

碾压混凝土坝 温度应力仿真计算研究

李守义 张金凯 张晓飞 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

陕西省重点学科建设专项资金资助

碾压混凝土坝 温度应力仿真计算研究

李守义 张金凯 张晓飞 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

全书共分 11 章, 包括绪论, 大体积混凝土温度场和温度应力场计算原理, 碾压混凝土水化热升温变化规律, 三维有限元浮动网格法, 混凝土坝三维有限元温控仿真计算程序, 分区浮动网格法在有孔坝段温度应力场计算中的应用, 利用 MgO 混凝土解决重力坝温度应力问题的应用研究, 大体积混凝土表面保温计算方法研究, 考虑昼夜温差的碾压混凝土坝温度场仿真分析, 碾压混凝土拱坝温度应力计算研究和碾压混凝土坝温度场反分析研究等内容。

本书可作为水利水电工程设计、施工、监理人员和高等院校师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

碾压混凝土坝温度应力仿真计算研究 / 李守义, 张金凯, 张晓飞编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010.8

ISBN 978-7-5084-7766-4

I. ①碾… II. ①李… ②张… ③张… III. ①碾压土坝: 混凝土坝—温度变化—应力分析—仿真—计算方法—研究 IV. ①TV642.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第160806号

书 名	碾压混凝土坝温度应力仿真计算研究
作 者	李守义 张金凯 张晓飞 编著
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 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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 11.75 印张 301 千字
版 次	2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	32.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

碾压混凝土筑坝技术问世以来,在国内外得到广泛应用。碾压混凝土坝是将常态混凝土坝的结构和碾压土石坝的施工技术集于一体,该项新技术具有水泥用量少、工期短、造价低等优点。它是混凝土筑坝技术的一项革新,在技术和经济上具有显著的优越性。但碾压混凝土坝的温度应力是制约简化温控措施、加快施工进度、降低工程造价的主要问题。因此,碾压混凝土坝温度应力仿真计算研究具有重要的工程实用价值。

碾压混凝土坝温度应力分析方法一般可分为理论解法、实用算法和数值方法。

由于碾压混凝土坝边界条件和材料的复杂性,要求解满足所有条件下的温度应力几乎是不可能的,所以理论解法在工程实际中基本没有应用。

在中小工程初设阶段,为了简单迅速地估算温度应力,常采用一些实用算法,包括约束系数法、约束矩阵法。

数值方法有边界单元法和有限单元法两种。边界单元法节省计算时间,但若考虑施工过程中的徐变应力场及坝内介质非均匀性,则会遇到很大困难,目前该法在混凝土坝应力场计算中应用甚少。

有限单元法是目前较为成熟的计算混凝土坝温度场和应力场的数值方法。根据温度应力随时间变化的特点,一般采用增量初应变法。即在每一计算时段初用前一时段的应力增量计算徐变变形增量,并将其看作计算时段的初应变而转化为等效结点荷载,再求解计算时段的位移增量和应力增量。为了将此方法实用化,减少计算机存储量,英国著名学者提出了等时段条件下徐变增量的递推算法,在此基础上,我国朱伯芳院士又提出了不等时段条件下徐变增量的递推关系和混凝土结构徐变应力分析的隐式解法,为利用有限元仿真计算混凝土坝的温度场和温度应力奠定了基础。

作者在前人研究工作的基础上,结合碾压混凝土坝施工特点,提出了三维有限元浮动网格法,并开发了相应的计算机软件,能够模拟碾压混凝土坝薄层浇筑的施工过程,根据设计要求计算出任意时刻的坝体温度场和应力场;同时研究了分区浮动网格法在有孔坝段温度场和应力场计算中的应用、利用MgO混凝土解决重力坝温度应力问题、混凝土表面保温计算方法、考虑昼夜温差条件下碾压混凝土坝温度场和应力场仿真分析、碾压混凝土拱坝温度应力计算研究以及碾压混凝土坝温度场反分析等。研究成果对碾压混凝土坝的设计、施工和运行管理具有参考价值。

碾压混凝土坝温度场和温度应力场研究的发展趋势是研究开发三维有限元全过程仿真计算程序，计算中能模拟碾压混凝土坝薄层施工的实际情况，分析施工期和运行期的坝体温度、应力、位移情况，并良好的人机交互界面，使用户在施工过程中能根据各种因素的变化，随时了解坝体温度场和温度应力的变化情况，以便采取相应的温控防裂措施。在计算程序的后处理方面，建立与计算结果相配套的图形处理功能，从浩繁的计算结果中，按用户需要的图形输出成果，达到简便、实用、快捷的目的。

本书结合教学和科研实践，总结了碾压混凝土坝温度场和温度应力分析方法以及在工程建设中的应用。由于碾压混凝土坝温度应力的复杂性、外界环境和施工条件的多样性，许多问题还难于彻底解决，加之作者的研究水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

书中引用了部分国内外专家和同行的相关研究成果，在此表示衷心感谢。

作者

2010年6月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 碾压混凝土坝概述	1
1.2 碾压混凝土重力坝温度场和温度应力场研究现状	5
1.3 大体积混凝土结构温度应力补偿研究	10
1.4 大体积混凝土结构表面保温研究现状	11
1.5 考虑昼夜温差影响的碾压混凝土重力坝温度应力场研究	12
1.6 碾压混凝土拱坝温度应力研究现状	12
1.7 碾压混凝土坝温度场反分析研究现状	13
2 大体积混凝土温度场和温度应力场计算原理	15
2.1 热传导基本理论	15
2.2 温度场和应力场三维有限元计算原理	18
2.3 大体积混凝土温度场有限元计算	23
2.4 大体积混凝土应力场有限元计算	27
3 碾压混凝土水化热温升变化规律	34
3.1 水泥的水化热变化规律	34
3.2 混凝土的绝热温升变化规律	34
3.3 大体积混凝土的温升变化规律	35
3.4 碾压混凝土的发热规律	35
3.5 混凝土坝的特征温度和特征温差	37
4 三维有限元浮动网格法	39
4.1 浮动网格的仿真计算方法	39
4.2 浮动网格引起的热力学参数误差分析	40
4.3 浮动网格与不浮动网格的计算结果对比分析	43
5 混凝土坝三维有限元温控仿真计算程序	46
5.1 混凝土坝三维有限元温控仿真计算程序功能	46
5.2 拱坝三维有限元温控仿真计算程序介绍	46
5.3 重力坝三维有限元温控仿真计算程序介绍	51
6 分区浮动网格法在有孔坝段温度应力场计算中的应用	55
6.1 分区浮动网格法的仿真计算模型	55

6.2	分区浮动网格法的程序设计难点	56
6.3	分区浮动网格法的计算程序验证	57
6.4	工程算例分析	60
7	利用 MgO 混凝土解决重力坝温度应力问题的应用研究	76
7.1	MgO 水泥及掺 MgO 混凝土	76
7.2	高外掺 MgO 碾压混凝土温度应力计算原理	79
7.3	程序验证	80
7.4	MgO 碾压混凝土坝算例分析	80
8	大体积混凝土表面保温计算方法研究	89
8.1	等效表面散热系数法	89
8.2	等效厚度法	90
8.3	导热系数法	91
8.4	程序验证	94
8.5	工程算例分析	97
9	考虑昼夜温差的碾压混凝土坝温度场仿真分析	112
9.1	昼夜温差对长间歇基础垫层温度场和温度应力的影响	112
9.2	考虑昼夜温差的碾压混凝土坝温度场仿真分析	122
10	碾压混凝土拱坝温度应力计算研究	142
10.1	碾压混凝土拱坝温度场程序验证	142
10.2	碾压混凝土拱坝算例分析	145
11	碾压混凝土坝温度场反分析研究	165
11.1	工程反问题的特点	165
11.2	工程反问题的求解方法	166
11.3	可变容差法	168
11.4	碾压混凝土坝温度场反分析研究	172
11.5	程序验证	177
	参考文献	180

1 绪 论

1.1 碾压混凝土坝概述

1.1.1 碾压混凝土坝的发展概况

碾压混凝土是用振动碾压实的超干硬性混凝土,它起源于20世纪30年代的干贫混凝土。碾压混凝土应用于筑坝技术则是常态混凝土坝与土石坝激烈竞争产生的结果。20世纪30年代,美国建成胡佛坝以来,混凝土坝的施工方法改进不大。混凝土重力坝的施工方法是分段、分块的柱状浇筑法。这种施工方法一直延续了50多年,很少有重大的改进和革新。土力学理论的发展放宽了土石坝对建筑材料的限制,增加了利用当地材料筑坝的可能性;大型挖掘、运输、碾压机具的不断出现和更新,使土石坝的施工速度有了大幅度的提高,降低了土石坝的造价,显示出明显的经济技术优越性。50年代后,世界范围内建造土石坝的比例不断提高,建造混凝土坝的比例不断减少。而土石坝也有其明显的缺点:土石坝的安全性较混凝土坝低,主要原因是洪水漫顶和筑坝材料的内部腐蚀等。根据混凝土坝与土石坝各自的特点,人们努力寻找一种新的坝型把两者的优点结合在一起,碾压混凝土坝就是在这样一种思路中产生的。

20世纪70年代,碾压混凝土开始进入世界性的研究阶段。1970年,J. M. Raphael教授在《最优重力坝》一文中建议使用水泥、砂、砾石材料筑坝并用高效率的土石方运输机械和压实机械施工。1970年,在美国加州阿西洛玛(Asilomar)召开的“混凝土坝快速施工会议”上,拉斐尔(Rapher)教授提出了混凝土碾压施工的概念。1972~1973年,美国陆军工程师团在艾克溪坝(ELK Creek)和劳斯特溪坝(Lost Creek)工程中分别进行了碾压混凝土现场试验。1974年,美国陆军工程师团在巴基斯坦塔贝拉(Tarbela)工程中用碾压混凝土快速修复泄洪洞出口消力池,这进一步证明了碾压混凝土快速施工的可行性。日本从1975年开始研究碾压混凝土筑坝技术,并用于工程实践。1981年日本建成了世界上第一座碾压混凝土坝——岛地川坝(坝高89m),可以说这是人类筑坝史上的第二个里程碑,此后世界各国竞相修建碾压混凝土坝。1982年,美国陆军工程师团仅用不到5个月的时间建成了世界上第一座全碾压式混凝土坝——柳溪坝(坝高52m)。我国从1978年开始研究碾压混凝土筑坝技术。1983~1985年分别在铜街子工程和沙溪口工程进行了碾压混凝土应用试验。1986年建成了我国第一座碾压混凝土坝——福建省大田县坑口坝(坝高56.8m)。我国碾压混凝土筑坝技术发展速度较快,目前已处于国际领先地位。已建132m高的沙牌碾压混凝土拱坝和在建216.5m高的龙滩碾压混凝土重力坝分别是世界上最高的碾压混凝土拱坝和重力坝。

碾压混凝土重力坝是将常态混凝土坝的结构和碾压土石坝的施工技术等优点集中于一

体, 该项新技术具有节省水泥、施工简便、缩短工期、造价低廉等优点。它是混凝土筑坝技术的一项革新, 在技术和经济上具有显著的优越性。

1.1.2 碾压混凝土筑坝技术的发展

1.1.2.1 筑坝材料

碾压混凝土是一种以碾压方式密实的干硬性混凝土。其特点是: 拌和料为干硬性, 坍落度为零; 水泥用量相对减少而大量掺入掺和料, 以尽量降低水化热, 简化温控措施; 采用中热水泥以保证在所需强度下, 水化热量小。由于高比例的粉煤灰掺量, 一方面使混凝土具有良好的可碾压性, 满足了连续、快速、高强的施工要求; 另一方面使其温度特性、变形特性、强度特性与常规混凝土有较大的不同。就碾压混凝土温度特性而言, 早期温升较低, 后期温升较高, 达到最高温度的时间及最高温度的持续时间均较长, 所以碾压混凝土坝在施工期的散热量很小, 依然存在温度裂缝问题。就碾压混凝土的变形特性而言, 其极限拉伸值比同标号的常规混凝土的极限拉伸值略低, 这对混凝土抗裂不利。在水胶比相同的条件下, 碾压混凝土的抗压、抗拉极限强度与常规混凝土相差不大, 但其软化特性差别较大, 这对碾压混凝土后期的抗裂性能具有较大的影响^[1]。

与以振捣方式密实的常规混凝土相比, 碾压混凝土在材料性质上的变化主要是因为粉煤灰的大量掺入、水泥用量明显减少引起的。就大坝混凝土而言, 不同比例的粉煤灰掺量将得到不同品质的混凝土。

值得注意的是, 在与面板堆石坝进行坝型比较的争论高峰期, 中国水力发电工程学会碾压混凝土筑坝委员会在 1994 年春天召开的“碾压混凝土材料研讨会”上, 乐观地估计了碾压混凝土的上述三个方面的材料性质, 促进了中低碾压混凝土坝快速发展, 使中国的碾压混凝土坝在坝型、坝高等方面短期内不断攀登世界高峰, 也使这一领域的科研水平不断提高。进一步的碾压混凝土材料试验表明, 工程用碾压混凝土与试验室用碾压混凝土材料性质差别甚大, 对大体积碾压混凝土的温度应力问题以及材料抗裂能力应予以高度重视。

1.1.2.2 碾压混凝土坝施工技术

(1) 碾压混凝土层面结合与初凝时间控制。碾压混凝土施工采用通仓、薄层连续浇筑, 各浇筑层的层面是坝体的薄弱环节。为保证碾压混凝土的质量, 层面不但要求有良好的层间结合强度, 而且还要有较高的抗渗性能。试验和工程实践表明, 在下层混凝土初凝时间前浇筑上层碾压混凝土可获得良好的层间结合强度。世界各国对浇筑层温度和层间间歇时间有不同的看法。美国早期标准为, 当碾压混凝土老化不到 $2000^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ 时, 保持清洁无杂物, 缝面保持潮湿时就不需进行专门的处理, 但事实证明, 该成熟度值偏大, 已建的几座坝层间结合不好, 质量出现问题。西班牙碾压混凝土施工中规定, 为避免产生冷缝, 浇筑层温度和层间间歇时间不应超过 $200^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$, 如果超过 $200^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$, 则需用高压水枪冲洗, 并在浇筑下层前铺砂浆。英国 BS 则规定, 浇筑层温度和层间间歇时间不应超过 $400^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ 。我国以初凝时间作为施工铺筑间歇控制时间, 一般以 $6 \sim 8\text{h}$ 进行控制, 以 $4 \sim 6\text{h}$ 为好, 快速短间歇是碾压混凝土筑坝技术核心。但是, 在碾压混凝土坝工程中这一点是不容易做到的, 尤其是在高温季节施工时, 碾压混凝土的初凝时间将显著缩短。在这种



情况下,为提高层间结合强度,在实际工程中往往采用层面铺设砂浆和垫层混凝土进行处理^[2]。

(2) 碾压混凝土斜层平摊铺筑法浇筑技术。斜层平摊铺筑法是在中国的江垭碾压混凝土坝施工中创立的,这种方法类似于常态混凝土的“斜层(鱼鳞式)浇筑”,是介于 RCC 通仓薄层铺筑和 RCD 台阶浇筑之间的一种铺筑方式,平铺的方向有平行坝轴线和垂直坝轴线两种,一般坡度为 $1:10 \sim 1:20$ 。采取从下游开始铺筑,使层面倾向上游^[3]。若是平行坝轴线向前推进,对斜层坡脚的处理必须十分慎重,要求在碾压过程中防止大骨料分离滚下,并且每个条带的底部必须错开,防止形成一条自上至下的通道。这种施工法的优点是:可以缩短覆盖时间,有助于提高层间表面粘结力;没有横向模板,节省工时;提高 RCC 的铺筑速度;防止预冷混凝土吸热过快,相应降低了温控造价。

1.1.2.3 碾压混凝土坝的温度应力分析

碾压混凝土坝的温度场、温度应力场分析方法,有以美国为代表的有限元时间过程分析法和以日本为代表的约束系数矩阵法,英国和法国一般采用 ANSYS、ADINA 和 ABACUS 等专用程序^[4]。

世界上最早把有限元时间过程分析法引入混凝土温度应力分析的是美国加州大学的威尔逊教授。他在 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,并用于德沃歇克坝温度场的计算。威尔逊还与他人合作研制了考虑混凝土徐变应力分析程序。

我国在研究碾压混凝土坝温度场和温度徐变应力场有限元计算方法方面,做了大量开创性研究工作。1985 年第 15 届国际大坝会议上,朱伯芳院士发表了题为《大体积混凝土中考虑徐变效应的温度应力计算》的论文,在此以后,还提出了并层复合单元、并层坝块接缝单元、应力场和温度场分区异步长解法、考虑水管冷却效果的混凝土等效热传导方程等混凝土坝温度应力计算方法,并研制出计算程序。西安理工大学在研究碾压混凝土坝施工特点的基础上,提出了三维有限元浮动网格法,能够模拟碾压混凝土坝薄层浇筑的施工过程,可根据设计要求计算出任意时刻的坝体温度场和应力场,研究开发的计算软件,可在微机上计算高碾压混凝土坝施工期和运行期的温度场和考虑混凝土徐变的温度应力场。河海大学在约束系数矩阵法的基础上,提出了碾压混凝土坝温度控制设计的广义约束系数矩阵法。约束系数矩阵法只能反映温度和约束应力沿坝高方向的变化,而广义约束系数矩阵法既能反映温度和应力沿坝高方向的变化规律,又能反映温度和应力沿水平方向的变化规律,不仅能用来研究防止贯穿性裂缝和深层裂缝,而且能够用来研究防止由于上、下游表面环境温度变化与内部约束引起的表面裂缝。武汉大学、清华大学、大连理工大学等高等院校和科研单位在碾压混凝土坝温度场和温度徐变应力场研究方面,也做了大量研究工作,有力地推动了我国高碾压混凝土坝的发展^[5]。

碾压混凝土坝温度场和温度应力场研究的发展趋势是研究开发能在微机上实施的二维、三维线性和非线性有限元全过程仿真计算程序,计算中能模拟碾压混凝土坝薄层施工的实际情况,分析施工期和运行期的坝体温度、应力、位移情况,并良好的人机交互界面,使用户在施工过程中能根据各种因素的变化,随时了解坝体温度场和温度应力的变化情况,以便采取相应的温控方法和防裂措施,在计算程序的后处理方面,建立与计算结果

相配套的图形处理功能,从浩繁的计算结果中,按用户需要输出图形结果,达到简便、实用、快捷的目的。

1.1.2.4 碾压混凝土施工系统的计算机仿真研究

碾压混凝土施工系统是一个复杂的大系统,通常由混凝土拌和、运输、铺筑等系统组成。由于这些系统之间存在着相互影响和相互制约的复杂性和状态变化的随机性,同时由于碾压混凝土工程量大,温度控制要求严格,施工工期较紧,铺筑强度较集中,因而施工技术和计划安排具有相当大的难度。仿真技术在碾压混凝土坝施工中的应用,主要是用计算机仿真来考察混凝土施工的动态过程,按仿真的实际施工过程计算确定系统中的一些性能指标,作为控制和设计系统的依据,利用计算机来减轻设计人员的工作强度,缩短比选施工方案的设计周期。

目前,对碾压混凝土坝施工系统的计算机仿真研究,是寻求碾压混凝土坝施工的总体最优化方案。从研究碾压混凝土坝动态施工过程入手,将施工机械配备技术、施工技术、系统决策优化理论以及离散事件系统仿真理论相结合,以计算机技术为手段,开发通用性和智能化的碾压混凝土坝施工方案辅助决策支持环境,为在施工中合理科学地安排人力和机械资源、施工进度提供可靠的科学依据^[6]。

1.1.3 碾压混凝土坝的类型

目前碾压混凝土筑坝有三种主要类型,即中国的 RCCD、日本的 RCD 和欧美的 RCC。虽然它们有许多共同点,但各自都是根据本国国情发展并形成的具有本国特色的筑坝技术。

1.1.3.1 中国式碾压混凝土筑坝——RCCD

实验室试验结果和原形观测结果表明,中国 RCCD 混凝土具有以下特性:

- (1) 强度增长缓慢,后期继续增长。
- (2) 水泥水化发热量少,发热缓慢。
- (3) 抗裂性能较好。

(4) 水泥硬化效率高。混凝土中粉煤灰用量不超过胶凝材料的 60% 时,每公斤水泥能获得的混凝土强度效率高。

(5) RCCD 层间接缝做好,其结合性能良好,抗剪强度、弹性模量和不透水性碾压混凝土本身一样。

在碾压混凝土筑坝施工方面,有以下特点:

(1) 拌和楼尽量靠近大坝,以缩短混凝土运输距离。混凝土从拌和楼到仓面的运输一般用自卸汽车和皮带两种方法,RCCD 采用大面积推土机平仓,摊铺厚度一般为 30cm,连续摊铺碾压 6~10 层后,间歇 3~5 天。

(2) 温度收缩缝有两种做法,一种是在混凝土浇筑平仓后用切缝机切缝,缝中插入钢板或塑料板,然后在层面碾压;另一种是在水平工作面上用风钻沿横缝线间隔钻孔,以诱导成横缝。

(3) 目前 RCCD 设计一般在上下游坝面设置常态混凝土,利用滑动模板施工。

(4) RCCD 筑坝温度控制十分重要,浇筑时适宜的气温为 4~25℃。



1.1.3.2 日本式碾压混凝土筑坝——RCD

RCD 和 RCCD 在许多方面都相同, 现仅就其区别和特点加以说明。

在材料方面: RCD 混凝土胶结料砂浆比 RCCD 少, 他们认为已能够满足层间粘结要求; 粉煤灰用量不宜超过胶凝材料的 30%, 混凝土强度主要靠水泥, 水泥用量比 RCCD 多。

在施工方面: RCD 多采用双轴强迫式拌和机。RCD 筑坝的一个显著特点是连续摊铺、平仓几层, 然后一次碾压, 一次碾压厚度多为 75cm, 碾压后的顶面作为水平工作缝, 进行凿毛清洗。坝上下游面设置常态混凝土层, 多用钢模板施工。

1.1.3.3 欧美式碾压混凝土筑坝——RCC

欧美各国的碾压混凝土筑坝技术各有特点, 美国的 RCC 可作为代表。RCC 在许多方面与 RCD 和 RCCD 相同, 但因早期的碾压混凝土坝层间接缝漏水, 层间抗剪强度也削弱, 所以特别重视层间的粘结。即使在美国, 垦务局和美国陆军工程师团对 RCC 的做法也有所不同。

垦务局 RCC 粗骨料最大粒径 50mm, 二级配中 4.75~25mm 的较多, 以减少分离。胶结料用量一般由层间接缝不透水和抗剪、抗拉强度要求决定, 而不是由抗压强度决定。浇筑层厚度一般为 0.3m, 混凝土大面积连续浇筑 3~4 层后间歇, 顶面按水平面工作缝处理。混凝土材料用量稍多, 灰胶比较小, VC 值略高, 更为干硬性。

美国陆军工程师团为防止层间接缝漏水, 采取两种措施: 一是在上游面做常态混凝土防渗层; 二是对层面进行处理, 不需要考虑层间接缝的粘结。粗骨料最大粒径为 50~75mm, 用二级配或三级配。浇筑层厚 0.3m, 施工特点是浇筑新混凝土前, 不论间歇时间长短, 必须用高压水枪冲切下层混凝土层面, 铺 12.5mm 厚的水泥砂浆。

1.2 碾压混凝土重力坝温度场和温度应力场研究现状

1.2.1 研究的必要性

混凝土的问世迄今已有 150 多年的历史, 实践证明, 混凝土坚固耐久, 在可预见的将来, 仍然是一种工程建设必不可少的建筑材料。然而, 由于混凝土材料固有的力学特性, 它又是一种很易开裂的材料。裂缝的存在和发展, 除了影响建筑物的外观, 使相应部位构件的承载力受到一定程度的削弱, 同时裂缝还会引起渗漏、保护层剥落、钢筋锈蚀、混凝土碳化、持久强度降低, 甚至危及建筑物的正常使用和缩短建筑物的使用寿命。对于一些结构如水利工程、核辐射源的防护建筑物、化工原料储存池等一般都严禁任何裂缝的出现, 因此它们对于防裂有着更为严格的要求。另外, 建筑物的破坏常常是从裂缝开始的, 所以, 人们常常把裂缝的存在视作建筑物濒临破坏的危险征兆。

水工混凝土坝通常是暴露在外界, 表面与空气或水接触, 外界温度变化、水泥产生的水化热以及自身约束等因素的作用将在结构内部或表面出现拉应力, 因此, 在大坝结构中往往会出现裂缝。大坝内出现的裂缝, 按其深度的不同一般可分为贯穿裂缝、深层裂缝及表面裂缝。贯穿裂缝切断了结构断面, 可能破坏结构的整体性和稳定性, 其危害性是严重的。表面裂缝、深层裂缝随着拉应力的增大将进一步发展为贯穿裂缝。水工混凝土坝结构

中, 温度变化不但要引起裂缝, 对结构的应力状态也有重要影响, 有时温度应力在数值上可能超过其他外荷载引起的应力^[7]。例如, 三门峡重力坝孔口应力的研究结果表明, 按照荷载产生应力的大小排列, 各种荷载的次序是温度荷载、内水压力、自重、外水压力, 而且温度应力比其他各种荷载产生的应力的总和还要大。

水工混凝土结构的温度场、应力场计算, 是判断混凝土是否出现裂缝, 特别是严重裂缝的重要分析手段。温度场及应力场计算结果, 可为设计和施工中及时采取合理的温控措施提供依据^[8]。

碾压混凝土以低热著称, 容易使人产生错觉, 认为碾压混凝土温度应力较小, 不必注意其温度控制问题。事实上, 碾压混凝土坝也属于大体积混凝土结构, 产生温度应力的机理与常规混凝土坝相同, 经过认真研究碾压混凝土材料的特性和碾压混凝土坝的施工特点, 人们发现碾压混凝土坝的温度应力问题并不简单: ①碾压混凝土为低热筑坝材料, 由于水泥用量少, 其水化热温升一般为 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$, 仅为常态混凝土的 $50\%\sim 70\%$, 特别是在早龄期 (3 天以内), 温升仅为常态混凝土的 $1/3$ 左右, 这些对降低大坝水化热温升是十分有利的。②碾压混凝土含水量低, 且掺有相当数量的粉煤灰, 因而水化热发生延迟, 这使得施工面自然散热效率降低。③碾压混凝土坝不设纵缝, 甚至不设横缝, 施工采用通仓浇筑快速上升, 这一方面减少了暴露面, 对减小温度应力有利, 但在另一方面使混凝土内外约束增强, 且施工面散热时间短, 对减小温度应力不利。④碾压混凝土的受拉徐变随粉煤灰掺量的增加而减小, 所以碾压混凝土坝的温度应力松弛也较常态混凝土坝小, 对温度应力不利。⑤碾压混凝土坝一般在低温季节浇筑, 但对高坝, 要么在高温季节停工, 以牺牲施工进度换取简化温控措施, 要么高温季节连续浇筑, 但要在冷却骨料、降低入仓温度、分缝等方面采取措施。因此, 碾压混凝土坝不容置疑地也存在着温度应力问题。

水工混凝土坝体积庞大, 混凝土浇筑后固结硬化过程中, 由于水泥的水化作用在最初几天产生大量的水化热, 因混凝土的导热性能较差, 从而导致混凝土温度升高, 体积膨胀。一般来说, 水利工程中的混凝土, 绝热温升可达 $10\sim 40^{\circ}\text{C}$, 即使考虑表面散热, 混凝土内部最高温度仍比浇筑时高出 $7\sim 35^{\circ}\text{C}$ 。当混凝土内部温度达到最高温度后, 随着时间的推移, 温度逐渐下降。在混凝土的整个固结硬化过程中, 由于外界环境温度变化、水泥水化作用、外部及自身约束等各种因素的作用将在结构内部或表面产生拉应力。当混凝土的抗拉强度不足以抵抗这种拉应力时, 便开始出现温度裂缝。

从力学观点来看, 根据引起应力的原因, 温度应力可以分为以下两种类型:

(1) 自生应力。边界上没有受到任何约束或者完全静定的结构, 如果内部温度是非线性分布的, 由结构本身的相互约束而出现的应力。例如, 混凝土冷却时, 表面温度低, 内部温度高, 在表面出现拉应力, 在中央出现压应力。自生应力的特点是在整个截面上拉应力与压应力必须相互平衡。

(2) 约束应力。结构的全部或部分边界受到外界约束, 温度变化时不能自由变形, 因而引起的温度应力。例如, 混凝土浇筑块在冷却时受到基础的约束而出现的温度应力。

1.2.2 国内外研究现状

自 19 世纪诞生混凝土以来, 一直有学者进行水工混凝土裂缝的研究。但是直到 20 世纪初期, 由于水工混凝土的大量应用, 混凝土的防裂研究才引起足够重视。



1.2.2.1 国外研究现状

根据美国 1938 年 3 月、4 月 A. C. I 第 34 卷《大体积混凝土裂缝》中提供的资料,波尔德坝采取的温控措施包括分缝均为 15m,水泥用量为 $223\text{kg}/\text{m}^3$,采用低热水泥,浇筑层厚 1.5m,并限制间歇期,以及预埋冷却水管,进行人工冷却等。稍后建筑的大古力坝,除采用改良水泥外,其余温控措施和波尔德坝相同。和 1932 年建成的奥威海坝相比,在每英尺长度上出现裂缝的长度,奥威海坝为 0.75m,大古力坝为 0.56m,波尔德坝为 0.22m,没有出现破坏整体的贯穿裂缝。另据《垦务局对拱坝裂缝控制的实施》(A. S. C. E., 1959. 8) 和《T. V. A 对混凝土重力坝的裂缝控制》(Power division, 1960. 2) 可以看出,在对水工大体积混凝土温控防裂方面,美国在 20 世纪 60 年代初已经逐渐形成了比较定型的设计、施工模式,包括:①采用具有低水化热的水泥,或一部分用活性掺和料来代替;②采用低水泥含量以减少总的发热量,一般水泥含量为 $178\sim 223\text{kg}/\text{m}^3$,水灰比为 $0.6\sim 0.8$,外部混凝土采用 $0.5\sim 0.6$;③限制浇筑层厚度和最短的浇筑间歇期;④采用人工冷却混凝土材料的方法来降低混凝土的浇筑温度;⑤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保护新浇筑混凝土的暴露面,以防止突然降温,在各种条件下,混凝土的养护至少在 14 天以上。由于采取了这些措施,到 20 世纪 60 年代末、70 年代初,美国陆军工程师团建造的工程基本上做到了不出现严重危害性裂缝。

前苏联直到 20 世纪 70 年代建造托克托古尔重力坝时,采用了托克托古尔法,才宣布在温控防裂方面获得成功。此法的核心是用自动上升的帐篷创造人工气候,冬季保温,夏季遮阳,自始至终在帐篷内浇筑混凝土。

1.2.2.2 国内研究现状

在国内研究领域,中国水利水电科学研究院朱伯芳院士为减少碾压混凝土坝的计算工作量,提出了以误差控制为特点的扩网并层算法、分区异步长算法。西安理工大学在 1989 年结合三峡大坝坝体混凝土快速施工分缝研究,对大仓面薄层浇筑混凝土中施工期温度应力进行了粘弹性有限元模拟,采用了一种将两层或多层并于一层的互层单元,在此基础上经过多年的探索和研究,提出了三维有限元浮动网格法,并在“八五”、“九五”期间对龙滩碾压混凝土重力坝的温度应力进行了系统研究。丁宝瑛等在温度应力计算中考虑材料参数变化的影响。黄淑萍等则较深入地研究了碾压混凝土层面的温度徐变应力状况。清华大学刘光庭教授和他的学生将断裂力学引入仿真计算中,应用人工短缝成功地解决了溪柄碾压混凝土拱坝的温度拉应力问题。曾昭扬教授等系统地研究了碾压混凝土拱坝中诱导缝的等效强度、设置位置、开裂可靠性问题,其成果直接被沙牌碾压混凝土拱坝所采用。张国新教授、李荣湘教授在用边界元方法计算碾压混凝土坝温度应力方面取得了新进展。天津大学赵代深教授、李广远教授结合国家攻关项目在混凝土坝全过程多因素仿真分析等方面取得了一批成果。武汉大学黄晓春博士、梁润教授等针对龙滩碾压混凝土重力坝施工温控问题,研究了横缝间距、层面间歇的影响,提出了坝面防裂的温度分析方法。方坤河教授、曾力等对碾压混凝土凝结状态的现场测定技术进行了开发。王建江博士提出了旨在减少单元数量的非均质单元法。李国润教授在铜街子工程的温度应力计算中,比较了不同浇筑温度对温度应力的影响。大连理工大学在碾压混凝土拱坝的三维应力场仿真分析

中,根据大坝分层的施工特点,将混凝土水化热单独考虑,提出了仿真分析的波函数法,按照 Bazant 混凝土固化徐变理论,提出了混凝土的非线性徐变应力计算方法,考虑了混凝土不可恢复徐变对坝体应力状态的影响,并将之用于沙牌碾压混凝土拱坝的仿真计算。河海大学在 1990~1992 年结合小浪底工程完成了大体积混凝土结构的二维、三维有限元仿真程序系统,陈里红首次在温度应力仿真分析中考虑了混凝土的软化特性,并在龙滩碾压混凝土坝的温控设计中建立了一维、二维、三维有限元综合分析的数值模型。这些研究成果大都是结合具体工程进行研究,形成了各具特色的研究方法。从仿真计算结果来看,温度场的计算结果非常接近,但应力成果有一些差别。

1.2.3 碾压混凝土坝温度场和温度应力场的研究方法

1.2.3.1 碾压混凝土坝温度场的研究方法

进行碾压混凝土坝的温控防裂研究,首要的是进行大坝温度场的研究,其研究方法一般可分为解析方法和近似方法两类。

解析方法的理论根据是固体热传导理论,对于具体的工程问题,可根据实际情况研究其边界条件和初始条件,然后求得函数形式的解答。但是水工结构实际中遇到的问题大多数边界条件比较复杂,难以求出理论解答。解析方法一般可用于验证数值解法的可靠性。

近似方法包括数值解法、图解法等。近似方法一般多指数值解法。数值解法根据其计算原理的不同又可分为差分法、边界元法和有限元法。

(1) 差分法。在有限单元法出现以前,温度场的数值计算多采用差分法。差分法过程简单,计算量小,适用于一些边界规则简单的低维问题,而对边界复杂、材料多样的多维问题则比较困难。

(2) 边界元法。边界元法具有以下优点,沿计算域边界离散,使问题的维数降低,计算精度提高,数据准备少,但是要用边界元模拟混凝土坝的施工过程及多种材料比较困难。

(3) 有限元法。有限元法是随着计算机的出现而迅速发展起来的数值方法。有限元法把求解一定边值条件下的温度场转化为求解一个泛函的极值问题,先把计算域离散为有限个计算单元,在单元内采用一定插值函数,则单元内温度可近似由单元的结点温度插值得到,然后建立单元结点温度的线性方程组,再解方程组求出结点的温度值。有限单元法易于适应不规则边界和多种介质混合域问题,且易于在局部调整单元尺度以提高计算精度;另外,用有限元法计算温度场可以与温度应力场的计算嵌套进行,这是其他数值解法目前难以做到的,用有限元法求解非稳定温度场时,一般采用有限元—差分解法,即用有限元法离散空间域,用差分法离散时间域。

1.2.3.2 碾压混凝土坝温度应力场的研究方法

碾压混凝土坝温度应力场的分析方法,可分为以下三种。

(1) 理论解法。由于碾压混凝土坝边界条件和坝内材料的复杂性,要求解满足所有条件下的温度应力解答几乎是不可能的,所以此方法在工程实例中基本没有应用。

(2) 实用算法。在实际工程中为了简单迅速地估算出温度应力,常采用一些实用算法,包括约束系数法、约束矩阵法、广义约束矩阵法。

1) 约束系数法。此种方法认为大坝混凝土冷却时受基岩的约束使大坝沿层面水平方



向产生拉应力。但无法考虑变温或应力过程。约束系数法计算简单,易于操作,但由于坝体内各部分的约束系数是不同的,而且升温过程中没有考虑混凝土的压应力,所以此方法的计算结果可能偏于保守。

2) 约束矩阵法。碾压混凝土坝是不设纵缝的,进行全层面浇筑,可认为在一个浇筑层水平方向的温度分布实际上是均匀一致的,但浇筑块沿高度(即垂直)方向各层的温度分布则是不均匀的。若坝的断面在高度方向有 n 个水平层,当第 i 层 ($i=1, 2, \dots, n$) 的温度均匀下降 1°C 时,在第 j 层中部产生的水平正应力可以表示为

$$\sigma_{ji}^0 = R_{ji} \alpha E_c \quad (1.1)$$

式中 R_{ji} ——第 i 层温度下降 1°C 时,外部对第 j 层的约束度(即约束系数),也就是第 i 层温度下降 1°C 产生的应力影响第 j 层应力的百分数。

若各层温度下降 ΔT_i ($i=1, 2, \dots, n$),则第 j 层中部水平正应力 σ_j 为

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^n \sigma_{ji}^0 \Delta T_i = \alpha E_c \sum_{i=1}^n r_{ji} \Delta T_i \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (1.2)$$

各层应力与各层温降之间的关系由式(1.2)扩展可得

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \vdots \\ \Delta T_n \end{Bmatrix} \alpha E_c \quad (1.3)$$

即

$$\{\sigma\} = \alpha E_c [R] \{\Delta T\} \quad (1.4)$$

以上 $[R]$ 为约束度矩阵,可由二维有限元法求出。由式(1.4)求出各层最大拉应力,并将其与允许抗拉强度比较,可得到各层最大允许温差。

3) 广义约束矩阵法。约束矩阵法的缺点是只能反映变温沿高度方向上的变化(实际上约束应力亦沿水平方向变化)。为此,广义约束矩阵法作了如下改进:①将典型大坝剖面不仅沿高度方向分成 n 层,而且将每层沿水平方向分为 m 个单元,整个坝体的单元数为 $N=nm$;②令第 i 个单元的温度下降 1°C ,求出第 j 个单元中的应力(或应变),这样就可得到既能反映变温沿坝高方向变化,又能反映变温沿水平方向变化的 $N \times N$ 阶约束矩阵。

这些实用算法无法考虑混凝土的徐变、混凝土弹性模量随时间的变化,而只能用一个粗略的综合影响系数来代替,这很难正确反映混凝土坝温度应力的真实状况。因此,需定量地给出合理的混凝土坝温度应力分析,还需借助数值方法。

(3) 数值方法。数值方法有边界单元法和有限单元法两种方法。边界单元法节省计算时间,但若考虑施工过程中的徐变应力场及坝内介质非均匀性,则会遇到很大困难,而且目前该计算方法在混凝土坝应力场中的运用甚少。

有限单元法是目前较为成熟的计算混凝土坝温度场和应力场的数值方法。根据温度应力随时间变化的特点,一般采用增量初应变法。即在每一计算时段初用前一时段的应力增量计算徐变变形增量,并将其看作计算时段的初应变而转化为等效结点荷载,再求解计算时段的位移增量和应力增量。为了将此方法实用化,减少计算机存储量,英国著名学者 O. C. Zienkiewicz 提出了等时段条件下徐变增量的递推算法;在此基础上,我国水工结构

专家朱伯芳院士又提出了不等时段条件下徐变增量的递推关系。为了进一步提高计算精度,朱伯芳院士又提出了混凝土结构徐变应力分析的隐式解法。这些改进工作使得在微机上可以利用有限元时间过程分析法计算混凝土坝的温度应力。

1.2.4 发展趋势

(1) 损伤力学和断裂力学分析。在通常的结构分析中,混凝土是按连续介质模型进行分析的。但在实际的混凝土中,广泛地存在着微小裂纹和缺陷,如水泥砂浆与骨料之间的裂纹,以及可能出现的水泥浆内部和骨料内部的裂纹,其中前者是最主要的裂纹。由于这些微裂纹的存在,使混凝土结构在外部荷载、变温等因素作用下,呈现出明显的脆性,即抗拉强度很低,只有抗压强度的 $1/10$ 左右;长期加载时的极限拉伸变形小,只有 $(1.2 \sim 2.0) \times 10^{-4} \text{m}$ 。因此,混凝土不是真正的连续体,而是具有许多裂纹的物体,特别是碾压混凝土拱坝,通常设诱导缝。为了研究这些问题,在 20 世纪产生了断裂力学,并广泛应用于金属结构的分析,解决了低应力断脆等问题。在 20 世纪后期,力学家和工程技术人员进一步应用断裂力学的方法,开始了对混凝土结构的研究和分析。20 世纪 80 年代初,人们又建立了损伤力学学科,它研究从原始存在的微小缺陷,到外因作用下形成宏观裂缝,直至断裂的全过程。损伤力学也开始应用于混凝土结构。

(2) 可靠度分析。结构的可靠度分析,是引用概率论方法来表示结构的可靠度。已经有学者做了一定的工作,但有待进一步加强研究。

(3) 温控的优化和专家程序系统。在温控设计中引入优化方法,可以提高设计水平,节省投资和工程量。若把专家的工作经验编入优化程序,形成专家程序系统,则可以使设计水平进一步提高。

(4) 反演分析^[9]。由于大坝的实际热力学参数与计算采用的热力学参数(通常为室内试验值)不完全相同,大坝的温度场和温度应力也不完全与设计计算结果一致。为了解决这个问题,可充分利用反演分析的方法,从实际观测的温度和应力来反推其材料的热力学参数。工程界对这个问题很感兴趣,力学界也在广泛地开展研究,力图应用于工程实践。但由于反演分析问题受到理论上的束缚,即在反演分析中,可能出现不确定性问题(不稳定、不唯一、不收敛),因此,这是个较困难的问题,有待进一步深入探讨^[7]。

(5) 耦合分析。温度场、应力场和渗流场等因素相互影响的耦合问题,对于水利、土木工程来讲,需要进行研究,以判别耦合影响的大小及如何考虑耦合的影响。如果能证明其影响很小,则可以使人们对此问题有明确的认识,从而确定是否需要在设计中考虑。

1.3 大体积混凝土结构温度应力补偿研究

采用膨胀混凝土技术,美国、前苏联、日本都有研究,但是国外的研究还只限于室内实验阶段。我国科技工作者在这方面作出的成果已经在工程中得到应用。普通硅酸盐产生的自生体积变形是收缩的。MgO 微膨胀混凝土具有以下特点:①一定的水泥及骨料等材料配合比情况下,MgO 混凝土的最终膨胀量只与 MgO 含量有关;②常温条件下 MgO 的水化是单调增加的不可逆过程;③ MgO 混凝土的膨胀速率与养护温度有关;④ MgO 水化结束则膨胀变形结束。