以揭示高混凝土坝体和坝基的非线性变形过程和开裂机理,虽然在目前的高混凝土重力坝和高拱坝的设计过程中都不同程度地采用了先进的数值分析方法如有限元法进行坝体坝基的稳定和应力变形仿真分析,但是现行的设计规范却并没有提供与之配套的相应控制标准。三是指 200 米级及以上的高混凝土坝在建设安全风险、结构安全评价准则等方面与低坝有较大的区别。

本书中的“结构安全”是指高混凝土坝运行期内的结构稳定安全和施工期至运行期全过程的温控防裂安全,“结构优化”是指高混凝土坝在复杂条件下的体形优化和复杂坝基加固处理优化。

高混凝土坝结构安全与优化理论一直是坝工界的研究热点问题。随着我国西部大开发政策的启动,龙滩、小湾、溪洛渡、向家坝、锦屏一级、构皮滩、金安桥、大岗山等一批大型、特大型水电站当时已开工兴建或即将开工。这些工程中的高坝岩基稳定、大体积混凝土温度控制、结构体形优化等问题复杂。例如,向家坝水电站最大坝高 162m,坝基岩体中发育缓倾下游的软弱岩层、夹层和岩层层面,构成明确的坝基潜在滑移面,不利于大坝抗滑稳定,需要对坝基可利用岩体、抗滑稳定边界条件及力学参数作进一步的分析复核,考虑施工条件和处理效果,进一步研究坝基处理设计方案,需要用更先进、更精确的方法进行大坝和坝基结构安全分析评价。小湾水电站坝高 294.5m,建成后将成为目前世界上高度第二的拱坝,坝体混凝土最高强度等级  $C_{180} 45$ ,不设纵缝,通仓浇筑面积近  $1900\text{m}^2$ ,最大底宽达 70m,增大了因浇筑机械能力产生施工冷缝的几率,加大了温控难度,且拱坝建成投入运行后没有条件进行坝体大面积检修,对混凝土抗裂要求高。目前世界上最高的锦屏一级高拱坝(305m)也存在同样的温控难题。以龙滩为代表的高碾压混凝土重力坝和以小湾为代表的高拱坝,坝体的材料分区较多,其体形优化问题直接关系到大坝的稳定和工程投资成本,提出一个满足安全、经济的最优体形方案具有重大的工程实用价值。

要解决这些重大工程问题,必须在基础理论上有所突破,在关键技术上有所创新。本书正是瞄准了这方面的理论发展要求和这些重大工程的应用需要,经过课题组二十多年系统科学研究的逐步积累,在反复凝练的基础上形成的系列研究成果。

本书试图在理论意义上和广泛的应用层面上都能够起到借鉴和参考作用。首先,有助于从变形的观点加深对高混凝土坝的失稳机制及渐进变形演化规律的认识,从而丰富了高混凝土坝的安全稳定分析理论和方法;其次,基于大体积混凝土温度控制、开裂过程的研究帮助工程人员从理论上加深对大体积混凝土设计、施工措施优化等方面的认识,并为大体积混凝土施工采取合理的控制措施提供理论依据和有效设计分析平台;再次,基于全有限元法和序列二次规划法(SQP)的多目标体形优化方法增强了对大坝体形的优选能力。本书所形成的高混凝土坝结构安全及优化理论成果体系可以丰富高混凝土坝结构安全与优化方面的学术思想,提高理论研究水平,促进设计理论与分析方法的发展和完善,解决基础研究中的一些关键技术问题,同时在我国西南地区大型水电工程建设中也将发挥重要的作用,具有广阔的工程应用前景。



## 1.2 研究现状及发展趋势

### 1.2.1 高混凝土坝坝基失稳机理研究

高混凝土坝坝基稳定问题以重力坝坝基研究居多。在坝基面抗剪强度方面,王宏硕等<sup>[1]</sup>通过线弹性有限元计算和光弹试验成果,指出混凝土与基岩胶接面上的应力分布是极不均匀的,在总结胶结面应力分布规律的基础上,提出了真实抗剪比例极限强度的概念。林伟平等<sup>[2]</sup>通过现场直剪试验,系统研究糙度、混凝土强度和正应力对胶结面抗剪强度的影响,提出对混凝土与基岩胶结面抗剪强度进行评价的方法。段亚辉(1997)采用 Goodman 节理单元模拟混凝土与基岩胶接面研究胶结面的真实抗剪断强度,提出了一些有意义的参考意见。

在坝基破坏机理方面,黎保琨(1979)在模型试验基础上将具有软弱夹层岩基失稳分为有抗力型破坏和无抗力型破坏两种,并概化坝基的失稳曲线。沈文德、沈保康(1983)分析有软弱夹层的坝基在抗力体破坏区与夹层面的破坏区相联后形成一个连续的滑动面时,达到极限失稳平衡状态。常晓林等(1989)采用非线性有限元法追踪均质坝基重力坝坝踵裂纹的扩展情况时,模拟大坝的整个破坏过程,认为均质坝基破坏的主要表现为坝踵区裂缝的扩展和坝趾附近岩体的剪切屈服,当塑性屈服区在坝基浅层形成上下贯通时,沿剪切屈服滑移导致整体失稳。杜俊慧等(1994)采用非线性有限元法研究了重力坝沿坝基面的破坏过程,重点研究了坝体与坝基弹模比及强度参数对破坏规律的影响,认为坝的失稳过程主要是沿胶结面剪切屈服区的发展过程。段亚辉、赖国伟(1995)采用强度储备系数法对碾压混凝土重力坝失稳进行探讨,提出坝体沿建基面失稳破坏是从坝趾剪切屈服开始,向上游扩展的过程。刘建、冯夏庭(2002)通过建立三峡工程左岸厂房坝段坝基地质概化模型,采用物理模拟方法对其深层稳定问题进行了系统研究,获得了1~5号坝段的滑动破坏机理和稳定安全系数,并提出了厂坝联合的加固处理措施。

法国的 Malpasset 拱坝和中国的梅花拱坝是两座发生瞬间溃坝的拱坝,也引起了人们对拱坝失稳的重视,汝乃华(1988)从梅花拱坝溃坝谈起,研究拱坝上滑破坏的条件,指出只有当坝体较薄、曲率半径较大、坝基岩体存在可能的滑动面、岸坡滑动面坡度平缓的情况才可能发生上滑失稳,认为法国 Malpasset 拱坝的溃坝也属于上滑破坏。王光纶(1998)认为这种“上滑”实际上是略带向上的向下滑动,并分析坝高、河谷形状、拱圈曲率和坝体厚度对这种失稳的影响。陈正作(1996)在研究地震对拱坝稳定性的影响时,也指出拱坝存在沿建基面向上滑动失稳的可能性。任青文(2002)认为拱坝沿基面的稳定性问题实质上是强度破坏问题。

### 1.2.2 高混凝土坝抗滑稳定分析方法与控制标准研究

长期以来,刚体极限平衡法在高混凝土坝抗滑稳定分析中占据主导地位,虽然这种方法比较粗糙,忽略了很多因素,但是其力学概念比较清楚,方法比较简单,实践经验也很丰富,因而得到广泛应用。采用刚体极限平衡法进行抗滑稳定计算可归纳为以下两种:一种是按抗剪强度进行抗滑稳定计算,即只考虑摩擦力;另一种是按抗剪断强度进行抗滑稳



定计算,即考虑了摩擦力和凝聚力的共同作用。20世纪50年代以前,抗滑力仅考虑混凝土与坝基面的摩擦力,要求 $K=fW/P>1$ 。后来,考虑到坝基面上的凝聚力是客观存在的,将凝聚力计入到坝体抗滑能力计算中,其抗滑稳定安全系数表达式为 $K'=\frac{f'W+c'A}{P}$ ,而要求 $K'\geq 2.5\sim 4$ 。张津生(2005)就重力坝深层抗滑稳定问题,对刚体极限平衡法的选用、强度参数取值、安全判据及裂隙连通率等问题进行讨论。实际上,坝基的失稳机理较为复杂,需要与应力问题一并考虑,而不是单纯的滑动问题。涂劲(2003)认为刚体极限平衡法只适用于完全由剪切滑动引起的失稳问题,对于不利于滑动的结构面,刚体极限平衡法可能给出过于乐观的结果,当坝体及地基的最终破坏是因某些岩体强度不足而被压碎或拉裂而引起滑动时,需要考虑岩体变形与滑动失稳的耦合作用。

随着计算技术的发展,有限元法已成为解决结构问题的重要手段,在重力坝抗滑稳定分析中也得到大量使用。有限元核算抗滑稳定安全度的指标有三种:整体安全系数、超载系数、强度储备系数。整体安全系数可理解为整个滑移面上总抗滑力与总剪力之比,目前还没有对安全系数要求的明确规定;对于超载系数,不少人认为这种超载是有限的,数倍的超载实际上是不大可能的,缺乏物理含义;强度储备系数概念较清楚,但不是大坝失稳的全部原因,对于 $f$ 值降低几倍也不完全符合实际,而 $c$ 值是可以完全丧失的。

衡量大坝是否稳定,需要规定标准,即失稳(或稳定)准则。目前已经提出来的有:点破坏准则、整体破坏准则、极限变形准则和稳定临界准则。点破坏准则以坝体坝基内任一点都不出现剪切破坏作为稳定的标准。极限变形准则以保证坝体或坝基能正常工作的极限变形值作为稳定的标准。稳定临界准则指的是,随着荷载的增加,大坝出现从点破坏到整体失稳破坏的破坏过程中存在发生质的变化转折的临界状态。研究表明,在这一破坏过程中,有一临界点,在这点之前,坝处于稳定阶段,表现在随荷载增加屈服区的扩展是缓慢的稳定的。过了这点以后,屈服点的扩展急骤加快,直至发展到整体失稳破坏。把这一临界点作为衡量稳定的设计标准,因此称之为稳定临界准则。

对于坝基安全稳定性的统一量化控制标准,王宏硕等(1985)提出以“最不利点仍未达到屈服状态”作为稳定准则,提出“真实弹性抗剪强度”,给出抗滑稳定审查的“弹性抗剪强度公式”,并说明在不同的弹模的地基上应采用不同的安全系数。常晓林、陆述远(1991)在重力坝基岩的破坏过程和失稳形态的基础上,提出“准弹性”准则,并导出相应的计算公式。赵代深(1996)、苗琴生(1996)采用二维有限元方法对典型重力坝断面进行了分析,提出了坝踵拉应力区相对宽度的应力控制标准,但对坝基的稳定审查未做研究。常晓林等(1996,1998)根据碾压混凝土重力坝破坏机理,提出了以准弹性临界作为稳定临界准则的设计极限状态,并导出了以准弹性强度储备系数为设计安全指标的审查公式;但遵照该文方法的准弹性强度储备系数计算过程较为复杂,限制了它的推广应用。孙恭尧等(2001)根据以应变空间表述的弹塑性增量理论,提出以能量准则作为混凝土重力坝与坝基岩石系统失稳的判别准则,采用稳定性分析方法来研究重力坝的承载能力。

1996年武汉大学高坝结构研究组在完成的国家自然科学基金重点项目《碾压混凝土高重力坝的静、动力安全度分析》中,提出了碾压混凝土重力坝的真实抗剪强度理论,根据重力坝的渐进破坏过程建立了准弹性稳定准则、失稳安全审查方法以及允许安全系数要



求,丰富并完善了重力坝基础抗滑稳定研究的理论方法。此后1996~1999年国家“九五”科技攻关项目集中组织了相关高校和科研单位,以龙滩高碾压混凝土重力坝为依托对重力坝应力计算方法和极限承载能力进行了专题研究,研究方法包括弹塑性增量理论、非线性弹性理论和非线性断裂理论,这几种计算方法能够更为精确地反映坝体材料的性质和重力坝的应力状态,但要求的材料参数较多,计算过程也比较复杂。此外,重点研究了基于应变空间表述的弹塑性本构理论,考虑材料软化塑性性质采用增量求解的计算方法,克服了一般应力空间中软化塑性本构方程加卸载判别的困难。该研究成果对提高重力坝应力和稳定的研究水平起到了大力推动的作用。

随着可靠度理论的发展,一些学者采用可靠度方法来研究重力坝抗滑稳定(李守义,1998;兰仁烈,2003),但是由于缺乏的统计资料,使可靠度方法的应用受限。我国现行重力坝设计规范(DL 5108—1999)规定使用一种简化的可靠度方法——分项系数极限状态表达式来进行结构和地基的稳定性验算。然而,对于规范关于深层抗滑稳定的设计规定,陈祖煜(2000)、曹去修(2003)、周伟等(2004)提出规范建议公式存在物理概念上的错误和应用上的混乱,亟待改进。但这种采用分项系数处理结构自变量不确定性的思想值得借鉴。

此外,DDA(张国新,2004)、块体单元法(王瑞骏,1998)、突变理论(顾冲时,1998)、刚塑性理论(王志良,1979)等方法也被用于坝基的稳定分析,由于缺乏相应的评判标准,其应用也是有限的。

### 1.2.3 高混凝土坝温度及徐变应力仿真分析方法研究

大坝温度场及温度应力全过程仿真计算必须模拟复杂的施工和运行过程,如逐层浇筑、逐步封拱、分期蓄水、气温和水温变化、材料特性随时间的变化等,模拟这样一个极其复杂的动态过程,无论在计算技术或在编程技术上难度极大,与一般静态的全量有限元法有本质上的不同。为了工程应用,国内外都进行了混凝土温度的计算研究。美国加州大学的威尔逊(E. L. Wilson)教授在1968年为美国陆军工程师团研制出可模拟大体积混凝土结构分期施工温度场的二维有限元程序DOT-DICE,并用于德沃歇克(Dworkshak)坝温度场的计算。随着筑坝技术在我国迅速发展,众多的科研工作者对大体积混凝土温度应力和温度控制进行了大量的研究工作,取得了丰硕的成果。研究工作大多围绕解决仿真计算规模和精度矛盾、计算速度、水管冷却的模拟方法和边界条件的处理等问题。

为了方便而准确地计算混凝土坝的温度场和温度应力,朱伯芳院士(1994,1995,1998)提出了仿真并层算法、分区异步长算法,用以解决精度和效率的矛盾。并层算法主要针对温度应力仿真分析,根据混凝土变形特性与龄期的不同而逐步把几个浇筑层合并起来,计算中充分考虑了分层施工的实际影响,每个浇筑层都经历了从单层计算到并层计算的过程,总体减少了计算,计算工作极大简化。分区异步长算法主要是为了解决计算时段的取值问题,在温度急剧变化的新浇混凝土区域采用较小的时间步长,而在整个求解区域采用较大的时间步长,从而大大提高了计算效率。结合碾压混凝土的施工特点,王建江和陆述远(1995,1996)提出了温度场和温度徐变应力有限元分析的非均匀单元法,以含有不同龄期的碾压混凝土材料的较大单元代替较小的均匀单元,有效地减少了单元数和计算时间。李守义(1997)、陈尧隆(1998)、解宏伟(2004)在解决坝体快速施工的问题中采用了一种将两层或多层单元并于一层单元的“互层单元”,并在此基础上提出了“三维有