

杨璐 金峰 著

水工混凝土结构中的 数值计算方法与实例



科学出版社

水工混凝土结构中的数值 计算方法与实例

杨璐 金峰 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据实际观测资料对某拱坝从施工、蓄水、运行整个过程进行了有限元仿真分析。数值模拟分析中较准确地模拟了库水温度与气温的实际变化过程,氧化镁的膨胀模型较合适地反映了拱坝氧化镁混凝土实际的自生体积变形过程。对溢流坝段温度场与渗流场进行耦合仿真计算,施加孔隙水压力进行坝体渗流分析,并采用子模型技术局部分析坝踵排水孔渗流情况,采用自定义单元子程序法与常规有限元法分别进行计算。为了研究附加质量法在三维重力坝抗震分析中的应用,编写三维附加质量单元 UEL 子程序模块,实现了三维模型中结点附加质量的快速施加,并通过模拟 Koyna 混凝土重力坝地震工程验证子程序的正确性。对混凝土大坝工程的研究具有重要的理论意义和工程意义。

本书可作为水利工程、力学、材料、土木、机械及相关专业研究生的教学参考书,也可供高年级本科生、一般工程技术人员和相关领域研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工混凝土结构中的数值计算方法与实例/杨璐,金峰著. —北京:科学出版社, 2014.12

ISBN 978-7-03-042767-0

I. ①水… II. ①杨… ②金… III. ①水工结构-混凝土结构-数值计算
IV. ①TV331

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014) 第 292699 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:钟 洋
责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 14 插页: 4

字数: 270 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

本书是一本研究水工混凝土结构中的数值计算方法和构件力学行为的专著。随着计算技术和实验技术的发展,混凝土在重要且复杂工程结构中的应用日益增多,相关科学研究成果层出不穷。但是系统介绍混凝土塑性损伤计算与实验理论方法的书籍目前不算多。本书的目的是要弥补这一不足。

大部分混凝土在水化反应过程中的自生体积变形是收缩的,而在混凝土水泥中掺入氧化镁可产生膨胀性的自生体积变形,有利于在大体积混凝土内产生有效的压应力,从而改善混凝土的抗裂性能。广东省阳春市长沙拱坝是国内外全面采用外掺氧化镁不分横缝快速筑拱坝新技术建成的第一座拱坝。

本书提出一种在混凝土经历复杂变温过程下的氧化镁混凝土自生体积变形的模型;由恒温养护状态下的试验数据拟合一定氧化镁掺率下混凝土自生体积变形的九个参数,然后用递推的方法求得任意时期的自生体积变形。

本书根据实际观测资料对长沙拱坝从施工、蓄水、运行整个过程进行了有限元仿真分析。数值模拟分析中较准确地模拟了库水温度与气温的实际变化过程,氧化镁的膨胀模型较合适地反映了长沙拱坝氧化镁混凝土实际的自生体积变形过程,位移计算结果符合坝体实际位移状况。在采用掺入氧化镁的工程措施后,混凝土自生体积膨胀对拱坝应力状态有一定的改善效果。结果表明:长沙拱坝成功地运用了外掺氧化镁微膨胀混凝土筑坝技术,降低了高拉应力数值,缩小了拉应力的范围,从而有助于简化温控、加快施工速度。在应用外掺氧化镁筑坝技术的拱坝设计中,可以通过有限元仿真分析,优化设计,改善坝体应力状态,以达到防裂、快速筑坝的要求,该技术在工程建设中有较广泛的应用前景。

为了研究附加质量法在三维重力坝抗震分析中的应用,基于 ABAQUS 有限元软件二次开发功能,编写三维附加质量单元子程序 UEL,实现了三维模型中结点附加质量的快速施加,并通过模拟 Koyna 混凝土重力坝地震工程验证子程序的正确性。计算结果基本符合 Koyna 震害记录,说明子程序 UEL 的开发是正确可靠的,用该二次开发方法解决此类三维水体-结构相互作用问题是可行的。

本书的出版,对有关研究人员及工程技术人员具有重要的参考价值。本书可供水利工程、岩土工程、土木工程、能源开采等相关专业的研究生、高年级本科生、一般工程技术人员和相关领域研究人员参考。期望本书在混凝土材料和结构的研究与应用中发挥重要的作用。

本书的主要内容是作者近年来在国家自然科学基金课题(项目编号:11102118)

支持下的理论和实验研究成果。

感谢清华大学硕士研究生罗小青以及沈阳工业大学计算力学研究所的硕士研究生李士民、刘东博、孔令娟、王志坤在本书部分章节写作过程中提供的帮助。

杨 璐

2014 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 坝体混凝土裂缝的工程实例	3
1.2.1 丹江口水利枢纽	3
1.2.2 野牛嘴拱坝	3
1.2.3 卡布里尔拱坝	4
1.3 仿真分析的发展	5
1.4 微膨胀混凝土研究现状	7
1.4.1 混凝土的自生体积变形	7
1.4.2 氧化镁混凝土	8
1.5 微膨胀筑坝技术的工程应用	10
1.5.1 白山拱坝	10
1.5.2 青溪水电站和飞来峡水电站	10
1.5.3 水口水电站	10
1.5.4 长沙拱坝	11
1.6 混凝土高坝强震实例	11
1.6.1 新丰江工程	11
1.6.2 宝珠寺工程	12
1.6.3 沙牌工程	12
1.7 混凝土大坝抗震研究	13
第 2 章 氧化镁混凝土膨胀及温度效应原理	15
2.1 引言	15
2.2 施工期温度效应原理	15
2.2.1 水泥水化热	15
2.2.2 日照温升	17
2.2.3 对流传热	17
2.3 运行期库水温度计算原理	18
2.4 本章小结	19
第 3 章 孔压渗流原理	20
3.1 引言	20

3.2 渗流原理	20
3.2.1 渗流研究的主要内容	20
3.2.2 渗流基本定律	20
3.2.3 混凝土渗流	33
3.3 本章小结	34
第 4 章 应力场原理	35
4.1 氧化镁混凝土膨胀原理	35
4.2 氧化镁混凝土应力场有限单元法	35
4.2.1 氧化镁混凝土自生体积变形特点	37
4.2.2 考虑温度历程效应的氧化镁混凝土膨胀模型	37
4.2.3 当量龄期法	39
4.3 仿真应力场	40
4.3.1 温度应力	40
4.3.2 仿真应力	41
4.4 验算实例	43
4.4.1 实际温度变化的膨胀过程	43
4.4.2 基坑回填混凝土	44
4.5 本章小结	47
第 5 章 长沙拱坝仿真分析及与实测结果对比	49
5.1 长沙拱坝简介	49
5.2 计算条件	51
5.2.1 材料参数	52
5.2.2 温度边界	53
5.2.3 结构分析	55
5.2.4 网格剖分	55
5.3 温度场变化过程	56
5.3.1 温度历程对比	57
5.3.2 典型部位温度过程	61
5.3.3 温度等值线	62
5.4 MgO 膨胀量过程	65
5.5 位移过程	72
5.6 本章小结	80
第 6 章 长沙拱坝裂缝发生原因及应力变化	81
6.1 下游面拱冠处裂缝	81
6.1.1 竖向裂缝	81

6.1.2	水平裂缝	84
6.1.3	下游面坝肩裂缝	86
6.2	应力变化	88
6.2.1	典型点应力过程	88
6.2.2	坝体应力变化	91
6.3	本章小结	107
第 7 章	外掺氧化镁对拱坝应力与位移的影响	109
7.1	应力	109
7.1.1	x 向应力	109
7.1.2	z 向应力	117
7.1.3	剪应力	124
7.2	位移过程	127
7.3	本章小结	129
第 8 章	水库运行期仿真模拟	130
8.1	引言	130
8.2	子模型技术	130
8.3	运行期温度场仿真计算	132
8.3.1	仿真模型及有限元模型	132
8.3.2	工程环境及材料设置	133
8.3.3	库水温度计算	133
8.4	运行期流固耦合仿真计算	134
8.4.1	模型及材料布置	135
8.4.2	非饱和渗流问题中的边界条件	135
8.4.3	耦合问题概述	136
8.4.4	排水孔局部渗流自定义单元设计	136
8.4.5	溢流坝段渗流场计算	139
8.5	温度场模拟结果分析	140
8.6	应力场及渗流场模拟结果分析	142
8.6.1	静水压力作用下温度应力模拟结果提取与分析	142
8.6.2	温度场与渗流场顺序耦合模拟结果提取与分析	144
8.6.3	排水口子模型计算结果提取与分析	145
8.7	本章小结	147
第 9 章	重力坝动力分析理论	148
9.1	抗震设计理论的发展概况	148
9.1.1	静力理论阶段	148

9.1.2 反应谱理论阶段	148
9.1.3 动力理论阶段	149
9.1.4 基于性态的抗震设计理论阶段	149
9.2 结构动力方程的建立	149
9.2.1 一维地震动输入时的动力方程	149
9.2.2 多维地震动输入时的动力方程	150
9.2.3 多点地震动输入时的动力方程	151
9.3 重力坝的有限元动力分析	152
9.3.1 有限元法概述	152
9.3.2 有限元动力分析的时程分析法	153
9.4 附加质量法	155
9.4.1 附加质量法简介	155
9.4.2 附加质量法计算公式	156
9.5 混凝土重力坝在地震作用下的动力响应分析	157
9.5.1 计算模型及材料计算参数	157
9.5.2 静力分析	158
9.5.3 动力时程分析	161
第 10 章 Koyna 震害工程验证	166
10.1 引言	166
10.2 Koyna 工程概况	166
10.3 计算模型	167
10.4 计算参数	167
10.5 加载地震波	168
10.6 模态分析	169
10.7 时程分析	170
10.7.1 位移时程曲线	170
10.7.2 应力时程曲线	173
10.8 损伤分析	175
10.9 本章小结	176
第 11 章 不同地震波输入方式下重力坝动力响应研究	177
11.1 工程简介	177
11.2 计算模型	178
11.3 本构模型	179
11.4 地震波	180
11.4.1 地震动输入机制	180

11.4.2 地震波选取	181
11.5 地震波输入方式对比	184
11.5.1 模拟方案	184
11.5.2 结果分析	184
11.6 多波验算	191
11.6.1 模拟方案	191
11.6.2 结果分析	192
11.7 本章小结	194
第 12 章 重力坝折坡点高度对其抗震性能的影响	195
12.1 震害工程实例简介	195
12.2 计算方案	195
12.3 模型计算与分析	196
12.3.1 折坡点处应力分析	196
12.3.2 坝顶位移分析	199
12.3.3 拉伸损伤分析	204
12.4 本章小结	205
参考文献	206
索引	213
彩图	

第1章 绪 论

1.1 引 言

水和能源是人类社会发展的重要物质基础,直接关系到社会和国民经济的可持续发展、人民物质和精神生活水平的提高与改善,同时也是影响中国经济社会发展的重要制约因素^[1-3]。中国人均水资源极为短缺,仅为世界人均占有量的 1/4,据世界银行统计,在世界 153 个国家中排行第 88 位^[4]。所以,加强水库大坝的建设以尽可能调节利用汛期洪水,是水资源的合理配置和利用、抗旱防洪减灾、大江大河治理、水环境保护与水生态修复等的战略要求^[5,6]。

20 世纪以来,世界坝工建设的发展非常迅速,随着科学技术的进步,我国水利水电事业得到了蓬勃的发展,新中国成立以来,共建造了 8.7 万多座堤坝,形成了大小不同的水库群,数量居世界第一,这些工程在防洪、发电、灌溉等诸多方面产生了巨大的社会 and 经济效益^[7-9]。其中,重力坝由于安全可靠、设计施工技术简单、对地质地形条件要求较低等优点而被广泛应用,是我国大坝建设中的主要坝型,世界上最大的水利枢纽工程——举世瞩目的长江三峡大坝就是混凝土重力坝,因此混凝土重力坝抗震性能研究对于水利工程建设具有重大的现实意义^[10]。

中国大陆处于地壳几大板块的夹持之中,位于世界上两个最活跃的地震带交汇部位,东濒环太平洋地震带西支,西部和西南部是欧亚地震带所经之处,是一个多地震国家^[11-13]。自 20 世纪初以来,共发生了 3000 次以上震级大于 5 级的破坏性地震,其中全世界发生的 7 级以上强震中,中国占 35 次,有 3 次震级为 8.5 级以上的巨大地震发生在我国。进入 21 世纪后,2008 年 5 月 12 日的汶川大地震,震级达到 8.0 级,震中最大烈度 11 度,震区遭受灾难性的严重破坏,受灾面广,因灾遇难人数 69227 人,17923 人失踪,灾害之惨重令人触目惊心,地震给人民生命和财产造成了不可估量的损失,强震区内几乎变为一片废墟^[14-17]。

大型水利工程不仅起到防洪灌溉、调节径流的作用,更关系到国计民生,一旦遭到破坏,带来的灾难性后果是无法估量的,所以大型水利水电工程建设的重要目标是安全可靠,然后才是经济合理^[18]。汶川地震后,水电工程抗震研究的重要性更加突出。2008 年 10 月 21 日,水电水利规划设计总院以水电 [2008]24 号文发出通知,印发了《水电工程防震抗震研究设计及专题报告编制暂行规定》。通知说,根据《国家发展改革委关于加强水电工程防震抗震工作有关要求的通知》(发改能

源 [2008] 1242 号) 和《国家能源局关于委托开展水电工程抗震复核工作的函》(国能局综函 [2008]16 号), 为了能够进一步明确及规范水电工程防震抗震研究设计工作的内容和专题报告的编制要求, 做好水电工程防震抗震研究设计工作, 提高水电工程的防震抗震能力, 制定了《水电工程防震抗震研究设计及专题报告编制暂行规定》^[19-21]。

防止水坝地震灾变的研究是关系中国经济社会发展全局的防灾减灾重大工作中的重要内容, 也是当今中国水利水电建设中必须面对和急需解决的一个战略性关键技术问题与目前工程抗震领域中的前沿课题。有限元模拟方法因其能够解决复杂的工程问题且具有良好的经济性等优点而发展迅速, 日益满足工程设计的要求, 大坝地震响应的数值模拟结果可为大坝抗震安全评价、设计提供可靠的技术依据。

为了抵御洪水、造福人类, 早在几千年前人类就开始建坝蓄水。早期的水坝都是采用当地材料建造的砌石坝、土坝、堆石坝和木坝。有记载的最早的拱坝是古罗马时期在法国境内建造的 Baume 拱坝^[1], 坝高 12m, 厚高比 0.32, 坝体结构与现代拱坝不一样, 上、下游由两堵砌石拱墙形成, 墙间用土料填充。随着近代科学技术的发展, 1837 年 Francos Zola 在法国普罗旺斯地区艾克斯设计建造了世界上第一座用近代力学理论设计的拱坝——佐拉 (Zola) 拱坝^[1,2], 坝高 42.5m, 厚高比 0.3, 1854 年建成, 它的设计采用了圆筒应力公式。

现代拱坝的发展经历了三个重要阶段^[2]。第一阶段以 19 世纪下半叶至 20 世纪上半叶的美国为代表, 拱坝以厚重体型为主。美国 1936 年建成的胡佛拱坝^[3] 是拱坝建设史上一个重要的里程碑, 坝高 221m, 为当时最高的拱坝, 体型相当厚实, 其断面厚高比达 0.91, 具有很高的安全性。这一时期的拱坝设计多采用多拱梁计算方法, 设计思想偏于保守, 形成体型厚重的风格。第二阶段以 20 世纪的欧洲为代表, 拱坝设计以轻巧、优美等特点见长, 充分利用了拱坝良好的受力性能和较高的经济性优势。如意大利的瓦依昂^[4] 薄拱坝, 坝高 261m, 坝底宽仅 22.7m, 断面厚高比不足 0.1。这一阶段拱坝修建越来越高, 模型试验、计算分析也趋于成熟, 新技术不断应用到坝工中, 设计思想也逐渐开放。第三阶段从 20 世纪末开始, 拱坝的发展中心逐渐转移到中国^[5,6], 我国的拱坝建设蓬勃发展。到 1988 年, 全世界共兴建高度 15m 以上的拱坝达 1592 座, 其中我国有 753 座, 占 47.3%; 据中国大坝委员会的统计, 截至 1998 年年底, 我国已建成高度 30m 以上的拱坝 521 座, 拱坝建设居世界前列。当前有一大批已建和待建的拱坝, 如二滩、拉西瓦、锦屏、苗家坝、小湾和溪洛渡等。

目前, 我国每年用于水利工程中的大体积混凝土在 1000 万 m^3 以上。混凝土是一种脆性材料, 抗拉强度只有抗压强度的 1/10 左右; 拉伸变形能力很小, 短期加载的极限拉伸变形只有 $(0.6 \sim 1.0) \times 10^{-4}$, 相当于温降 $6 \sim 10^\circ\text{C}$ 的变形; 长期加

载时的极限拉伸变形也只有 $(1.2 \sim 2.0) \times 10^{-4}$ 。水工混凝土结构断面尺寸大,浇筑之后,水泥的水化热使得内部温度上升,此时混凝土弹性模量小,徐变大,升温引起一定的压应力;但在温度降低时,弹性模量大,徐变小,在基础约束与内外温差的作用下会产生大的拉应力。由于混凝土材料的抗拉强度低,而混凝土浇筑之后会产生较大的拉应力,很容易产生裂缝。

裂缝的出现破坏了结构的整体性,改变了结构原有的受力情况与应力分布,结构的局部甚至整体可能会发生破坏。特别是结构的深层裂缝危害性更大,如果贯穿到基岩,很有可能成为渗漏的通道,严重影响结构的安全。同时裂缝的出现降低了混凝土的耐久性、水密性等性能,减少结构的使用年限。

这样,在建筑混凝土坝时,如何减少、控制坝体裂缝是一个非常重要的问题,并对混凝土坝的设计、施工产生了深远的影响。

1.2 坝体混凝土裂缝的工程实例

1.2.1 丹江口水利枢纽

20 世纪 50 年代自行设计、施工的丹江口水利枢纽,是具有防洪、发电、灌溉、航运和养殖综合利用的水利工程,也是我国南水北调工程中线的水源地。丹江口大坝最初设计的正常蓄水位为 $\nabla 170.0\text{m}$,坝顶高程为 $\nabla 175.0\text{m}$ 。工程于 1958 年 9 月开工,1959 年 3 月开始浇筑混凝土,5 月就在 #18 坝段首先发现裂缝,比较严重的有 #9~#11 坝段基岩破碎带回填混凝土楔形梁上的裂缝,#18 坝段、#3 坝块的基础贯穿裂缝和 #19~#28 坝段上游迎水面的裂缝等。这一问题引起了有关部门的重视,后经国务院审批,决定丹江口工程停工整顿,进行裂缝补强处理。1961 年 6 月由丹江口工程局、中国水利水电科学研究院、武汉水利电力大学和长江水利委员会长江科学院等组成“丹江口工程温控防裂科研组”,经过多年的调查研究工作,总结了裂缝发生的原因:①施工过程中产生的裂缝绝大多数是表面裂缝,龄期 6~20d 发生的表面裂缝占总数的 90%以上;②引起表面裂缝的主要原因是气温骤降;③一部分表面裂缝可能发展成贯穿性裂缝或深层裂缝,从而引起了对表面保温的重视。工程于 1964 年复工,施工中采用三条主要措施:①严格控制基础允许温差、新老混凝土上下层温差和内外温差;②严格执行新浇混凝土的表面养护;③提高混凝土的抗裂能力(极限拉伸值和 C_v 值)。之后浇筑的二百多万立方米混凝土没有发现危害性裂缝,一般的表面裂缝也很少出现^[7]。

1.2.2 野牛嘴拱坝

美国矿务局 1910 年建成野牛嘴 (Buffalo Bill) 拱坝,该坝未设横缝,在两岸之间连续浇筑混凝土,每层厚 0.3m,有时每天浇筑 4 层,上升 1.2m/d,坝址高程

$\nabla 2347.0\text{m}$, 最低月平均温度为 -3°C , 最高月平均温度为 21°C , 坝内产生了大量垂直和水平裂缝 (图 1.1)^[9]。

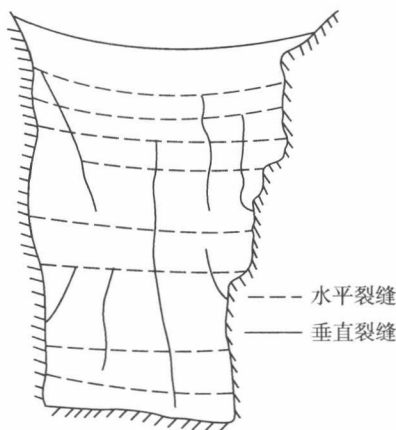


图 1.1 野牛嘴拱坝裂缝 (下游立视图)

1.2.3 卡布里尔拱坝

葡萄牙的卡布里尔 (Cabril) 双曲拱坝, 高 132m , 弧长 290m , 1954 年建成, 1980 年因有大量裂缝而被迫进行修补。当时下游面共有 252 条裂缝, 这些裂缝都是施工缝 (层厚 1.5m) 被拉开, 并在两横缝之间贯穿, 有时还延伸到相邻坝段 (图 1.2)。用有限元分析产生裂缝的原因: ①坝体顶部刚度过大; ②横缝张开, 坝的整体性下降; ③基岩裂隙被冲刷, 渗水增加, 排水孔堵塞; ④气温年变幅和日变幅较大; ⑤初次蓄水时坝体尚未完全冷却^[10]。

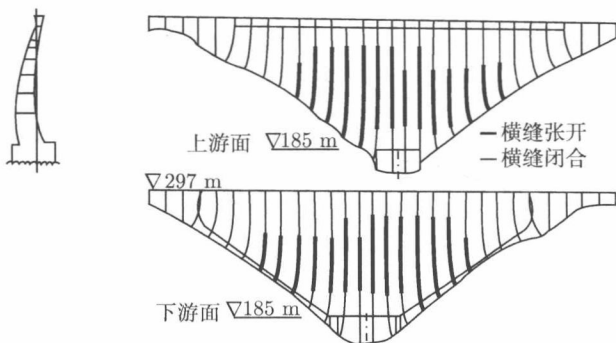


图 1.2 卡布里尔拱坝横缝张开情况图

美国在 20 世纪 30 年代以前建造的奥瓦希等混凝土坝都产生了不少的裂缝。20 世纪 30 年代修建 221m 高的胡佛拱坝, 该坝的高度为已建坝高度的 2 倍, 为了减

少坝体裂缝的发生,美国垦务局首先进行了大量的先期研究工作,最后采用了分缝分块浇筑结合水管冷却的温控防裂措施^[11]。建成后,该建筑入选美国历史十大建筑,取得了巨大的成功。

苏联从 20 世纪 50 年代开始在西伯利亚和中亚地区建造了一系列混凝土坝,当地气候条件十分恶劣,年平均气温为 $-2 \sim -3^{\circ}\text{C}$, 冬季最低气温达 $-40 \sim -50^{\circ}\text{C}$, 直到 20 世纪 70 年代建造托克托古尔重力坝(高 215m)时,采用了“托克托古尔施工法”才解决了裂缝问题,该方法是利用自动上升帐篷创造人工气候,冬季保温,夏季遮阳,自始至终在帐篷内浇筑混凝土^[11]。

“十坝九裂”的现象在混凝土坝中十分普遍,大体积混凝土在浇筑后,水泥水化过程中产生大量的水化热,使得混凝土结构膨胀,待达到最高温度以后,随着热量向外界散发,温度将由最高温度降至一个稳定温度或者准稳定温度场,产生一个温差。如果浇筑温度越高,水化热温升越大,这个温差就越大,将产生更大的温度应力。

在基岩部位,由于坝体内部非线性温度场与基岩的约束,混凝土的收缩将产生大的拉应力,容易出现基础贯穿裂缝。在非基础约束区,如果混凝土内部的最高温度与外界温差过大,受混凝土内部非线性温度场的影响,容易出现表面裂缝。

传统的温度控制是通过降低混凝土温度来降低温降时的收缩,降低混凝土水化热、降低入仓温度、分块分层浇筑、水管冷却等是减小温度应力的常用措施。通常混凝土坝压应力安全系数为 4.0 左右,抗拉安全系数只有 1.3~1.5,如果抗拉安全系数取值更大,实际施工难以做到,温控费用也将急剧上升,抗拉安全系数较小很难避免坝体裂缝的出现。

1.3 仿真分析的发展

为了有效地控制坝体内部产生的拉应力,减小危害性贯穿与深层裂缝的发生,近几十年来,各国工程技术人员进行了大量的研究与工程实践^[12-19],积累了丰富的工程经验,并制定了各种温控的规范,取得了显著的效果。由于影响温度应力与温度控制的因素众多、关系复杂,对于不同地区的不同工程,很难用通用的规范和简单的计算来具体地指导设计与施工。这需要有一种可靠的分析方法,来预测坝体裂缝的发生。

同时,通常的混凝土坝线性与非线性、动力与静力有限元分析,一般都是假定在坝体竣工前不存在初始应力,并未考虑不同施工方法、不同温控措施以及变化的温度条件的影响,实际上坝体竣工后可能有很大的初始应力,有一定的局限性,而这对坝体的应力状态有重要的影响。

温度场与应力场仿真分析是用有限元方法模拟整个混凝土坝施工、蓄水和运行的全过程,充分考虑气温过程、水压、入仓温度、水化热和施工顺序等主要的影响因素,比较正确地计算出坝体内部温度场与应力场的时空分布,从而预测坝体裂缝发生的位置与时间,是一种可以预测混凝土大坝裂缝的方法;同时通过模拟不同的温控方案,从中选出符合应力控制标准的、可为工程接受的、经济合理的方案,供设计施工参考。

1949 年美国垦务局提出了计算大体积混凝土单根水管冷却但不考虑水化热的算法。1964 年 Sims 等对 Norfolk 坝的温度裂缝进行了研究,这是有限元法在土木工程中最早的应用^[20]。

受美国陆军工程师团委托,加利福尼亚大学结构工程实验室于 1963~1965 年对德沃夏克坝进行了应力场的仿真分析计算(温控设计与温度场计算结果由工程师团提供),以研究通仓浇筑与单纵缝浇筑的区别。采用了简化的方法计算了坝体下部的 17 层混凝土浇筑层,每个浇筑层用一层三角形单元,按照平面应力问题来计算;地基作为半无限弹性平面处理(平面应变问题),共计算了 73 天^[21]。

我国的朱伯芳院士于 1956 年发表了《混凝土坝的温度计算》一文,并一直对大体积混凝土温度应力与温度控制问题进行了多年的研究,取得了大量成果^[21]。1982 及 1983 年,他将 Zienkiewicz 和 Watson 的计算徐变应力的等步长显示算法改进为变步长的显示及隐式算法^[22,23],该算法成为我国弹性徐变应力场仿真分析的理论基础。

清华大学水利水电工程系光弹实验室刘光廷教授将随机有限元法引入了重力坝随机徐变应力的计算^[24-26],考虑了坝体混凝土温度随机性以及混凝土的徐变参数、弹性模量等力学参数随机性对徐变应力场的影响,对一典型重力坝作了计算,结果表明:结构内部温度标准差的最大值可达 4℃,徐变应力标准差的最大值约为 0.25MPa。

有限元仿真分析考虑的因素众多,许多因素还是随时间变化的。仿真分析中需要考虑以下因素。

(1) 基岩与坝体混凝土的材料参数:导温系数、导热系数、热膨胀系数、比热和混凝土的绝热温升等热学参数;容重、泊松比、弹性模量、混凝土徐变度、自生体积变形等力学参数;不同材料的分区。刘光廷教授用“等效龄期”的概念考察了温度对于混凝土弹性模量的影响,考虑温度对于弹性模量的影响有助于了解坝体的应力分布,有利于采取措施防止裂缝的发生^[27]。

(2) 外界边界条件:气温、地温、水温、日照影响、寒潮、湿度等;不同时期自重、水位变化等外荷载;朱伯芳院士对我国水库水温变化情况进行了统计分析,提出估算库水温度的一维模型,并可考虑表面结冰及多泥沙水库对库水温度的影响^[28,29]。

(3) 施工进度: 浇筑厚度、间歇时间、浇筑季节、施工顺序与进度。

(4) 温控措施: 入仓温度、表面保温、水管冷却等措施。朱伯芳院士提出了坝体一、二期水管冷却的计算方法以及非金属水管冷却的等效非金属管外半径法^[30]。孙护军引入单元子结构方法, 将冷却水管所在的单元作为子结构, 在计算容量增加不多的情况下实现了用三维有限元法数值模拟含水管冷却效应的混凝土结构温度场和应力场^[31]。

(5) 坝体结构: 坝体类型、分缝、孔口与廊道等。

清华大学水利水电工程系光弹实验室对碾压混凝土坝的仿真温度场与应力场进行了深入的研究^[32-36], 将计算结果与工程实测的结果进行比较分析后, 得到影响仿真计算可靠性的关键是入仓温度、绝热温升和边界温度等热学参数的正确取值; 设计建造了溪柄、石门子等碾压混凝土拱坝, 其中 63.5m 高的溪柄碾压混凝土薄拱坝采用 12℃ 的低绝热温升混凝土, 拱坝中设人工短缝以改进整体式碾压混凝土结构的应力和传力方向, 仅用半年即完成整体碾压工作并不需要等待冷却和灌浆即可蓄水, 提前发挥工程效益。他们还研究了不同切缝形式^[37-39]对坝体应力分布的影响, 对坝高 132m 的沙牌拱坝研究结果表明: 如不采取合理的分缝措施, 将产生裂缝; 建议设置 2~3 条横缝, 以减轻拱坝拱向拉应力的危害。

中国水利水电科学研究院结构材料研究所用有限元方法对龙滩碾压混凝土重力坝溢流坝段施工及运行全过程进行了数值仿真, 根据控制入仓温度、保温板保温、预冷等不同温控措施的组合, 提出了多种可行的温控方案及温度应力的分布规律, 为施工单位提供参考^[40]。

此外, 河海大学^[41]、大连理工大学^[42]、武汉水利水电大学^[43]等单位都对碾压混凝土坝仿真分析进行了深入的研究。

为了控制坝体开裂, 近些年来, 人们认识到在混凝土中掺入微膨胀材料有助于减小坝体拉应力, 控制坝体裂缝, 减少分缝, 并可以简化温控措施, 快速施工, 缩短工期, 具有很好的经济效益。这种外掺氧化镁混凝土快速筑拱坝技术作为一种新的筑坝技术, 具有广阔的发展前景。

1.4 微膨胀混凝土研究现状

1.4.1 混凝土的自生体积变形

混凝土中所含水分的变化、化学反应及温度变化等因素都能够引起混凝土的体积变形。混凝土的体积变形^[44]有五种: 混凝土在浇筑后至终凝前出现泌水和体积缩小产生的凝缩变形; 置于未饱和的空气中的混凝土因水分散发而干燥收缩变形; 外界温度变化引起混凝土宏观体积变化的温度变形; 碳化反应引起的碳化收缩