

强 晟 张 杨 © 著

大体积混凝土施工期 温度场和应力场的 仿真算法研究



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

大体积混凝土施工期温度场 和应力场的仿真算法研究

强 晟 张 杨 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

目前的混凝土施工期温度场和应力场算法的精度和效率已难以满足日益增长的工程设计和施工的需求,本书从水化放热模型、p 型自适应、冷却水管模型、并行算法等方面进行了创新和改进,提高了算法的精度和效率,扩大了计算规模,降低了前处理的难度,可供相关的研究、设计、施工人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大体积混凝土施工期温度场和应力场的仿真算法研究
/ 强晟,张杨著. —南京:河海大学出版社,2013.3
ISBN 978-7-5630-3326-3

I. ①大… II. ①强…②张… III. ①大体积混凝土
施工—温度场—仿真算法—研究②大体积混凝土施工—应
力场(力学)—仿真算法—研究 IV. ①TU755.6-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 040297 号

书 名 / 大体积混凝土施工期温度场和应力场的仿真算法研究
书 号 / ISBN 978-7-5630-3326-3/TU·97
作 者 / 强 晟 张 杨
责任编辑 / 谢业保 成 微
封面设计 / 黄 煜
出版发行 / 河海大学出版社
地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编:210098)
电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)
网 址 / <http://www.hhup.com>
照 排 / 南京紫藤制版印务中心
印 刷 / 南京玉河印刷厂
开 本 / 787 毫米×960 毫米 1/16
印 张 / 11
彩 插 / 1 页
字 数 / 210 千字
版 次 / 2013 年 3 月第 1 版
印 次 / 2013 年 3 月第 1 次印刷
定 价 / 32.00 元

前言

近年来,我国为了中西部开发建设和拉动国内经济发展的需要,在大型基本建设工程方面的投资力度很大,在这些工程中,混凝土结构占据了很大的比例。混凝土是当代最重要的建筑材料之一,应用广泛。然而,自混凝土诞生以来,其裂缝问题就普遍存在,很多裂缝在施工期就已经产生或萌芽,对结构的安全和寿命影响很大。在混凝土施工期裂缝产生的诸多原因当中,由温度产生的拉应力占主要成分。很多混凝土结构在设计阶段考虑的应力产生因素多为运行期荷载,而对施工期应力的重视程度不够。因为施工期混凝土温度场和应力场发展变化非常复杂,涉及的因素很多,相应的计算也非常麻烦,有些算法的精度和效率已难以满足日益增长的工程设计和施工的需求。因此,笔者将近年来指导开展的混凝土施工期温度场和应力场数值计算方法方面的创新研究成果集成成书,可供相关的研究、设计、施工人员参考。

数值算法研究中不断追求的目标是更准、更快。一般来说,高精度的算法往往计算效率较低,高效率的算法往往要以适当牺牲精度为代价。我们在发展高精度、高效率算法的同时,也非常注重二者的协调。本书的第1章是绪论,主要阐述此前的研究和应用中存在的不足。第2章主要从算法精度方面进行改进,提出了一种新的考虑温度历程影响的混凝土水化放热模型,利用这个模型能用实验室绝热温升设备获得的混凝土绝热温升曲线反演任何初始温度和边界条件下混凝土温度场。第3章将p型有限元引入混凝土非稳定温度场的算法和程序中,不仅提高了计算精度,也进一步提高了算法效率。为了降低人为因素对计算精度的影响,第4章研究了非稳定温度场的p型有限元算法的自适应方法,并分析了几种主要因素对计算误差的影响。第5章和第6章从不同角度对混凝土施工温控中常用的冷却水管的仿真算法进行了研究。其中,第5章在对比目前各种冷却水管算法模型的基础上,先引入并改进了埋置水管模型,该改进模型既降低了前处理难度,提高了计算效率,又改善了原有模型的计算精度;然后又发展了p型改进埋置水管模型,进一步解决了冷却水管在大尺寸有限单元中的计算精度问题以及多根冷却水管在同一个有限单元中的前处理和计算精度问题。第6章针对水管周围混凝土温度梯

度大、计算精度差的问题展开研究,在水管周围不同半径距离内温度梯度不同的基础上,提出一种分而治之的高精度高效率算法,新算法对薄壁类大体积混凝土结构尤其具有参考价值。第7章提出一种混凝土表面防裂安全系数的快捷计算模型,通过简单测量内外温差可快速获得当时的表面防裂安全系数,便于现场工程技术人员使用。第8章从计算机CPU趋于多核化的角度考虑,将目前常用的混凝土温度场和应力场仿真计算程序进行并行化,缩短了计算时间,提高了计算规模。

本书的研究是在作者主持的国家自然科学基金项目(51109071)和江苏省自然科学基金项目(BK2011450)支持下开展的,特致感谢。先后参与本书内容研究的研究生主要有朱振泱、颀志强、刘敏芝、王海波、王向荣等,参与本书修改的研究生郑伟忠,向他们的辛勤努力致以感谢。

作 者

二零一三年二月二十日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 基于水化度理论的混凝土热力学特性研究进展	3
1.3 p 型有限元及温度场算法研究进展	5
1.4 冷却水管计算模型研究进展	8
1.5 混凝土表面防裂方法研究和应用现状	11
1.6 并行计算在水利工程中的应用进展	13
第 2 章 考虑温度历程的混凝土水化放热模型研究	14
2.1 引言	14
2.2 混凝土水化度和活化能与气体常数的比值关系研究	15
2.3 混凝土水化放热模型研究	20
2.4 算例	23
2.5 小结	29
第 3 章 非稳定温度场的三维 p 型有限元方法研究	30
3.1 引言	30
3.2 三维阶谱技术	30
3.3 三维非稳定温度场的阶谱有限元法	33
3.4 算例	36
3.5 工程应用	38
3.6 小结	45
第 4 章 非稳定温度场的 p 型自适应有限元分析	46
4.1 引言	46
4.2 p 型有限元自适应升阶方案的选择	47
4.3 误差估计与自适应策略	47
4.4 不同因素的影响分析	48
4.5 小结	53

第 5 章 冷却水管 p 型改进埋置单元法研究	54
5.1 引言	54
5.2 水管埋置单元法的改进	55
5.3 p 型改进埋置单元法	69
5.4 算例	78
5.5 小结	90
第 6 章 水管周围混凝土的温度空间梯度及其算法研究	92
6.1 引言	92
6.2 水管周围混凝土温度场特性	92
6.3 薄壁结构水管周围温度梯度研究算例	94
6.4 非薄壁结构水管周围温度梯度研究算例	99
6.5 离散水管模型迭代求解混凝土温度场的误差产生原因分析	101
6.6 大体积混凝土水管冷却新算法	104
6.7 算例	110
6.8 小结	120
第 7 章 混凝土表面安全系数计算模型研究	121
7.1 引言	121
7.2 模型的建立	122
7.3 不同边界条件下基本公式的适用性	128
7.4 安全系数计算模型对多种混凝土的适用性	135
7.5 小结	142
第 8 章 混凝土温度应力场的并行算法研究	143
8.1 引言	143
8.2 并行计算基础	144
8.3 MPI 介绍	148
8.4 MUMPS 介绍及引入方法	150
8.5 串行程序分析及并行化	150
8.6 并行效率分析	155
8.7 小结	157
参考文献	158

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

在水利工程、交通工程、国防工程等领域,很多混凝土结构因为长年与水接触,对防裂要求很高。而施工期是混凝土结构最容易出现裂缝和积累拉应力的阶段,这个阶段混凝土应力的影响因素很多,计算比较困难,其中非稳定温度场导致的拉应力往往占据主要成分。目前对于重要的工程,一般是采用数值仿真方法对施工期混凝土温度场和应力场进行模拟。近年来,我国很多大型混凝土结构逐步开工建设,并对设计和施工从质量和速度方面都提出了更高的要求。因此,现代大型混凝土工程的建设也对相应的计算机仿真规模、精度、速度等方面都提出了进一步的要求。本书作者在多年混凝土温控防裂的工程实践中体会到目前常用的一些混凝土结构施工期温度场和应力场仿真算法中还存在着不足,有必要研究改进,以进一步适应日益发展的现代设计和施工的需求。对目前认识到的算法问题,下面分而述之。

混凝土的绝热温升曲线是影响混凝土早龄期温度场的主要因素,而温度历程对这条曲线有着显著的影响,对温度场计算结果自然也产生直接的影响。混凝土的绝热温升曲线可以用绝热温升仪测出,也可以通过在非绝热混凝土试验块测点数据的基础上反演得出。一般情况下,通过现场非绝热试验块得到的数据,反演计算获取绝热温升曲线的成本并不低,因为需要对多种不同温度历程条件进行试验并获取相应的绝热温升曲线,以适用于不同季节的浇筑工况,且这种做法的精度一般。昂贵的大型绝热温升仪虽然可精确测出混凝土绝热温升曲线,但绝热温升仪中的试块温度与真实情况下的温度一般差异较大。由于混凝土温度对混凝土水化放热速率往往有较大的影响,所以绝热温升仪获取的资料不能很好地直接应用于工程实践中。因此,在工程应用中如何考虑混凝土温度对水化放热速率的影响,是混凝土温度场仿真计算中的一个重要的难点问题,有必要对前人的有关成果进一步改进,提高不同温度历程下的计算精度,这部分研究成果详见第 2 章。

有限元方法是大体积混凝土非稳定温度场和应力场施工和运行过程仿真计算

的常用工具。在大体积混凝土浇筑早期,非稳定温度场的边界往往是温度变化剧烈、温度梯度较大的区域,一般需要在这类区域划分较密的网格,但当坝体很大或浇筑层很多时,常规有限元温度场和应力场计算程序往往不能达到令人满意的效率。如果为了照顾效率而降低网格密度,就无法得到满意的计算精度。而且,对施工过程的温控措施进行优化时还要对很多工况对比计算,因此,此类项目的研究往往费时费力,无法完全满足设计和施工的需要,有必要进行算法方面的改进,以提高效率和精度,这部分研究成果详见第3章和第4章。

为了控制混凝土的内部温度,大体积混凝土内部往往布置冷却水管。冷却水管分铁管和塑料管,铁管的导热性能好,而塑料管则更容易布置。混凝土是热的不良导体,水管附近混凝土温度梯度很大。如何精确高效地计算出水管及其周围的混凝土温度场,也是一个难点问题。目前,冷却水管的离散迭代算法可以计算出水管及其周围的混凝土温度场,但用该方法求解混凝土温度场问题,如何划分单元是一个重要问题,考虑到由于水管半径只有1~2 cm,为了保障计算精度,在水管附近必须采用密集网格。而如果在水管附近采用密集网格,对于大体积混凝土三维温度场的模拟往往需要大量的节点,对计算效率影响很大,同时,其计算精度对网格密度和某些参数取值的依赖性较大。随着仿真计算规模的不断增大,有必要在前人成果的基础上提出一些建模更简单、精度和计算效率更高的水管冷却混凝土温度场的算法,这部分研究成果详见第5章和第6章。

在混凝土的温控防裂中,内外温差是一个重要的温控指标,但是在目前的规范和权威文献中,混凝土内外温差的定义和使用标准并不明确。应用者在使用过程中往往产生困惑,在现场实际测量时得到的内外温差有时候也并不是混凝土的最大内外温差,或者不是对混凝土表面应力有影响的内外温差,此时的内外温差不适合作为进行温度控制的指标,也难以达到温控防裂的目标。因此,有必要对混凝土内外温差的合理定义和控制标准进行研究,这部分研究成果详见第7章。

较合理的温控计算应该伴随着施工过程实时地进行,这样才能够参照现场多变的实际情况对计算边界条件和参数进行不断地调整和修正,从而得到更为有效的结果。这对大规模算例的计算速度提出了更高的要求,常规的串行计算程序在保证高精度的情况下有时会难以满足施工现场的实际需要。除了从算法方面提高效率,我们还可以从硬件角度提高效率。计算机CPU的频率对串行计算速度有直接影响,但近年来该频率提升不显著,而单机的CPU趋向多核化,因此串行计算有必要转向并行计算。并行计算技术作为提高计算效率的有效手段已经比较成熟,在各个领域得到了广泛的推广和应用,如果将并行计算引入到温控仿真计算中,对于缩短计算时间及实时反演和仿真是有一定意义的,这部分研究成果详见第8章。

1.2 基于水化度理论的混凝土热力学特性研究进展

国外对水泥水化的研究很多,多采用先进的试验方法对水泥水化过程进行观测,根据观测结果阐述水泥水化过程和机理。Kjellesn K. O. (Kjellsen K. O., 1997) 采用 X 射线对混凝土水化过程中形成的“空壳”进行跟踪观测,从“空壳”的变化过程研究混凝土的水化;Ye G. (Ye G., 2003) 利用超声波脉冲对水泥基材料的微观结构形成过程进行数值模拟和试验,并利用试验结果修正数值模拟,从而将水泥的水化分为两个重要的过程;Morin V. (Morin V., 2002) 利用超声波对混凝土的水化过程进行观测,得到混凝土内部毛细管的演变过程。类似的研究还有 Jhon J. (John J., 2003)、Bertil P. (Bertil P., 1996)、McCarter W. J. (McCarter W. J., 2003) 等,这些研究方法虽然各不相同,但结果都是基本一致的。普通硅酸盐水泥的水化是熟料组分、硫酸钙和水发生交错的化学反应,反应的结果导致水泥浆不断稠化和硬化,即:从化学上讲,水化是一种复杂的溶解-沉淀的过程,各种水泥矿物质以不同的速率同时进行,而且彼此影响。水泥水化过程可以分为 5 个阶段,即初始水解期、诱导期、加速期、衰退期和稳定期。水泥水化机理的解释有多种,至今仍无统一的结论,Douigill J. W. 等人(Douigill J. W., 1968) 用一种类似“硅酸盐框架”结构的假设,认为:水泥用水拌合后,在硅酸盐颗粒周围生成半渗透的硅酸盐水化物外壳,它将无水的表面和主液体隔开,因而产生诱导期,而钙离子能够通过这层外壳进入主液体,硅酸盐离子则不能,仍然留在外壳内,因而使渗透压增大。当渗透压增大时,耗尽了钙的水化硅酸盐被挤入主液体中,这时,它又与钙离子结合形成空心管状的或其他形状的颗粒,标志着诱导期的结束。

混凝土作为一种混合材料,影响其水化反应的因素很多,包括水泥的质量、水灰比、矿物质掺合料、外加剂、水化温度等。提高水泥细度,增加表面积,可以使水化反应诱导期缩短(Mindess, S., 1981; Bentz, D. P., 1999)。水灰比较大时,溶液中的离子的溶解度较大,则水化速度越快(Mills, R. H., 1966; Hansen, T. C., 1986)。采用外加剂可以调节水泥的水化速率,常用的外加剂有促凝剂、缓凝剂、快硬剂等。绝大多数无机电解质都有促进水泥水化的作用,有机外加剂对水泥水化有延缓作用(Van Breugel, K., 1997)。矿物掺合料主要包括粉煤灰、矿渣、火山灰等,对水泥水化的影响各不相同。水泥中如掺粉煤灰能够减小水化放热量和水化反应速率(Cengiz D. A., 2002; Vagelis G. P., 2000; Tsimas S., M., 2005),矿渣水泥比普通水泥的水化热要低,而且和普通水泥的水化放热过程相比,在水化过程有

可能经历两个水化放热高峰(Maria S., 2003; Sioulas I. B., 2000),火山灰水泥由于矿物成分加速水泥的水化,水化放热速率要高于一般水泥,但总的水化放热量降低(Sanchez de Rojas M. I., 1996; Helene Z. Marcel C., 1996; Jamal S. M., 1995)。

水化度(Degree of Hydration)(Schutter G. D., 1995)即水化反应程度,反映的是与胶凝材料完全水化的状态相比,某一时刻水化反应所达到的程度。研究(Copeland L. E., 1960)表明,温度对水泥水化反应速率的影响较大,后者随温度的升高而加快,且服从 Arrhenius 函数。成熟度函数是温度与龄期的函数,最初用于刻画混凝土强度随水化反应变化的特性。随着 Arrhenius 函数逐渐被人们所接受,Freiesleben H. 等于 1977 年提出基于该函数的等效龄期成熟度函数(Freiesleben H. P., 1977),在描述混凝土强度的同时,也用于反映混凝土的热学特性。对于同种混凝土而言,无论其养护温度和龄期如何变化,成熟度相同,则水化度也相同,其热力学性能必然也相同。因此,水化度概念成为混凝土等效龄期成熟度与热力学特性之间的桥梁,能更直观地表述混凝土龄期、温度以及水化反应对其热力学特性的影响。基于上述思想,国外研究者在试验基础上提出了若干水化度与等效龄期成熟度的函数关系式,主要有复合指数式(Knut O. K., 1993; Frank M. B., 1998)、双曲线式(Knudsen, T., 1982)和指数式(Hideaki N., 1999)。

混凝土的各种热力学特性,如绝热温升、导热系数、强度、弹性模量、热膨胀系数等都与水化度有关,且可用水化度来表示。Kim J. K. 指出用来描述水化反应速率的混凝土活化能并非常数,而是不断变化的,并在试验基础上建立了活化能函数(Kim J. K., 2001);文献(Miao, B., 1993)对基于水化度的四种水化放热模型做了对比,并推荐在研究中采用复合指数式;Anton K. S. 等(Schindler A. K., 2002)建立了基于水化度的导热系数计算模型,计算结果显示混凝土水化过程中导热系数随水化度的增加而减少, Schutter G. D. (Schutter G. D., 2002)和 Reinhardt H. W. 等(Reinhardt H. W., 1982)也得到了相同的结论;不少学者提出了基于 Arrhenius 函数和等效龄期的混凝土抗压强度模型(Gilliland J. A., 2002; Nicholas J. C., 1992; CEB-FIP, 1990),Hattle J. H. (Hatte J. H., 2003)认为混凝土在由液态向固态转化的过程中,泊松比是不断减小的,并提出了基于等效龄期的混凝土泊松比计算式,文献(Erika E. H., 2001)列出了三位学者得到的混凝土热膨胀系数的变化过程,尽管三者早期的变化幅度有所不同,但均承认混凝土水化早期热膨胀系数快速减小,1 天后趋于稳定;1962 年,England 通过室内试验研究了徐变度随温度的变化规律(England G. L., 1962)。上述研究表明,人们对混凝土的水化放热过程及热力学特性的认识已经取得了较大发展,从而提高了对混凝土温度与应力问题的研究水平和数值模拟的可靠性。

1.3 p 型有限元及温度场算法研究进展

1.3.1 p 型有限元方法研究进展

有限元单元法作为一种数值模拟方法,根据其提高精度的途径一般分为两种:h 型和 p 型。h 型(Zienkiewicz O C, 1991; Zhu J Z, 1991; 陈胜宏, 1996; Chen S H, 1996; Lohner R, 1988; 李锡夔, 1994; Chen S H, 2000)方法通过减小单元尺寸,增加单元个数和节点个数,来提高有限元解的精度;p 型(Zienkiewicz O C, 1983; Barna A Szabo., 1986; Carnevall P, 1993; Pakal Rahulkumar, 1997; 诸德超, 1993; 程昭, 1999)方法不改变网格,通过升阶谱,扩大容许函数空间,增加基函数个数,从而使计算值逼近真实值;两者相结合为 hp 型(Lawrence Chilton, 1997; Zienkiewicz O C, 1989; Georges M K, 1991)。目前,p 型有限元一般都采用阶谱单元,从这个角度来说,p 型有限元法和阶谱单元法是同一个概念。

与 h 型有限元法相比,p 型有限元法刚刚提出时没有得到足够的重视,人们只是将其作为一种纯理论的方法,没有进行应用推广。近年来,随着人们对该方法的认识逐步加深,p 型有限元法在国内外得到了越来越多的发展和应用。Babuska (Babuska I, 1981; Babuska I, 1989)等对 p 型有限单元法进行了系统的理论分析,还详细讨论了 p 型有限元法的形函数优化选择技巧,并采用共轭梯度和多重迭代技术的 p 型有限元求解了有关线弹性问题。Wiberg(Wiberg N E, 1988)等提出了求解椭圆或双曲线微分方程的升阶谱有限元自适应计算格式,求解了线弹性的静力学问题、动力学中的特征值问题以及对流扩散问题。Wilson(Wilson C J, 1992)等利用 p 型有限元法求解了粘弹性阻尼计算的问题。诸德超(诸德超, 1993)是国内较早涉及 p 型有限元研究的专家,给出了一维升阶谱形函数和积分公式的显式表达式,提出了数值计算误差积累问题的解决方法,同时介绍了二维条件下的升阶谱有限元格式。Carnevali(Carnevall P, 1993)等提出了多项式表达形式的三维 p 型有限元形函数,分析了三维线弹性静力问题和动力问题。Rahulkumar (Pakal Rahulkumar, 1997)等人用 p 型有限元法求解带奇点的应力集中问题,计算应力集中因子时采用了位移置换的技巧,采用该技巧后所求问题中的奇异项、常数项和高阶的非奇异项都能进行合适的模拟。在求解大型 p 型有限元方程方面, Morris(Morris R B, 1992)等提出了一些自适应技巧,使得解方程过程更加方便。Papadrakakis(Papadrakakis M, 1994)等人提出了求解大型方程的预处理共轭梯

度法和区域分解法。Fish(Fish J, 1997)等人提出了用多重预处理方法求解 p 型有限元自适应问题的迭代格式。在网格相同的条件下, p 型有限元计算量比 h 型有限元大, 为了减少计算过程中的数值积分的工作量, Hinnant(Hinnant H E., 1994)提出了矢量积分法。程昭(程昭, 1999)、陈胜宏(陈胜宏, 2001)针对水工结构分析问题提出了三维升阶谱有限元分析方法, 并进一步提出了二维问题的 p 型自适应分析策略, 将自适应有限元方法归类为全域升阶方法、单元升阶方法和自由度升阶方法等三类。李永明(李永明, 2004)等人将阶谱思想与块体元法相结合, 并应用于复杂坝基上; 费文平(费文平, 2003; 费文平, 2004)等人将 p 型自适应有限元分析方法推广到三维弹粘塑性领域和渗流领域、三维动力相应分析方面。何则干(何则干, 2006)、许桂生(许桂生, 2006)、彭成佳(彭成佳, 2007)将 p 型方法应用于复合单元法, 进一步改善了复合单元法的计算结果。

由前人的研究成果可以看出, p 型有限元及其自适应方法已经越来越得到研究者的重视, 国外的研究重点是从理论上解决 p 型自适应有限元的数学方法和技术, 国内的研究主要在不同方面对 p 型自适应有限元进行应用, 并在应用中不断对该方法提出一些改进和发展。目前这些成果主要还集中在二维问题上, 且在三维非稳定温度场领域的相关研究成果很少。

1.3.2 温度场的数值计算方法研究与应用现状

一般来说, 几乎所有的数值计算方法都可以用于计算温度场, 目前人们比较常用的温度场计算方法主要有解析法、差分法和有限元法。

目前国内的有关规范和设计手册中计算温度场时一般都采用解析法和差分法。对于比较简单的结构, 比如板、柱、梁等温度场的求解等, 可以直接采用解析解, 我国的朱伯芳院士很早就在这方面展开了研究工作(朱伯芳, 1999); 张子明等人(张子明, 1996)提出了模拟碾压混凝土坝浇筑过程的一维温度场的解析解; 王振波(王振波, 1999)等也将复杂的三维热传导问题简化为一维热传导问题, 得到了瞬态温度场的解析解, 为工程设计和施工提供了一种简捷有效的计算方法; 张德兴等人(张德兴, 2001)采用文克尔假定和折线假定, 建立了地基对板的双向约束以及非均匀受力的计算模型。目前国内对于某些复杂问题或者组合结构, 将其简化为几个简单构件分别进行计算, 但存在某些简化不合理以及计算结果误差较大等问题。

对于复杂结构的温度场问题, 目前一般需要用其他数值方法求解。目前对于工程中常常遇到的混凝土温度场和温度应力问题, 最常用的数值方法有差分法和有限元法, 前者是基于热传导方程对问题进行差分求解, 后者的理论基础是泛函变分原理。在有限元方法获得广泛应用之前, 差分方法是求解固体场问题的主要手段。

差分求解系列包括:普通差分法和破开算子法等。

采用普通差分方法求解温度场时,需要在时间上划分步长,在空间上划分网格。差分法的网格划分一般对节点之间的空间距离有一定的要求,并要求形状比较规则,因此难以适应实际结构形状复杂多变的情况。在时间步长的划分方面则对于不同的差分格式有不同的要求,因此难以适应仿真分析中为了提高效率进行变步长的要求,从而限制了各种优化方法的采用。另一方面,采用差分方法求解温度场、温度徐变应力不利于编制集成化的计算分析软件。

破开算子法是一种应用于数值计算中的分步解法,适用于简化求解多维空间的不恒定场问题。其本质是通过引入一个或若干个中间变量,将偏微分方程中的时间微商破开成为两个或更多的部分,从而将复杂偏微分方程分解为多个一维的偏微分方程,然后利用不同的差分格式分别进行求解,从而使计算大大简化。这种方法最初由苏联学者提出,董福品、朱伯芳等(董福品,1989)将这种方法用于计算混凝土温度场和温度徐变应力,并给出了具体的计算公式。算例表明,用破开算子法求解温度场和温度应力,其精度和速度均不亚于有限元法。尽管破开算子法有如此优点,但由于其仍是基于普通差分法的算法,所以对于差分法的一些固有缺陷也无法完全避免。

在20世纪60年代,有限单元方法开始逐步应用于混凝土温度场和温度应力分析。S. F. Wilson 为了求解德沃夏克坝的温度场,编制了二维温度场的有限元计算程序(Wilson E L., 1968),这是较早采用温度场进行计算的工程应用。Tatro 和 Schrader 在此程序基础上作出了修改,将其用于模拟柳溪坝施工中不同时期的温度场(Tatro Stephen B, 1988)。Ditchey E. J 等(Ditchey E J, 1988)将一维水平热流方法编制为程序,在微机上模拟了 Monksville 碾压混凝土坝施工中的坝体温度发展变化。Yonezawa Takushi 等(Yonezawa Takushi, 1988)实现了二维温度场和应力场的计算,并应用于实际工程。在20世纪80年代的计算机硬件和软件条件下,有限元仿真计算已经能够考虑温度和应力随时间变化的过程,在一定程度上满足了当时一些工程建设的需要。但在21世纪前,受到当时计算硬件水平的限制,对大型工程结构建模和仿真计算时仍不得不采用二维或三维大尺寸单元,因此,计算精度等方面会受到一定的影响。

国内方面,朱伯芳院士、潘家铮院士较早对大体积混凝土结构温度场和应力场的有限元算法进行了研究(潘家铮,1990;朱伯芳,1956;朱伯芳,1997),提出了一些大体积混凝土温度应力计算方法和有关温控防裂的方法,解决了近几十年来我国混凝土坝建设过程中的很多实际问题。近年来,随着碾压混凝土坝(RCCD)的发展,这类坝型的施工仿真问题凸显出来。碾压混凝土坝施工分层多、材料种类

多,导致在其温度场的数值模拟中网格剖分繁琐、仿真计算规模和解题规模大,所以在微机上进行前处理和计算很耗费人力和时间。在经历十多年攻关后,我国的科学家和工程师们提出了一系列有效的计算方法(黄达海,2000),比如朱伯芳院士提出“扩网并层算法”(朱伯芳,1994)、王建江提出的“非均质单元法”(王建江,1995)以及朱岳明等提出的“非均质层合单元法”(朱岳明,2006),还有陈尧隆等提出的浮动网格法(Yaolong Chen, 2001),刘宁的子结构技术(刘宁,1997)以及黄达海等提出的“波函数法”(黄达海,2003)等,这些温度场的新算法通过不同的方式降低了部分时间的解题规模,提高了计算速度,但计算中需要两套网格。此外,林绍忠、苏海东从减少自由度数和加快有限元方程组的求解速度两方面分别提出了超级元算法和改进的对称逐步超松弛预处理共轭梯度法,并将这两种快速算法在三峡工程中应用(林绍忠,2003)。

根据前人的文献以及笔者的经验(强晟,2007),在大体积混凝土浇筑早期,由于水泥的快速水化放热,混凝土非稳定温度场的边界往往是温度变化剧烈、温度梯度较大的区域,一般需要在这类区域划分较密的网格,但是在浇筑完毕后及运行期,混凝土温度场趋于稳定,不需要高密度的网格。阶谱有限元方法最大的特点是通过提高或降低单元阶次来调整数值模拟精度,有效地满足了同一套网格条件下不同计算时段对不同计算精度的要求。如果能将阶谱有限元方法应用于非稳定温度场的计算,则可以开拓一条解决这类问题的有效途径。

1.4 冷却水管计算模型研究进展

(1) 水管冷却温度场等效算法

冷却水管等效算法,最早由朱伯芳院士提出(朱伯芳,1999),主要原理是将水管的冷却效应等效到结构计算域内。对热传导方程进行了修正,通过利用有限元法求解修正后的热传导方程得到考虑水管冷却效应的混凝土温度场。这种方法的优点是不需要将冷却水管离散为有限单元,所以也无需将水管周围温度梯度较大的混凝土离散为有限单元,故单元数量较少,可以用较小的计算规模对大型结构进行仿真计算。由于将水管的冷却效应等效到整体计算域内,所以得到的水管冷却温度场是“平均意义上”的,无法得到水管周围的温度梯度较大区域的准确温度场。该方法计算结果比较适合用于规模较大的水管冷却混凝土温度场的计算和分析。

(2) 离散水管模型

离散水管模型,最早也是由朱伯芳院士提出的(朱伯芳,1999),朱岳明在此基

基础上进行了适当改进(朱岳明, 2003)。利用该算法计算水管冷却混凝土温度场时,水管被尽可能真实的剖分出来(如图 1.1 所示)。因此,此方法需要对已有的有限元模型进行二次剖分,直接剖分出水管边界,将水管周围温度梯度高的混凝土离散为有限单元。在计算中,根据实际情况对水管边界进行定义(实际工程中采用铁质冷却水管时将水管边界定义为第一类边界条件,使用塑料冷却水管时将其定义为第三类边界条件,根据不同材质和现场试验结果反演管壁的等效热交换系数)。该方法的主要优点是:能够通过迭代计算得到冷却水沿程水温的变化;此外,由于利用二次剖分技术(邓检强, 2009)可以灵活控制水管周围网格的加密程度,所以能够较好地模拟水管周围的混凝土温度场。该方法的主要缺点是:在对已有模型的二次剖分过程中大大增加了有限元模型单元和节点的数量,降低了计算效率,限制了该算法在大规模工程中的应用,另外,由于需要对水管所通过的单元进行二次剖分,所以对待剖分单元的单元形态要求较高,对于形态较差的单元,进行二次剖分后,单元形态会进一步恶化,导致计算结果尤其是温度应力场计算结果失真。

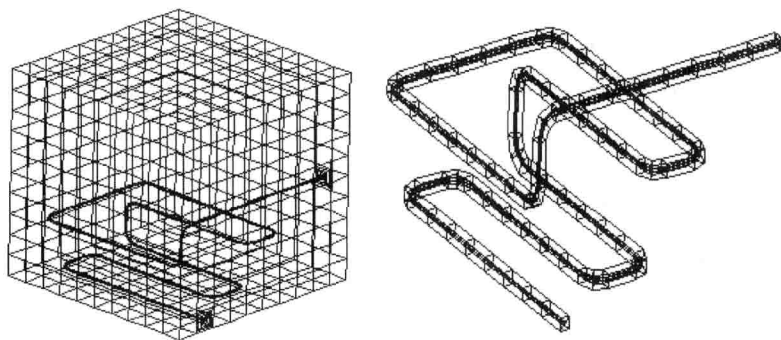


图 1.1 离散水管模型

(3) 冷却水管子结构法

这种方法由刘宁教授首先提出(刘宁, 1997),将有限元子结构理论引入到水管冷却温度场计算中。子结构算法继承了将实际水管“离散化”的基本思想,如图 1.2 所示,其基本思路是:为了减少由于二次剖分造成的计算规模增加,利用子结构理论,水管连同水管周围的单元作为子结构超单元,在计算中对单元内部节点进行“凝聚”,然后再合成整体方程,从而减少了整体方程的阶数,提高了方程求解的效率。得到外部节点的温度值之后,再利用“凝聚”过程中得到的“中间数

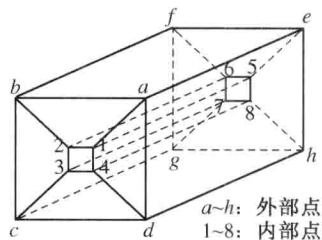


图 1.2 水管子结构

据”,通过“回代”运算得到内部节点的温度值。子结构算法虽然能够提高计算规模和求解效率,但是,“凝聚”和“回代”过程给沿程水温的迭代计算带来了负担,导致迭代计算需要多次“凝聚”及“回代”,增加了计算量,同时子结构算法在实际编程过程中涉及到大量中间数据的存储,将消耗大量的系统资源。总的来说,子结构算法在对规模不太大的模型进行仿真计算时,其计算效率提高较为明显,但是当模型规模进一步增大时,其加速效果将越来越不明显。另外,子结构算法同样要进行水管的离散,对基本模型(无冷却水管模型)的单元形态要求较高(一般均为六面体和五面体单元),增加了前处理工作的难度。

(4) 水管冷却温度场埋置单元法

水管埋置单元法是陈国荣教授首先提出的(陈国荣, 2009),该方法的主要原理是:将水管通过的单元视为水管埋置单元(见图 1.3),单元中的“水管”在计算时视为“虚拟水管边界”。这种方法的好处是,能够在不对现有模型进行二次剖分的基础上考虑水管对混凝土结构的冷却作用。在一定情况下能够较为精确地计算出水管周围的温度场。由于在实际工程制定温控措施的阶段,往往需要对比多套水管冷却方案的冷却效果,

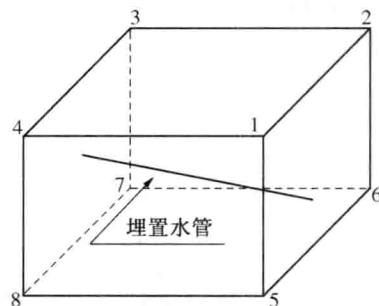


图 1.3 水管埋置单元

以往的做法是,对不同的冷却方案(往往水管布置密度和位置不同),分别建立不同的模型进行计算(实际操作中基本网格的剖分需要考虑水管的布置方式,所以水管布置方案不同,往往要求基本网格也不相同),这就导致了前处理工作量的翻倍,降低了工作效率。埋置单元法不需要对原有网格进行二次剖分,所以在前期建模进行方案对比分析时,可以不受水管二次剖分的影响,这个优点与等效算法一样。另外,更重要的是,由于未进行二次剖分,大大减小了计算量,提高了水管冷却温度场的计算效率和可计算模型的规模。

埋置单元法的上述优点使其具有广泛的工程应用前景,但该方法尚未考虑冷却水管沿程水温的变化。而在实际工程中,由于冷却水管长度往往较长,有的在百米以上(例如:四川官地碾压混凝土大坝在施工过程当中所采用的冷却水管长度达到了 300 m),水管会产生较大的进出口温差。如果在仿真计算中忽略冷却水管内沿程水温的变化及其对温度场的影响,得到的混凝土温度场是不准确的。另外,埋置单元法的实质是在水管埋置单元范围内对水管冷却效应进行了“等效”处理。如果水管埋置单元尺寸越大,则被均匀化的温度场范围越大。在实际工程的全坝模拟过程中单元尺寸往往比较大。而为了顾及水管周围温度场的计算精度,