

基于生长单元网格浮动的碾压混凝土坝温度场分析

朱岳明¹, 秦 宾², 张建斌³, 马东亮⁴, 章 洪⁴

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 连云港市水利规划设计院, 江苏 连云港 222000;
3. 厦门市路桥建设投资公司, 福建 厦门 361009; 4. 淮河水利委员会设计院, 安徽 蚌埠 233001)

摘要: 针对碾压混凝土坝(RCCD)成层施工和材料成层的结构特点, 引入非均质层合单元和生长单元的概念, 提出随着生长单元不断并层生长和网格的浮动, 能仿真模拟 RCCD 的成层浇筑施工过程的算法。同时, 对某一高 RCCD 从施工期到运行期的温度场变化全过程进行计算分析, 论证了入仓温度对大坝温度场的影响, 探讨了该坝温度场的特性, 为温控方案的确定提供了一定依据。利用该算法, 能达到坝体三维不稳定温度场计算的仿真, 并可大大减少计算单元数, 使得 RCCD 不稳定温度场的仿真计算在不降低计算精度的前提下可有效地控制解题规模和提高计算效率。

关键词: 碾压混凝土坝; 层合单元; 生长单元; 网格浮动; 温度场; 仿真计算

中图分类号: TV642.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2002)05-0028-05

工程实践表明, 许多已建甚至某些在建的 RCCD 常常有温度开裂现象。由于材料特性、结构特点和施工工艺等方面的原因, RCCD 的温度场和温度应力场特性与常态混凝土坝极不相同, 尤其是高 RCCD 的温度应力特性更有待进一步研究。坝体开裂已成为制约 RCCD 进一步迅速发展的主要因素, 解决的途径之一是更好地了解 RCCD 的温度特性, 尽可能准确地模拟坝体施工全过程, 进行温度场和温度应力场的仿真计算分析, 确定最合理的防裂与限裂温控措施。

1 RCCD 不稳定温度场计算

1.1 不稳定温度场的有限单元法求解

混凝土浇筑后, 其温度场应满足如下控制方程和定解条件:

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

当 $t=0$ 时, 有 $T = T(x, y, z, 0)$ 的初始条件; 在 Γ_1 边界上有 $T = T_B(x, y, z, t)$; 在 Γ_2 边界上有 $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ (绝热); 在 Γ_3 边界上有 $-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_a)$ 。其中: a 为导温系数; t 为时间; τ 为龄期; θ 为绝热温升; λ 为导热系数; β 为表面放热系数; T_a 为环境介质温度; n 为边界外法线坐标。

上述热传导问题的求解等价于相应泛函的极值, 利用有限单元法和差分法分别对空间域和时间域进行离散, 可得到如下支配方程^[1,2]:

$$\left\{ \mathbf{H} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{G} \right\} \cdot \mathbf{T}_t + \left\{ \mathbf{H} - \frac{2}{\Delta t} \mathbf{G} \right\} \cdot \mathbf{T}_{t-\Delta t} + \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_{t-\Delta t} = 0 \quad (2)$$

只要给定 $t - \Delta t$ 时刻的温度场 $\mathbf{T}_{t-\Delta t}$, 即可得到 t 时刻的温度场 $\mathbf{T}_t$ 。

1.2 RCCD 温度场的仿真计算

针对 RCCD 的结构和施工特点, 借助于文献[2,3]的层合单元和并层单元概念, 基于坝体浇筑面单元随着碾压混凝土(RCC)成层施工而不断生长的生长单元和网格浮动技术^[1], 就可对 RCCD 三维不稳定温度场进行仿真计算分析。

在 RCCD 有限单元法的仿真计算中,沿高度取不同龄期的薄层所组成的非均质单元为“层合单元”^[13],单元内与龄期相关的各种物理量在层面法向呈阶梯状分布,通过适当的数学变换,在单元内进行分层积分,从而严密地解决了单元内非均质性的处理问题.按层合单元的特点把坝体划分为有限个常规大小的单元.在仿真计算过程中定义当前时刻施工面所在的单元为“生长单元”.位于施工面以上的单元为虚单元,即实际上尚未存在,计算中也不考虑;施工面以下为实单元.计算时,按实际施工过程把当前顶层最新浇筑的薄层 RCC 层不断地并入施工面所在的单元,此单元随之增厚而“生长”,计算网格也随之浮动上升一 RCC 层的厚度,直到该生长单元上升达到预定的已划分好的所在虚单元的高度,则该单元停止生长,成为新的非均质多 RCC 层的层合单元.其后随着坝体 RCC 层的施工,再开始生成新一轮的生长单元和相应的新的网格浮动过程.因此,在仿真模拟混凝土成层施工过程时顶层实单元的生长过程也就是有限单元法计算单元网格的浮动过程.笔者称这种 RCCD 不稳定温度场仿真计算的方法为生长单元网格浮动法.

算例:设一 RCC 块体,分 30 层连续浇筑施工,每层厚 0.3 m,层间间歇 0.2 d,导温系数 $a=0.1\text{ m}^2/\text{d}$,导热系数 $\lambda=220\text{ kJ}/(\text{m}\cdot\text{d}\cdot^\circ\text{C})$,RCC 绝热温升 $\theta=\frac{14.6\tau}{23+\tau}$,块体底面和四周绝热,顶面为散热面,放热系数 $\beta=855\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot^\circ\text{C})$,初始温度 $T_0=10^\circ\text{C}$,气温 $T_a=10^\circ\text{C}$.现分别采用逐层划分单元的密集型均质单元模型和本文推荐的非均质层合单元模型进行温度场仿真计算.图 1 为计算网格,图 2 为 A、B 两点的变温过程情况.两种模型的计算结果几乎完全吻合,而采用网格浮动技术后的单元数只是均质单元网格的 10%,可见计算效率发生了根本性的变化.这一算例直观地表明,新算法是解决像高 RCCD 等大体积 RCC 中复杂三维场问题仿真分析的一条切实可行的途径.

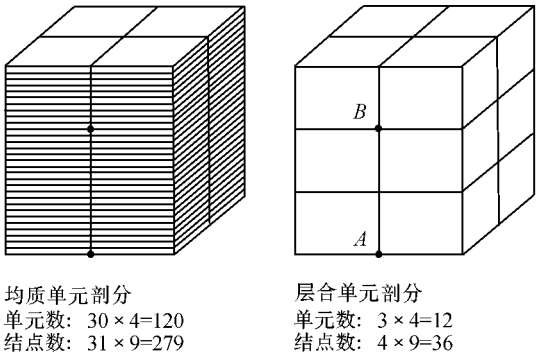


图 1 两种模型单元的网格划分
Fig.1 Finite element dissection of two models

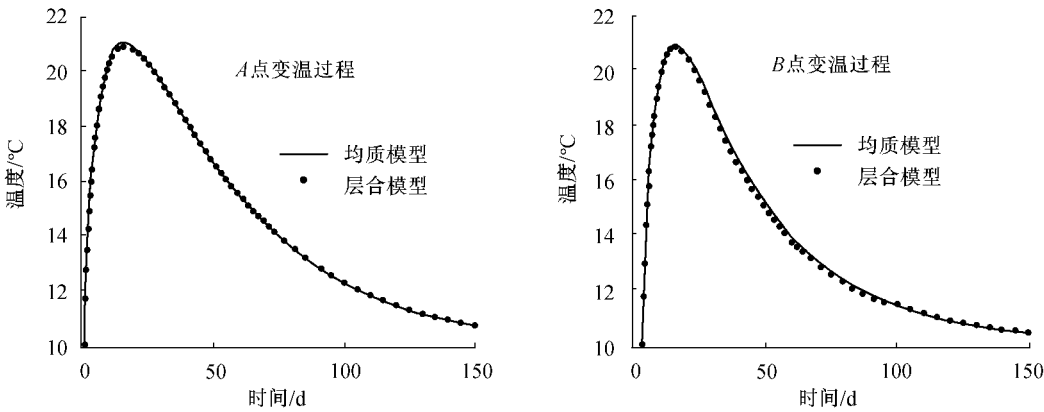


图 2 两种单元模型的变温过程计算结果
Fig.2 Calculated results of temperature changes by the two models

2 实例分析

2.1 基本资料

某 RCCD 坝段高 157 m,坝顶宽度 14 m,坝体分 5 种材料(图 3).拟定的典型施工方案为:2000 年 11 月 1 日开工,至 12 月 15 日完成垫层常态混凝土浇筑,坝顶到达 231 m 高程,其中浇筑块厚 1 m;至 2001 年 11 月 1 日浇筑到 285 m 高程;至 2001 年 9 月 30 日浇筑到 300 m 高程;至 2002 年 5 月 31 日浇筑到 375 m 高程;于 2002 年 9 月 10 日完工到达 382 m 坝顶高程.RCC 采用薄层碾压连续上升的施工方式,层厚 0.3 m,层间间隔根据初凝时间控制为 4~6 h,一般连续浇筑 5~10 层为一个升程,各升程之间施工间歇 5~10 d.坝体材料的热力学参数见表 1.

为研究控制入仓温度的温控效果,设定两组工况(表2).计算域厚度在坝轴向为10 m,地基深度和坝踵与坝趾分别距计算域上下游侧面均为150 m,坝基底面为恒温边界面.

2.2 坝体温度变化过程

对大坝从施工期到运行期进行温度场仿真分析.图4为292.5 m高程处各结点的温度变化过程.其中A、E两点分别位于上下游坝面,C为坝中点,B、D两点距上下游坝面2.7 m和5.8 m(图1).

上游坝面温度在蓄水前随气温作简谐变化,在蓄水后随库水温作周期变化;下游坝面温度则随气温或尾水温也作简谐变化.外界气温或水温对坝体内部温度的影响随着距坝面深度的加大而逐渐减弱,图2中温度变幅逐渐减小,变化在相位上呈滞后现象.C点的温度变化历程反映了坝体内部温度场的变化情况.它基本不受外界温度变化

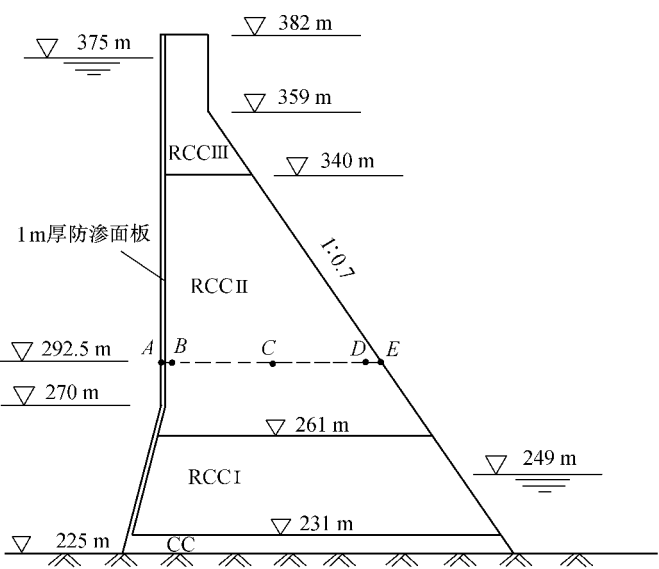


图3 坝体典型断面材料分区

Fig.3 Material partition over a typical cross section of dam body

表1 主要热力学参数

Table 1 Main thermodynamic parameters of concrete

参 数	导热系数 $\alpha/(m^2 \cdot h^{-1})$	导热系数 $\lambda/(k/(m \cdot h \cdot ^\circ C)^{-1})$	放热系数 $\beta/(k/(m \cdot h \cdot ^\circ C)^{-1})$	θ_0	n
常态混凝土 C25	0.003415	8.594	34.727	垫层 27.3 面板 29.8	
基 岩	0.003415	8.594	34.727		1.007
RCC I	0.003929	9.120	34.727	16.9	2.300
RCC II	0.003929	9.120	34.727	16.9	3.700
RCC III	0.003929	9.120	34.727	15.2	5.530

的影响,在到达温峰后逐渐下降.坝体上部相对比较单薄,较早进入准稳定温度场状态,而在坝体下部由于散热条件较差,降温历时将长达30~45 a.

坝体温度变化过程是温度应力仿真分析的基础.而计算分析表明,RCCD进入准稳定温度场时间相对很长,因此温度应力将长期作用且必然与坝体自重、水压力等其他荷载相互叠加,但温度及温度应力的高峰期是在施工期及其后的几年内.

表2 计算工况

Table 2 Cases of computation

月 份	1~3,11~12	4~10
工况1 混凝土浇筑温度	取旬平均气温	取旬平均气温
工况2 混凝土浇筑温度	取旬平均气温	19.0 °C

(常态混凝土垫层浇筑温度为13.0 °C)

注:工况1不采取温控措施;工况2对基础约束区及高温期控制浇筑温度.

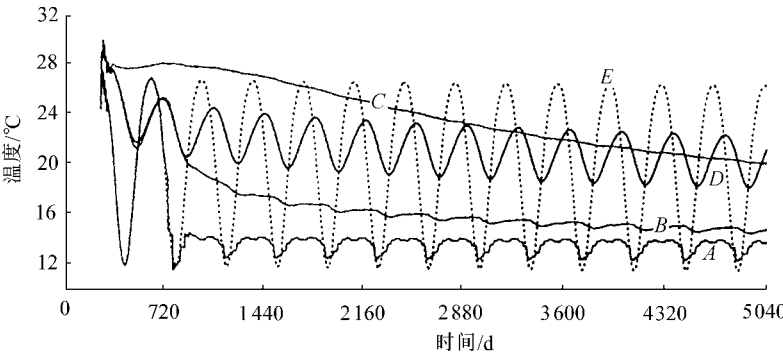


图4 坝体292.5m高程不同结点的温度过程

Fig.4 Variation of temperature for different nodes at 292.5 m elevation of dam body

2.3 坝体最高温升

温度场仿真计算给出了不同高程处坝体的最高温升和温升历时(图 5、图 6).在控制浇筑温度工况下坝

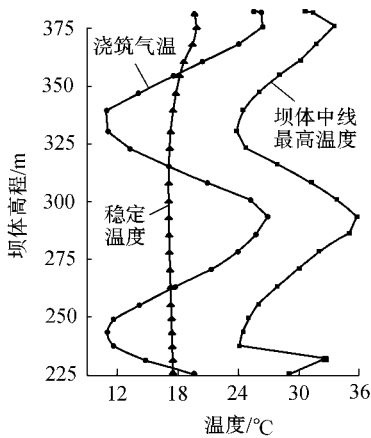


图 5 坝体最高温升

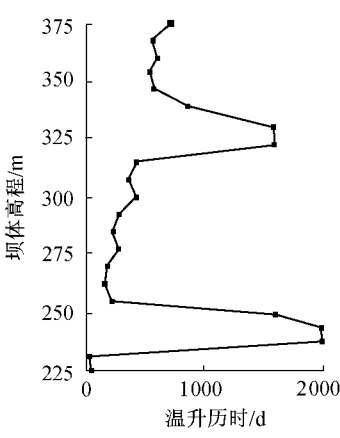


图 6 坝体最高温升点温升历时

Fig.5 The maximum temperature rise in dam body Fig.6 Duration of the maximum temperature rise in dam body

体的最高温升为 36.1℃,发生在 292.5 m 高程处.图 5 表明,坝体最高温升曲线与浇筑时气温同相位,坝体内存在上下两个高温区,分别对应于两个夏季施工区,说明高温期施工是造成坝体内高温的直接原因.高温区温升历时短,而低温区温升历时长,是由于上面的高温区向下面低温区传热的结果.

2.4 控制入仓温度的温控效果

工况 2 在夏季高温期连续施工时采取了控制入仓温度的措施.图 7 为两种工况下坝体的最高温升分布比较.在控制入仓温度工况下坝体最高温升仅为 30.1℃,比没有温控措施时的最高温升低 5.46℃.降低入仓温度对坝体最高温升能起到较好的削峰作用,是 RCCD 高温期连续施工时一种有效的温控措施.图 8 和图 9 为这两种施工工况竣工时坝体温度场的分布.

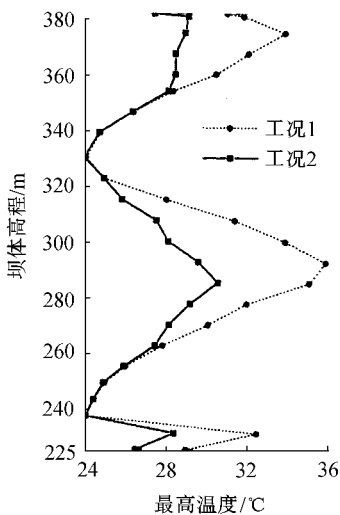


图 7 坝体最高温升分布比较

3 结 语

a. 温度场仿真计算是研究 RCCD 合理可靠的温控措施的有效手段.笔者利用层合单元、生长单元及网格浮动等技术,计

Fig.7 Comparison of distributions of maximum temperature rise in dam body

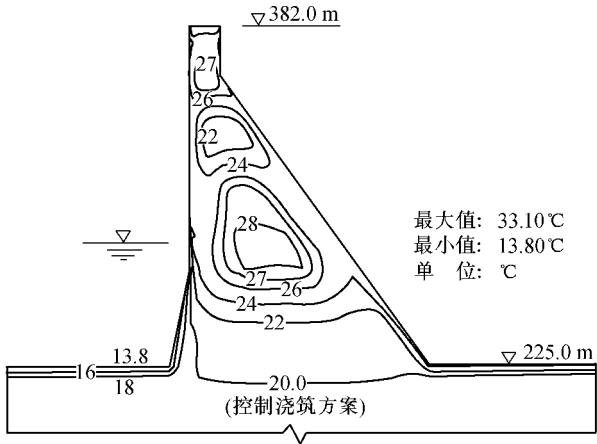


图 8 工况 2 坝体温度场(刚竣工时)

Fig.8 Temperature field for case 2 at construction completion)

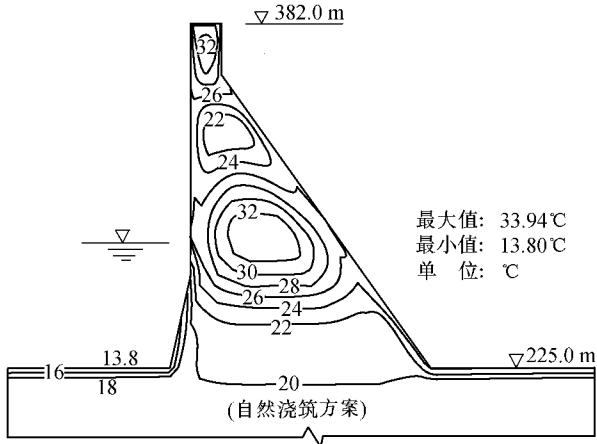


图 9 工况 1 坝体温度场(刚竣工时)

Fig.9 Temperature field for case 1 at construction completion)

算分析了某 RCCD 温度场变化的全过程,为该工程的温控措施设计和施工方法提供了某些量化依据.该方法的
最大特点是能极大地减小解题规模,提高计算效率.

b. RCCD 高温期施工是造成坝体内高温区的主要原因,应加强该施工期降温措施的应用,建议采用一字
形冷却水管对 RCCD 进行强迫性排热降温.

c. 应特别注意, RCCD 进入准稳定温度场的时间相对较长,温度荷载将长期作用,温度应力的高峰期是
在施工期及其后的几年内,大坝有可能在正式投入运行后还会继续开裂.

参考文献:

- [1] 张建斌. 碾压混凝土坝三维温度场有限元仿真分析的层合单元模型的网格浮动法[D]. 南京:河海大学,2000.
- [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,1999. 134~139.
- [3] 凌道盛,张金江. 虚拟层合单元法及其在桥梁工程中的应用[J]. 土木工程学报,1998(3):22~29.

Procedure of element growing and mesh moving for simulation of 3-D temperature field of roller compacted concrete dams

ZHU Yue-ming¹, QIN Bin², ZHANG Jian-bin³, MA Dong-liang⁴, ZHANG Hong⁴

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
- 2. Lianyungang Municipal Planning & Design Institute of Water Conservancy, Lianyungang 222000, China;
- 3. Xiamen Road & Bridge Construction Investment Co. Ltd., Xiamen 361009, China;
- 4. Huaihe Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu 233001, China)

Abstract: In consideration of the properties of multi-laminated construction and multi-laminated material structures, the concepts of inhomogeneous multi-laminated element and growing element are introduced. On the basis of the concepts, a numerical procedure with a moving mesh is developed for simulation of the unsteady temperature field of roller compacted concrete dams. A numerical example is given, in which the whole process of temperature variation of a high RCC gravity dam is simulated with the procedure. The properties of the temperature field and the influences of the concrete pouring temperature on the temperature field of the dam are analyzed. To some extent, the computed results provide a basis for design of temperature control measures. Without decrease of the accuracy of computation, the new procedure with a moving mesh can largely reduce the computation scale and computation load.

Key words: roller compacted concrete dam; multi-laminated element; growing element; mesh moving; temperature field; simulative computation