

重力坝的随机温度场初探

刘 宁¹,柯庆清²,阎 旭³

(1. 河海大学土木工程学院 ,江苏南京 210098 ; 2. 福建省莆田市湄州湾北岸水利水电局 ,福建莆田 351100 ;
3. 南京市水利局 ,江苏南京 210008)

摘要 :由于施工期和运行期各种随机因素的影响 ,使重力坝温度场成为随机 . 本文综合考虑了环境温度 (包括气温和库水温度) 、混凝土绝热温升、入仓温度以及混凝土和基岩的热学参数随机性的影响 , 基于随机有限元法 , 给出了重力坝随机温度场的计算方法 , 对一典型重力坝按给定的施工进度模拟分层浇筑施工过程 , 对施工期及运行期前期的随机温度场进行了计算 , 并得出了一些有益的结论 .
关键词 混凝土结构 ;混凝土温度场 ;随机有限元法 ;重力坝
中图分类号 :TV64 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2000)03-0007-07

温度的变化对重力坝的应力状态有着较大影响 . 对重力坝进行模拟施工过程的仿真计算 , 使其温度场、应力场接近真实状态 , 对重力坝的结构形体 (包括分缝措施) 和材料的设计方案以及结构的安全性校核都有着重要意义^[1-2] . 然而 , 重力坝的温度场受着诸多随机性的影响 , 如气温、库水温度和混凝土热学参数等 . 由于客观存在的随机因素 , 使重力坝温度场确定性计算结果常不足以充分地反映出实际情况 . 由于随机热传导问题的复杂性 , 目前国内外的研究成果还比较少 . Heller 等人提出了谱密度法^[3] , 该研究还仅局限于周期平稳环境温度影响下结构的一维散热问题 . 针对谱密度法的不足 , Tsubaki 和 Bazant 提出了脉冲响应函数法^[4] . 该法可以考虑环境因素的非平稳效应 , 但仍不能计入混凝土绝热温升的影响 , 也无法考虑混凝土材料参数的随机性 , 且脉冲响应函数往往不易求得 . 对于非混凝土材料温度场的随机性也有一些研究成果 , 如 Suzuki^[5] , Oktay^[6] 以及 Shigekazi^[7] 等的研究 . 这些研究虽在理论方法上有一定的借鉴性 , 但总体上来说不适用于混凝土材料 . 笔者曾在文献 [8] 中对大体积混凝土结构的随机温度场问题进行了较为系统的阐述 . 可以看出 , 目前的研究方法还存在较大的不足 . 随机有限元法历经了近 20 年的发展已成为结构随机性分析的有力工具^[9] , 本文将该法引入模拟施工过程重力坝随机温度场的计算 , 编制了相应的计算程序 . 利用该程序对一典型重力坝按拟定的施工进度模拟分层浇筑 , 进行了重力坝随机温度场的计算 .

1 影响重力坝温度场的随机因素

影响重力坝温度场的随机因素主要包括环境温度、混凝土绝热温升、混凝土入仓温度 (初始温度) 以及混凝土和基岩的热学参数 .
环境温度包括库水温度和坝面气温 , 其中坝面气温可表为 : $T_a(t) = A \sin(\omega t + t_0) + B$, 其中 A 和 B 为经气温统计资料获得的随机变量 . 而库水温度可表为 : $T_w(z, t) = T_{wm}(z) + A_w \cos \omega [t - t_0 - \epsilon(z)]$, 其中 ω 为频率 , $\omega = 2\pi/12$; $T_{wm}(z)$ 为水深 z 处年平均水温 , $^{\circ}\text{C}$, 可表为 $T_{wm}(z) = C_1 + C_2 \exp(-C_3 z)$; $A_w(z)$ 为水温调制函数 , $^{\circ}\text{C}$, 可表为 $A_w(z) = -C_4 \exp(-C_5 z)$; $\epsilon(z)$ 为水深相位调节相 , 月 , 根据一般工程情况可表为 : $\epsilon(z) = C_6 - C_7 \exp(-C_6 z)$. 而 $C_1 \sim C_8$ 为根据工程的实际情况得出的统计参数 , 可以用随机变量描述 . 于是 , 总的环境温度 (包括库水温度和坝面气温) 可表为

$$T_a(t) = T_m + \sum_{i=1}^{n_a} T_{ai}(t)$$

(1)

收稿日期 :1998-12-29
基金项目 国家自然科学基金重点项目 (59739180) , 国家自然科学基金项目 (59809003) .
作者简介 刘宁 (1967 —) , 男 , 江苏靖江人 , 教授 , 博士生导师 , 工程力学专业 .

式中: T_m ——随机变量; $T_{ai}(t)$ ($i=1, \dots, m_a$) 为周期平稳随机过程(余弦过程或正弦过程)。

绝热温升 $\theta(t)$ 可表示为: $\theta(t) = \theta_0[1 - \exp(-m_1 t)]$, 其中 θ_0 和 m_1 分别为最终绝热温升和放热速率, 均为由绝热温升试验得出的随机变量。在热传导方程中只需用到 $\partial\theta/\partial t = \theta_0 m_1 \exp(-m_1 t)$, 显然 $\partial\theta/\partial t$ 为一非平稳随机过程。利用一阶 Taylor 展式, 可将 $\partial\theta/\partial t$ 表为以下简单形式

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \theta_0 m_1 \exp(-m_1 t) \approx f_1(t) + f_2(t) \Delta\theta_0 + f_3(t) \Delta m_1 \quad (2)$$

式中: $\Delta\theta_0 = \theta_0 - \bar{\theta}$, $\Delta m_1 = m_1 - \bar{m}_1$, $f_1(t) = \bar{\theta}_0 \bar{m}_1 \exp(-\bar{m}_1 t)$, $f_2(t) = \bar{m}_1 \exp(-\bar{m}_1 t)$, $f_3(t) = (\bar{\theta}_0 - \bar{\theta}_0 \bar{m}_1 t) \exp(-\bar{m}_1 t)$ 。

由于混凝土材料参数的空间变异特性, 混凝土初始温度 T_0 和材料的热学参数(包括导温系数 a 、导热系数 λ 、散热系数 b) 都宜作为随机场加以模拟, 可以采用三维可分向量随机场模型^[10]。对于第 i 个随机场有: $\rho(x, y, z) = \rho(x, y)\rho(z)$, 其中 $\rho(\cdot)$ 为随机场的相关函数, 对于重力坝通仓浇筑的情形, 有 $\rho_i(x, y) \approx 1.0$ 。于是可退化为一维随机场。如果随机场的相关结构无法获得, 由于混凝土属人工材料, 可近似地假定 $\rho(x, y, z) \approx 1.0$, 即以随机变量加以描述。

2 重力坝随机温度场的计算方法

由热传导理论, 温度场 $T(x, y, z, t)$ 为以下定解方程的解:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{\partial\theta}{\partial t} \quad T|_{t=0} = T_0(x, y, z) \quad \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_c = -\frac{b}{\lambda}(T - T_a) \quad (3)$$

式中: a ——导温系数; b ——表面放热系数; λ ——导热系数; T_a ——环境温度; T_0 ——初始温度; $\theta(t)$ ——混凝土绝热温升。定解方程式(3)的解可由有限元法获得^[12], 有限元支配方程为

$$K_1 T + K_2 \frac{\partial T}{\partial t} + F = 0 \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \sum_e \left[a \iiint_{\Omega_e} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dx dy dz + a \iint_{c_e} \frac{b}{\lambda} N_i N_j ds \right] \\ K_2 &= \sum_e \iiint_{\Omega_e} N_i N_j dx dy dz \\ F &= \sum_e \left(- \iiint_{\Omega_e} \frac{\partial\theta}{\partial t} N_i dx dy dz + a \iint_{c_e} \frac{b}{\lambda} N_i T_a ds \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: N ——整体形函数矩阵; N_i ——整体形函数矩阵在节点上的分量。

可以看出, 对于确定性有限元计算方法, 可以在支配方程中同时计入混凝土绝热温升和环境温度的影响, 式(4)的求解可由对时间的抛物线差分获得^[12]。然而, 由于随机因素的影响, 绝热温升和环境温度都成为随机过程。如果在同一定解方程中同时考虑环境温度和绝热温升随机过程对温度场的影响, 问题将十分复杂。为解决这一问题, 利用定解方程的叠加原理, 将原定解方程式(3)分离为随机环境温度定解方程 I 和随机绝热温升定解方程 II, 然后再分别对这两类定解问题进行研究, 最终结果可叠加获得。

2.1 随机环境温度定解方程 I

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a \nabla^2 T_1 + \frac{\partial\bar{\theta}}{\partial t} \quad T_1|_{t=0} = T_0(x, y, z) \quad \frac{\partial T_1}{\partial n} \Big|_c + \frac{b}{\lambda} T_1 \Big|_c = \frac{b}{\lambda} T_a \quad (6)$$

式中 $\bar{\theta}$ 为 θ 的均值过程。上式可进一步分离为以下两部分(定解方程 I⁽⁰⁾和定解方程 I⁽ⁱ⁾)。

(a) 定解方程 I⁽⁰⁾:

$$\frac{\partial T_1^{(0)}}{\partial t} = a \nabla^2 T_1^{(0)} + \frac{\partial\bar{\theta}}{\partial t} \quad T_1^{(0)} \Big|_{t=0} = T_0(x, y, z) \quad \frac{\partial T_1^{(0)}}{\partial n} \Big|_c + \frac{b}{\lambda} T_1^{(0)} \Big|_c = \frac{b}{\lambda} T_a \quad (7)$$

(b) 定解方程 I⁽ⁱ⁾ ($i=1, 2, \dots, m_a$):

$$\frac{\partial T_1^{(i)}}{\partial t} = a \nabla^2 T_1^{(i)} + \frac{\partial\theta}{\partial t} \quad T_1^{(i)} \Big|_{t=0} = 0 \quad \frac{\partial T_1^{(i)}}{\partial n} \Big|_c + \frac{b}{\lambda} T_1^{(i)} \Big|_c = \frac{b}{\lambda} T_{ai} \quad (8)$$

2.2 随机绝热温升定解方程 II

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a \nabla^2 T_2 + \frac{\partial \Delta \theta}{\partial t} \quad T_2 \Big|_{t=0} = 0 \quad \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_c + \frac{b}{\lambda} T_2 \Big|_c = 0 \quad (9)$$

式中 $\Delta \bar{\theta} = 0$.

由以上三部分温度叠加,可获得整体温度场为

$$T = T_1^{(0)} + \sum_{i=1}^{n_a} T_1^{(i)} + T_2 \quad (10)$$

对于定解方程 I⁽⁰⁾,由于式(7)中不包含随机过程影响量,只出现非平稳随机过程的均值过程,故可直接对有限元方程(4)按摄动法进行处理^[9],不难得出相应的随机有限元列式:

$$\bar{K}_1 T_{1k}^{(0)} + \bar{K}_2 \frac{\partial T_{1k}^{(0)}}{\partial t} + F'_{1k} = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, n_v) \quad (11)$$

式中 n_v 为随机变量总数,而

$$\begin{aligned} F'_{1k} = & \iiint_{\Omega} \left[a'_k \left(\frac{\partial N^T}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial N^T}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial y} + \frac{\partial N^T}{\partial z} \frac{\partial N}{\partial z} \right) \bar{T} - N^T \frac{\partial \theta'_k}{\partial t} \right] d\Omega + \\ & \iint_c a'_k \frac{\bar{b}}{\lambda} N^T N \bar{T} ds + \iint_c \frac{a}{\lambda} \frac{b'_k \bar{\lambda} - \bar{b} \lambda'_k}{\bar{\lambda}^2} N^T N \bar{T} ds - \\ & \iint_c a N^T \left(\frac{b'_k \bar{\lambda} - \bar{b} \lambda'_k}{\bar{\lambda}^2} \bar{T}_a + \frac{\bar{b}}{\lambda} T'_{ak} \right) ds - \iint_c a'_k N^T \frac{\bar{b}}{\lambda} \bar{T}_a ds \quad (k = 1, 2, \dots, n_v) \end{aligned} \quad (12)$$

计算出 $T_1^{(0)}$ 的均值和 $T_1^{(0)}$ 后,可进一步计算出 $T_1^{(0)}$ 的方差.

在定解方程 I⁽ⁱ⁾ ($i = 1, 2, \dots, n_a$) 中,由于 $T_1^{(i)}$ 为周期平稳随机过程,因此可利用随机振动理论中的复频响应函数法.常规的复频响应函数法中复频响应函数为确定性函数,为能反映材料参数随机性的影响,可视复频响应函数为材料热学参数的随机函数,由随机有限元法获得复频响应函数的统计特性.由于环境温度可表为 $T_{aj} = A \exp[i\omega(t - t_0)]$ ($j = 1, 2, \dots, n_a$),式中 ω 为频率, A 为环境温度摆幅列阵.相应的温度场响应列阵可写为 $T = H(\omega) \exp[i\omega(t - t_0)]$,将此式代入式(4),对材料的热学参数随机变量采用一阶摄动技术,不难得到:

(a) 零次方程

$$(\bar{K}_1 + i\omega \bar{K}_2) \bar{H}(\omega) = \sum_e a \iint_c \frac{\bar{b}}{\lambda} N_i N \bar{A} ds \quad (13)$$

(b) 一次方程

$$(\bar{K}_1 + i\omega \bar{K}_2) \bar{H}'_k(\omega) = F'_{2k} \quad (k = 1, 2, \dots, n_v) \quad (14)$$

式中

$$\begin{aligned} F'_{2k} = & -(\bar{K}'_{1k} + i\omega \bar{K}'_{2k}) \bar{H}(\omega) + \sum_e a'_k \iint_c \frac{\bar{b}}{\lambda} N_i N \bar{A} ds + \sum_e a \iint_c \frac{b'_k \bar{\lambda} - \bar{b} \lambda'_k}{\bar{\lambda}^2} N_i N \bar{A} ds + \\ & \sum_e a \iint_c \frac{\bar{b}}{\lambda} N_i N A'_k ds \end{aligned} \quad (15)$$

由式(13)及(14)求出 $\bar{H}(\omega)$, $\bar{H}'_k(\omega)$ ($k = 1, 2, \dots, n_v$) 后,温度 $T_1^{(i)}$ 在任一节点处的方差可按下式计算:

$$\text{Var}(T) = \sum_{k=1}^{n_v} |H'_k(\omega)|^2 \text{Var}(X_k) \quad (16)$$

在定解方程 II 中,由于 $\bar{T}_2 = 0$,所以无需列出随机有限元的零次方程,只需写出一方程:

$$\bar{K}_1 T'_{2k} + \bar{K}_2 \frac{\partial T'_{2k}}{\partial t} + F'_{2k} = 0 \quad (k = 1, 2) \quad (17)$$

式中

$$F'_{2k} = - \iint_{\Omega} N^T \left[\bar{m}_1 e^{-\bar{m}_1 t} \Delta \theta'_{0k} + (\bar{\theta}_0 - \bar{\theta}_0 \bar{m}_1 t e^{-\bar{m}_1 t}) \Delta m'_{1k} \right] dx dy dz \quad (k = 1, 2) \quad (18)$$

求出 T'_{2k} 后, T_2 在任一节点处的方差可按下式计算:

$$\text{Var}(T) = \sum_{k=1}^{n_v} T_{2k}^2 \text{Var}(X_k) \quad (19)$$

于是整体温度场的方差

$$\text{Var}(T) = \text{Var}(T_1^{(0)}) + \sum_{i=1}^{n_b} (\text{Var}(T_1^{(i)}) + \text{Var}(T_2))$$

3 一典型重力坝的随机
仿真温度场计算

根据前述理论和方法,笔者
编制了“大体积混凝土结构三维
随机温度场计算程序 STEM”
(FORTRAN 语言版),该程序可综
合考虑各种随机因素,进行施工
期和运行期前期的随机温度场计
算.本文利用该程序对一典型重力坝按给定的施工进度模拟施工过程(分层浇筑),对施工期及运行期前期的
随机温度场进行了计算.

3.1 计算模型及计算条件

该重力坝坝高 99.0m.基础上下游向铅垂面取为绝热边界,基
础底部视为恒温边界,施工期考虑层面及上下游面的散热,视为
第三类边界条件,运行期考虑上游水温的影响,上游面作为第一
类边界条件.有限元网格见图 1.单元总数为 888,其中坝体单元总
数为 600,结点总数为 1926.经有限元结点优化,总刚度矩阵容量
为 107 038.有关参数见表 1.

大坝按每 3 m 一层向上连续通仓浇筑,每层混凝土浇筑时间
和间歇期为 17 d.从经济角度考虑,不采用骨料冷却方案时,每层
混凝土的入仓温度应随季节的不同而变化,但由于本文着重研究
结构温度场随机性的规律,故拟定每层混凝土的入仓温度均为
12℃(变异系数为 0.1).对于入仓温度随季节的不同而变化的情
况,只要有详细的施工进度表,按本文方法不难得出相应的结果.

基础底部温度为 12℃,蓄水后,上游水深 89 m,变异系数为 0.06,式(1)(2)中气温和库水温度的各参数
为: $t_0 = 0$, $\bar{A} = 5^\circ\text{C}$, $\bar{B} = 15^\circ\text{C}$, $\bar{C}_1 = 7.0^\circ\text{C}$, $\bar{C}_2 = 8.0^\circ\text{C}$, $\bar{C}_3 = 0.04$, $\bar{C}_4 = 5.0^\circ\text{C}$, $\bar{C}_5 = 0.033$, $\bar{C}_6 = 2.15$, $\bar{C}_7 = 1.3$
月, $\bar{C}_8 = 0.085$. A, B 以及 $C_1 \sim C_8$ 的变异系数均拟定为 0.1.

3.2 计算结果及成果分析

由本文方法及上述计算条件,对该重力坝的随机温度场进行了计算.大坝已建 30 m 高(161 天) 60 m 高
(331 天) 99 m 高(第 509 天,未蓄水)以及 99 m 高(蓄水后 43 天)时,坝体温度场均值和标准差的计算结果见
图 2~9.

计算结果表明,在施工期和运行期前期,越往内部温度的标准差越大,温度标准差的最大值接近 4℃,时
间发生在施工的中后期和运行期的前期,其原因主要是混凝土绝热温升随机性的影响占主导地位.但可以预
测,随着重力坝运行时间的增加,混凝土绝热温升随机性的影响将逐渐减弱,温度标准差最大值所在位置将
向边界转移,最终将处于边界上,届时边界上混凝土温度的标准差即为环境温度的标准差.由于考虑了坝体
向坝基的散热效应,在易出现温度裂缝的坝体下部,温度的标准差远比坝体中部要小,一般在 1.3℃左右.另
外,如果不计入随机温度场的空间上的相关性,重力坝内外温差的标准差最大值在蓄水前约为 3.3℃,蓄水
后约为 3.1℃.

表 1 混凝土及基岩的热学参数

Table 1 Thermal parameters of concrete and rock foundation

材料参数类别	基 岩		坝体混凝土	
	均 值	变异系数	均 值	变异系数
线胀系数 $\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$	8.5×10^{-6}		1.0×10^{-5}	
散热系数 $b/(\text{kcal} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h}^\circ\text{C})^{-1})$	9.24	0.1	10.42	0.1
导热系数 $\lambda/(\text{kcal} \cdot (\text{mh}^\circ\text{C})^{-1})$	2.49	0.1	2.13	0.1
导温系数 $a/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$	0.1	0.1	0.096	0.1
最终绝热温升 $\theta_0/^\circ\text{C}$			25.0	0.1
散热速率 m_1			0.3	0.1

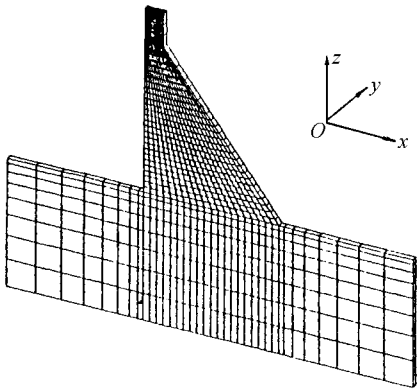


图 1 重力坝有限元网格

Fig.1 Finite element meshes of the gravity dam

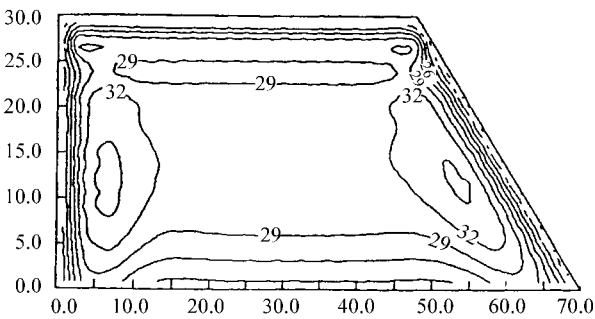


图 2 第 161 天时温度场的均值(℃)

Fig.2 The mean value of the temperature field for the 161th day

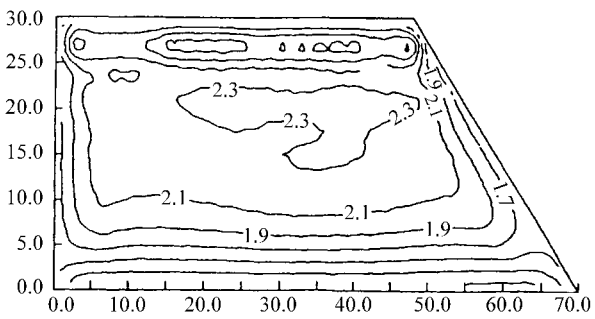


图 3 第 161 天时温度场的标准差(℃)

Fig.3 The standard deviation of the temperature field of the 161th day

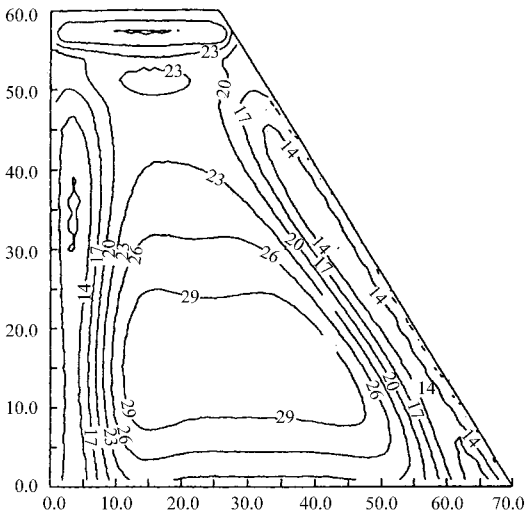


图 4 第 331 天时温度场的均值(℃)

Fig.4 The mean value of the temperature field for the 331th day

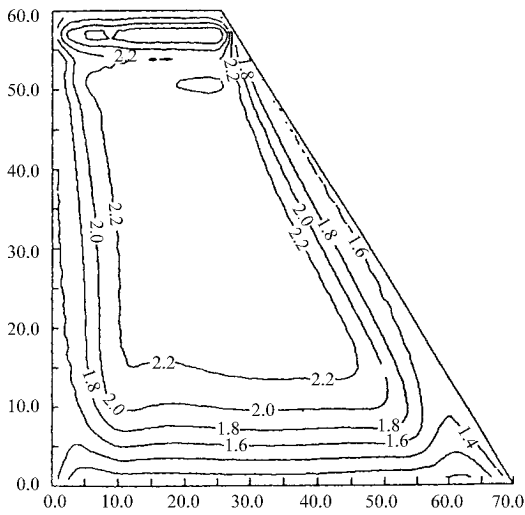


图 5 第 331 天时温度场的标准差(℃)

Fig.5 The standard deviation of the temperature field for the 331th day

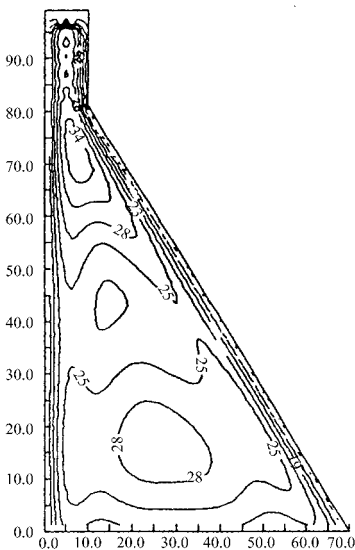


图 6 第 509 天时(未蓄水)温度场的均值(℃)

Fig.6 The mean value of the temperature field for the 509th day(before operation)

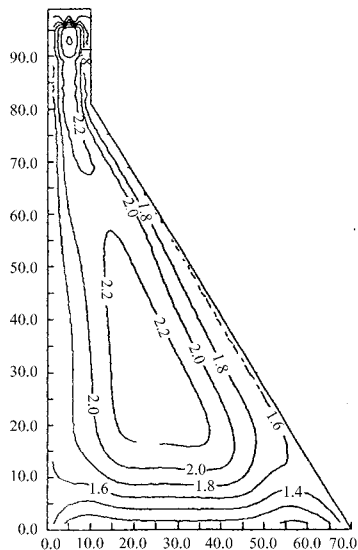


图 7 第 509 天时(未蓄水)温度场的标准差(℃)

Fig.7 The standard deviation of the temperature field for the 509th day(before operation)

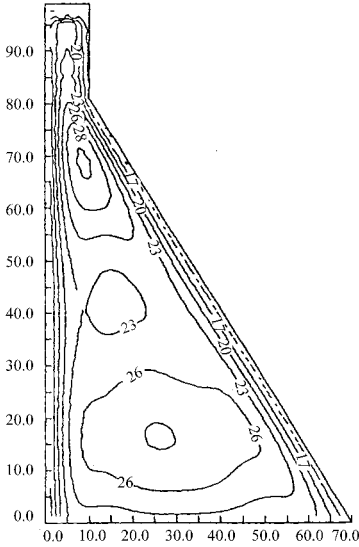


图 8 蓄水后 43 天时温度场的均值(℃)
Fig.8 The mean value of the temperature field after 43 day ' operation

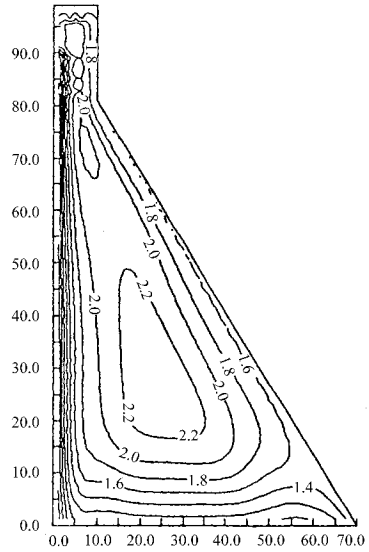


图 9 蓄水后 43 天时温度场的标准差(℃)
Fig.9 The standard deviation of the temperature field after 43 day ' operation

由图 2~9 可以看出,就温度的均值而言,由于施工过程中重力坝的层面及侧面的散热以及坝体向坝基的传热,混凝土的水化热使结构内部的温度相对较高.与温度的均值相比,温度标准差的分布规律略有不同.虽然温度标准差的较高值也在混凝土的内部,但范围明显较大,其原因归结于环境温度的随机性影响以及混凝土的逐层浇筑.由于混凝土的逐层浇筑,层面的散热使温度的均值有所下降,但环境温度的随机性又加大了温度的标准差.越往内部,温度的均值越不易随时间而降低,但同时所受环境温度随机性的影响也越小,因而在重力坝内部出现温度标准差的均化现象.

由于在施工期和运行期前期混凝土绝热温升随机性的影响占主导地位,不受人为因素控制的环境温度随机性的影响只在运行期前期之后才逐渐地起控制作用,而混凝土绝热温升随机性的大小直接取决于混凝土的配料,可人为控制.因此,如果能在混凝土施工时确保施工质量,尽可能地减小混凝土绝热温升的随机性,可望有效地控制住混凝土温度的标准差.

4 结 语

重力坝的温度场受诸多随机因素的影响,本文综合考虑重力坝施工和运行过程中的各种随机因素(环境温度、混凝土绝热温升、入仓温度以及混凝土和基岩的热学参数),将随机有限元法引入随机温度场的计算,不仅可获得重力坝温度场的均值(这相当于确定性温度场有限元的计算结果),而且可计算出随机因素影响下温度场可能出现的摆幅.温度场可能出现摆幅的计算不仅易为工程设计人员接受,而且可为施工质量的控制提供参考.对一典型重力坝随机温度场的计算结果表明,在重力坝的施工期和运行期的前期,坝体的温度场为非平稳温度场,其标准差主要受混凝土绝热温升随机性的影响,如果能在混凝土施工时确保施工质量,可望有效地减小标准差.在运行期前期之后,坝体温度场逐渐受环境温度主宰,并逐渐转变为周期平稳随机温度场.此时,只有通过详细的统计资料,准确地把握气温和库水温度才能较精确地计算出温度场.如果只需计算在运行期前期之后坝体的随机温度场,只需按本文定解方程 $I^{(i)} (i=1, 2, \dots, m_a)$ 的计算方法进行计算,既准确又方便.本文虽只对重力坝的随机温度场问题进行了研究,但所用方法同样适用于拱坝和其他大体积混凝土结构的随机温度场问题.

参考文献:

- [1] 朱伯芳.水工混凝土结构温度应力与温度控制[M].北京:水利电力出版社,1976.1~200.
- [2] 潘家铮,郭之章,傅华等.水工建筑物的温度控制[M].北京:水利电力出版社,1990.100~150.

[3] Heller R A. Temperature response of an infinitely thick slab to random surface temperature[J]. Mech Research Communication ,1976(3) : 379 ~ 385.

[4] Tsubaki T ,Bazant Z P. Random shrinkage stresses in aging viscoelastic vesse[J]. J of Eng Mech ,1982 ,108(3) :527 ~ 545.

[5] Suzuki K ,Szmyd J ,Kolenda Z et al. An approach to practical heat transfer problems with uncertain specification utilizing supplementary data[A]. In Suzuki M ed. Proc of the First KSME-JSME Thermal and Fluids Eng Conf[C]. Tyoto Technical Press ,1988(2) :443 ~ 448.

[6] Oktay S ,Kammerer H C. A Conduction-cooled module for high performance LSI devices[J]. IBM J Res Development ,1982 ,26(2) :55 ~ 66.

[7] Shigekazu K ,Noriyuki A ,Takahiro D et al. Application of SFEM to thermal analysis for computer cooling[J]. J of Electronic Packaging , 1993 270 ~ 275.

[8] 刘宁 ,刘光廷. 混凝土结构的随机温度场及随机徐变应力[J]. 力学进展 ,1988 ,28(1) :58 ~ 70.

[9] 刘宁 ,吕泰仁. 随机有限元及其工程应用[J]. 力学进展 ,1995 ,25(1) :114 ~ 126.

[10] 刘宁. 三维可分向量随机场局部平均的三维随机有限元及可靠度计算[J]. 水利学报 ,1995 ,25(6) :75 ~ 82.

Primary Research on Random Temperature Field
of a Typical Concrete Gravity Dam

LIU Ning¹ ,KE Qing-qing² ,YAN Xu³

(1. College of Civil Engineering , Hohai Univ . Nanjing 210098 ,China ;

2. Beian Water Resource and Water Power Bureau of Meizhou Bay at Putian , Putian 351100 ,China ;

3. Nanjing Bureau of Water Resource ,Nanjing 210008 ,China)

Abstract :Under the influences of random variabilities ,during both construction period and operation period ,the temperature field within a gravity dam body could be regarded as a random one. In this paper ,stochastic finite element methods are suggested to deal with the random temperature field. By use of the suggested methods ,the influences of random environmental and random hydration heat of concrete and the initial temperature of concrete as well as the thermal parameters of both concrete and rock foundation are all taken into account. According to a scheduled time table of construction ,random temperature fields of a typical concrete gravity dam within both the construction period and the operation period are calculated by emulation the layer constructing of the dam. Some useful conclusions are obtained from the computational results.

Key words :mass concrete structure ;temperature field ;stochastic finite element method ;gravity dam