

大体积混凝土温度场的仿真分析

董羽蕙, 屈俊童

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 温度的变化及其产生的影响在大体积混凝土结构中是不容忽视的. 分析温度场、研究温度裂缝以及进行温控设计、制定合理的温控防裂措施是工程中非常关注的问题. 本文主要阐述了用 ADINA 程序实现对温度场仿真的一些具体的做法, 结合工程实际, 进行了温度场的仿真分析, 得出了一些相关的结论.

关键词: 大体积混凝土; ADINA 程序; 温度场仿真分析

中图分类号: TV315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2004)05-0087-05

Temperature Field Simulation Analysis of Massive Concrete

DONG Yu-hui, QU Jun-tong

(Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract: The influence produced by the temperature change cannot be ignored in massive concrete structures. In engineering, much attention is paid to what are in massive concrete structures to analyze the temperature change, study thermal cracks, make designs of controlling the temperature change and draw up reasonable measures of controlling the temperature change. Expatiation is made on how to simulate the temperature field change through ADINA, based on simulating the temperature field of the project example. Some correlated conclusion is put forward.

Key words: massive concrete; ADINA program; temperature field simulate analysis

0 引言

在大体积混凝土结构中, 温度的变化及其产生的影响是不容忽视的. 许多已建和在建的大体积混凝土结构在施工、使用的过程中, 普遍存在因温度变化产生的温度应力而导致开裂的现象, 温度裂缝的存在或多或少地改变了设计时所预定的使用功能和应力状态, 留下了安全的隐患. 为了更好的进行温控设计, 制定合理的温控防裂措施, 在大体积混凝土结构中, 不进行温度场的仿真分析是不完整的.

随着计算机技术的高速发展, 计算方法和水平的不断改进和提高, 人们越来越重视计算机在工程中的辅助应用(CAE), 基于较成熟的有限元软件之一 ADINA, 结合贵州省仁怀市盐津桥水库重力墩的工程实例, 用计算机来模拟分析混凝土的浇筑, 进行温度场的仿真分析, 使我们对大体积混凝土浇筑后温度场的变化有一定的预见性, 对制订温控措施有一定的指导意义.

1 仿真分析中一些问题的处理

随着混凝土的浇筑, 结构的非稳定温度场满足热传导方程.

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: α —导温系数; θ —混凝土的绝热温升; $T(x, y, z, t)$ —温度函数.

混凝土的各项物理力学性能(弹模、徐变等)、水化热和边界条件都是随时间的变化而变化的, 即为时间的函数, 因而, 在进行温度场的分析中, 需要将物理力学性能、边界条件用时间函数表示成与时间相关的

收稿日期: 2003-09-05. 基金项目: 云南省科技厅基础研究经费资助(项目编号: 20015053).

第一作者简介: 董羽蕙(1957.9~), 女, 硕士, 副教授. 主要研究方向: 水工结构. E-mail: Lzhvqinj@public.km.yn.cn.

数学表达式,以便进行数值分析计算.在温度场的分析中,主要涉及到水化热和边界条件的变化,因而要将水化热和边界条件表示成时间的函数.

1.1 边界条件的处理

边界条件共分为四种,用以下四种方式给出.

第一类边界条件:混凝土表面温度是时间的已知函数,即

$$T(x, y, z, \tau) = f(x, y, z, \tau) \quad (2)$$

第二类边界条件:混凝土表面的热流量是时间的已知函数,即

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = f(\tau) \quad (3)$$

第三类边界条件:假定经过混凝土表面的热流量与混凝土表面温度 T 和混凝土周围介质温度 T_a 之差成正比,即

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_a) \quad (4)$$

式中: β 为混凝土的表面散热系数,此类边界条件表示了固体与流体(如空气)接触时的传热条件,实际情况大多数为此类边界条件.

第四类边界条件:当两种固体接触良好时,接触面上温度和热流量都是连续的,边界条件为

$$T_1 = T_2, \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n},$$

其中: λ_1, λ_2 分别为两固体的导热系数.

在四种边界条件中,以第一类边界条件即混凝土表面的温度是已知函数的处理最为简便.而在实际混凝土建筑物中,广泛适用的是第三类边界条件,即假定经过混凝土表面的热流量与混凝土表面温度和混凝土周围介质温度之差成正比,但第三类边界条件,在数学上处理比较困难.因而在分析中,对第三类边界条件的处理,采用自真实边界向外延伸一个虚拟厚度,得到一个虚边界,在虚边界上混凝土表面的温度等于外界介质的温度.虚拟厚度可以通过计算得出(一般取 0.1 ~ 0.2 m 即可)^[1].

通过上述的处理,就可以将把第三类边界条件简化成第一类边界条件来处理,将边界条件定义成时间函数也较容易些.分析中的主要的边界条件有混凝土浇筑块与岩基接触面边界,边界上的温度为地温;与空气接触界面,边界上的温度为环境温度;新、老混凝土接触界面,界面上的温度为浇筑温度三种.

1.2 混凝土的绝热温升

水泥水化热是影响浇筑体温度场的一个重要因素,它随着水泥的品种、水泥的用量、混合材料的品种和浇筑温度不同而异,计算中采用函数表达式来表示水化热的规律^[2].

$$Q = Q_0(1 - e^{-m\tau}) \quad (5)$$

式中: Q_0 —水泥水化热总量; m —水化热系数,与混凝土的浇筑温度有关; τ —混凝土龄期.

1.3 对浇筑过程及边界条件的模拟

对一般的有限元程序,求解瞬态热传导问题时,通常是只有统一的时间起点,不适合用于模拟求解混凝土浇筑这类有浇筑时间先后顺序的瞬态热传导问题.因为无论是边界条件、还是初始条件和内部水泥的水化热都和时间相关,随时间变化.为了解决上述问题,在计算的过程中定义了“时间函数”(TimeFunction)来表示内部水泥的水化热,边界条件和初始条件.将混凝土内部水泥的水化热,边界条件和初始条件在时间变量上的变化表示成具体的时间数值函数,通过定义单元的“生、死”时间(BirthTimeandDeathTime)和荷载的“到达”时间(arrivetime),来实现对混凝土浇筑过程的模拟.

1.4 冷却水管的计算

冷却水管直径一般在 2.5 cm 左右,间距为 150 ~ 250 cm.如果在计算中直接引入冷却水管,网格的划分必须十分精细,在实际分析中,如果有水管冷却,可以把水管的冷却作用转化为混凝土的吸热特性,相当

于负水化热. 本文重力墩的浇筑未采用冷却水管, 为自然冷却是的情况.

2 重力墩温度场的仿真分析

2.1 浇筑过程的模拟

通过建立三维有限元模型, 进行温度场的仿真计算, 温度场的仿真计算严格按照混凝土重力墩的施工浇筑顺序进行分析. 重力墩高 14 m, 共分 7 个浇筑层, 每个浇筑层厚 2 m, 每层浇筑的时间为 1 d, 每层浇筑完后间歇的时间为 2 d, 每个浇筑层又近似分为 4 小层, 每小层浇筑的时间为 6 h. 设定 1 月 4 日开始浇筑, 混凝土的入仓温度为 8.5℃, 环境温度为 1 月 13 日之前平均为 4.5℃, 1 月 13 日到 1 月 30 日平均温度为 5.6℃. 施工浇筑顺序分层示意图 1, 各层的浇筑的起始时间表见表 1.

表 1 浇筑层的起止时间(h)

Tab.1 The start and end casting time for the layers of poured concrete

代号	起止时间	代号	起止时间	代号	起止时间
C1	0~6	C11	156~162	C21	360~366
C2	6~12	C12	162~168	C22	366~372
C3	12~18	C13	168~222	C23	372~378
C4	18~24	C14	222~228	C24	378~384
C5	72~78	C15	228~234	C25	432~438
C6	78~84	C16	234~240	C26	438~444
C7	84~90	C17	288~294	C27	444~450
C8	90~96	C18	294~300	C28	450~456
C9	144~150	C19	300~306		
C10	150~156	C20	306~312		

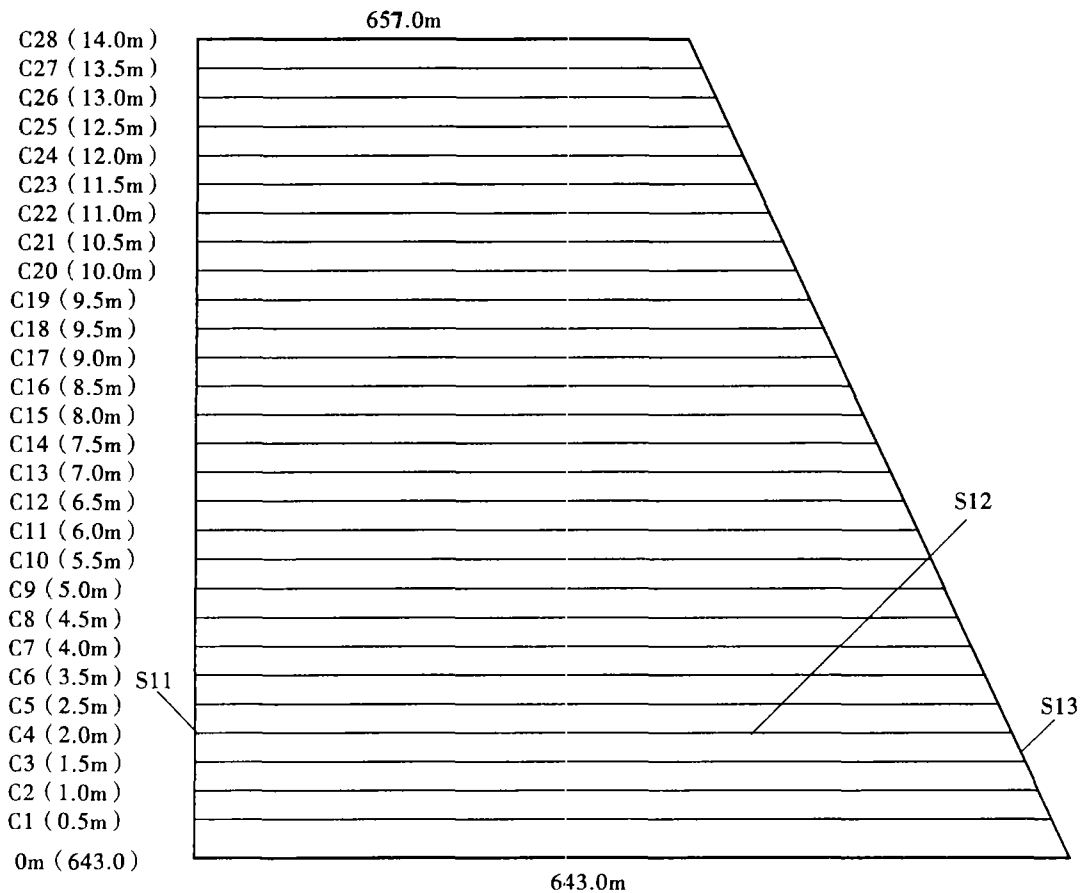


图1 重力墩的浇筑顺序示意图

Fig.1 The sketch of casting sequence on gravity frusta

(注: 0m处的高程为643.0m, 图中竖向为高, 水平向为厚)

按施工的过程,每浇筑一层,就定义相应的“时间函数”(timefunction)、单元的“生死时间”(birthtimeanddeathtime)和“到达时刻”(arrivetime)来模拟相应的边界条件的变化和混凝土的浇筑过程.

以图1中C4层为例,根据施工顺序的时间安排,该层的“生的时间”(birthtime)为17.9 h,“到达时间”(arrivetime)为18 h.用表2定义“时间函数”timefunction1和timefunction2,分别来定义图1中的S11,S13和S12的边界,既认为S11,S13和S12的“生的时间”均为17.9 h,“到达时间”为18 d;因为C4层上还要浇筑新的混凝土,S12边界在覆盖新混凝土后要消失,即程序分析中杀死边界S12上的单元,S12“死的时间”(deathtime)为71.9 h,72 h时S12被“杀死”,其环境温度为0.通过定义“时间函数”、“生死时间”、“到达时间”就可以实现对混凝土重力墩整个浇筑过程的模拟.

表2 C4层边界的时间函数

Tab.2 The time function of boundary of C4 layer

S11,S13 随时间变化 (Timefunction1)	时间/h	0	17.9	18	216	624	
	环境温度/K	0	0	277.65	278.75	278.75	
S12 随时间变化时 (Timefunction2)	时间/h	0	17.9	18	71.9	72	624
	环境温度/K	0	0	277.65	277.65	0	0

2.2 分析的结果

见图2和图3,重力墩中间点和边缘点的温度随时间的变化曲线.图中 C_i 的代表第 i 层,因为边缘点的温度最高幅度相差大,为尽可能将边缘点的温度曲线统一到一个坐标下,在第层上增加或减少 $t^\circ\text{C}$.图中用 $C_i + t^\circ\text{C}$ 代表.

从图2和图3可以看出,在混凝土逐层浇筑过程中,已浇筑层的混凝土的温度逐渐升高,各层温度的最高值基本上出现在3~4 d之内,整个重力墩混凝土的最高温度达到 48.65°C (出现在第12 d,288 h,此时第四层刚好浇筑完毕).重力墩内部的温度升高得快,表面温度升高得慢,在浇筑块的内部点和边缘点的温度曲线中,明显的有一波折处,即温度达到最大值后有所下降,随着上面新混凝土的浇筑,温度又有所回升,产生这一现象的原因是新老混凝土浇筑块之间有温度的传递,新浇筑块温度在很短的时间升高许多,温度比老混凝土浇筑块的温度要高,会“倒灌”给老的混凝土浇筑块.中间浇筑层内部点的温度幅值为最大,并且下降的幅度较小,其原因是中间层混凝土浇筑块处于散热不利的位置;第一层和岩基接触,第七层和空气接触,散热的情况较之中间层要好,温度下降的幅度也较大,特别是第七层浇筑块的混凝土和空气的接触的面积大,散热很快,温度曲线下降的幅度大,在较短的时间内在同一层浇筑块中就会形成较大的温降.边缘点的温度曲线的温度幅值和下降的幅度基本上是一致的.

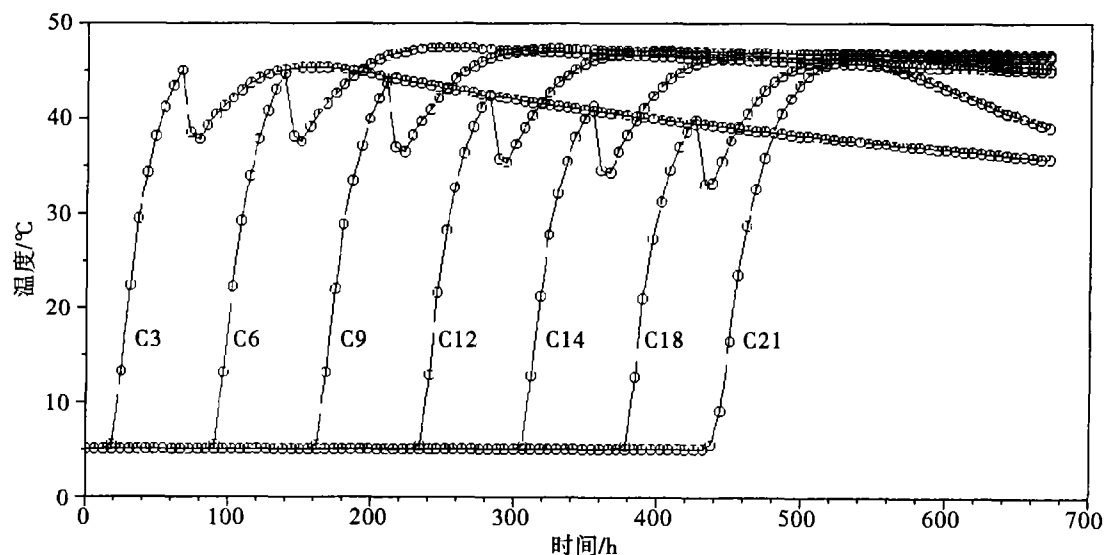


图2 内部点的温度变化曲线

Fig.2 The curve of temperature fluctuation of internal poured cube

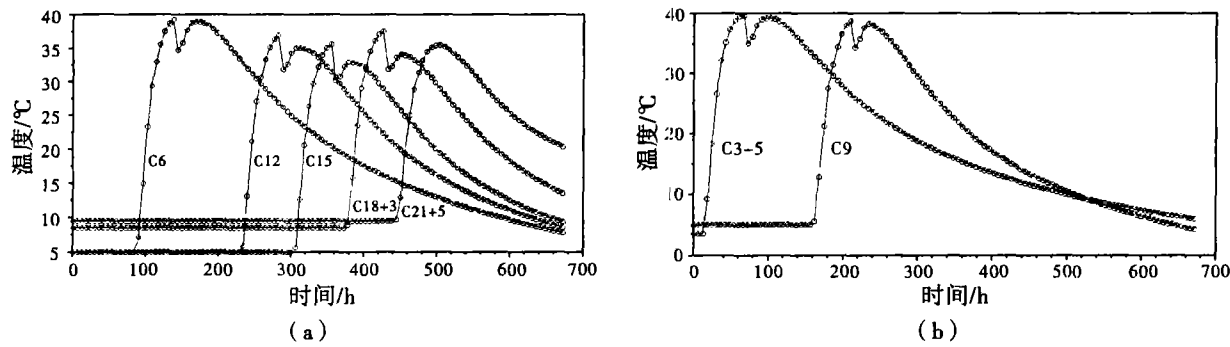


图3 边缘点的温度变化曲线

Fig. 3 The curve of temperature fluctuation of border poured cube

3 结论

本文用 ADINA 程序对实际的工程进行混凝土浇筑温度场的仿真分析, 得出以下结论:

1) ADINA 程序只要定义出“时间函数”、“生死时间”和“到达时间”就能实现对混凝土浇筑过程的模拟, 是比较简单而实用的。

2) 通过仿真分析, 在进行施工之前, 就能预见结构物温度场的变化情况. 可以客观的评价所制定的施工方案是否合理。

3) “薄层短间歇期”是大体积混凝土施工中常用的施工方法, 但“薄”到什么程度? “短间歇”到什么程度? 事先是未知的. 通过仿真分析, 并考虑温度应力, 可以得到“薄”和“短”的平衡点, 方便进行合理的温控设计。

参考文献:

- [1] 龚召熊, 张锡祥, 肖汉江, 等. 水工混凝土的温控与防裂[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. 105 ~ 111.
- [2] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998. 12 ~ 13.
- [3] 赵代深, 薄钟禾, 李广运等. 混凝土重力坝的温度应力[M]. 土木工程学报, 1993, 26(4): 29 ~ 39.

(上接第 86 页)

二进制的超前进位加法, 未能开发使用多个二进制的同步超前进位加法. 但是, 大量的天文数据, 气象数据, 水文数据等数据处理已迫使人们去研制高速高效的超大规模计算机. 在许多国家都出现了多处理器、可并行进行数据处理的超大规模计算机. 可以想象, 如果开发使用多个二进制的同步超前进位加法作为计算机的核心运算部件, 那么就可以减少并行处理器的数量, 提高计算机的运算速度. 这样以来, 采用模 $2^k + M$ 补码编码方案对多个二进制数同步超前进位加法结果的特性判定将是必选的、快速的、有效的使用方案。

参考文献:

- [1] 王爱英. 计算机组成与结构. 北京: 清华大学出版社, 1990. 12 ~ 51, 73 ~ 87.
- [2] 潘名莲, 马争. 微计算机原理. 北京: 电子工业出版社, 1994. 21 ~ 24.
- [3] 张友德, 赵志英. 单片微型机原理、应用与实验. 上海: 复旦大学出版社, 1992. 3 ~ 19.
- [4] 周明德. 微型计算机硬件软件及其应用(第 2 版). 北京: 清华大学出版社, 1988. 2 ~ 13.
- [5] 徐淑华, 程退安. 单片微型机原理及应用(第 2 版). 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1994. 23 ~ 41.
- [6] 郑学坚, 朱善君. 微型计算机原理及应用. 北京: 清华大学出版社, 1987. 1 ~ 14.
- [7] 席先觉, 李忠民. 单片微型计算机及其应用. 北京: 高等教育出版社, 1989. 12 ~ 29.