

水闸闸墩温度场及应力场仿真分析

曹为民 吴 健 闪 黎

(水利部淮河水利委员会建设局,安徽 蚌埠 233001)

摘要 水闸闸墩开裂已成为水闸建设中的通病,要深刻地量化揭示这些裂缝形成的机理,需要发展能精细地模拟混凝土的材料特性、浇筑过程及外界环境条件变化的数值方法.为此,应用非稳定温度场和徐变应力场仿真程序对裂缝产生的原因进行了探讨.结果表明,对水闸闸墩这样的水工薄壁结构,如果没有有效的温控措施,出现裂缝往往在所难免.

关键词 水闸闸墩;温度场;应力场;仿真分析

中图分类号:TV662+.2 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2002)05-0048-05

在水闸设计和施工中,人们对水闸的稳定、渗流和消能防冲等问题较为重视,并形成了一整套相对成熟的理论和方法.但在许多水闸工程特别是水闸的闸墩施工期,往往会产生裂缝,其中有一些是具有较大危害的贯穿性裂缝.由于裂缝问题的复杂性以及人们对裂缝问题的认识不足,到目前为止仍没有找到一套能彻底防止这些裂缝发生的方法.要正确地揭示裂缝形成的机理,需要发展能精细地反映混凝土材料特性和模拟施工浇筑过程及外界环境条件变化的温度场和应力场计算的数值方法,以及研发相关仿真程序,并对种种可能影响因素进行量化计算分析和综合评判.本文就这一问题进行了探讨.

1 温度场及徐变应力场仿真计算原理

1.1 非稳定温度场计算

据变分原理,三维非稳定温度场问题的求解可取如下泛函^[1,2]:

$$\mathcal{K}(T) = \iiint_{R_t} \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{1}{a} \left(\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right) T \right\} dx dy dz + \iint_{S_t^3} \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{T}{2} - T_a \right) T ds \quad (1)$$

式中: R_t ——计算域; T ——温度; a ——导温系数; λ ——导热系数; β ——表面散热系数; T_a ——环境温度; τ ——龄期; t ——时间.

由泛函的驻值条件 $\frac{\delta \mathcal{K}}{\delta T} = 0$ 和时间差分,可得向后差分的温度场仿真计算递推方程组

$$\left(\mathbf{H} + \frac{1}{\Delta t_n} \mathbf{R} \right) \mathbf{T}_{n+1} - \frac{1}{\Delta t_n} \mathbf{R} \mathbf{T}_n + \mathbf{F}_{n+1} = 0 \quad (2)$$

式中: n ——计算次数; Δt_n ——第 n 次时间步长; $\mathbf{H}$ ——热传导矩阵; $\mathbf{R}$ ——热传导补充矩阵; $\mathbf{T}_n, \mathbf{T}_{n+1}$ ——节点温度列阵; $\mathbf{F}_{n+1}$ ——节点温度载荷列阵.

在初始瞬间,温度场为已知函数 $T_0(x, y, z)$.

边界条件 $\bar{S}$ 通常有 3 部分组成:

$$\bar{S} = \bar{S}^1 \cup \bar{S}^2 \cup \bar{S}^3 \quad (3)$$

$\bar{S}^1$ 为第一类边界条件,边界 $\bar{S}^1$ 上的温度为已知,即

$$T = T_s(t) \quad (\forall (x, y, z) \in \bar{S}^1) \quad (4)$$

$\bar{S}^2$ 为第二类边界条件,为绝热边界,即

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (\forall (x,y,z) \in \bar{S}^2)$$

$\bar{S}^3$ 为第三类边界条件,热量与内外温差成比例:

$$\frac{\partial T}{\partial n} + \frac{\alpha(\tau_i)}{\lambda} [T - T_a(t)] = 0 \quad (\forall (x,y,z) \in \bar{S}^3)$$

一般情况下,表面放热系数 $\alpha(\tau_i)$ 是外表面条件及时间的函数,常取的表达式为

$$\alpha(\tau_i) = \begin{cases} \beta_1 & \tau_i > \tau_b \\ \beta_2 & \tau_i \leq \tau_b \end{cases}$$

式中: τ_b ——表面保护时间或拆模时间; τ_i ——边界混凝土单元的龄期.

1.2 徐变应力场计算

根据弹性徐变理论,可用增量初应变方法计算施工期、运行期内由于混凝土自身体积变形、变温和干缩等因素而引起的混凝土的应力,应变增量为

$$\Delta \epsilon_n = \Delta \epsilon_n^e + \Delta \epsilon_n^c + \Delta \epsilon_n^T + \Delta \epsilon_n^s + \Delta \epsilon_n^0$$

式中: $\Delta \epsilon_n^e$ ——弹性应变增量; $\Delta \epsilon_n^c$ ——徐变应变增量; $\Delta \epsilon_n^T$ ——温度应变增量; $\Delta \epsilon_n^s$ ——干缩应变增量; $\Delta \epsilon_n^0$ ——自生体积应变增量. 各应变增量的求解见文献 [2].

由物理方程、几何和平衡方程可得 Δt_i 时段在区域 R_i 上的有限元支配方程

$$K_i \Delta \delta_i = \Delta P_i^C + \Delta P_i^c + \Delta P_i^T + \Delta P_i^S$$

式中: $\Delta \delta_i$ —— R_i 区域内所有节点 3 个方向上的位移增量; ΔP_i^C —— Δt_i 时段内由外荷载引起的等效节点力增量; ΔP_i^c ——徐变引起的等效节点力增量; ΔP_i^T ——变温引起的等效节点力增量; ΔP_i^S ——由于干缩和其他因素引起的等效节点力增量.

求得任意时段 Δt_i 内的位移增量 $\Delta \delta_i$ 后,由式

$$\Delta \sigma_i = DB \Delta \delta_i - D(\Delta \epsilon_i^c + \Delta \epsilon_i^T + \Delta \epsilon_i^s)$$

可算得各个单元的应力增量.

1.3 仿真计算原理

近年来,随着热传导理论的发展与解题方法的不断成熟,对大体积混凝土结构裂缝成因的认识有了进一步的提高^[3]. 通过混凝土中温度场和徐变应力场的非恒定时空复杂问题的求解,能对整个施工和运行过程进行数值仿真模拟,能考虑工程上所遇到的各种各样的问题和现象,比如混凝土的具体施工浇筑过程、养护过程、拆模时间、施工间歇过程、风速变化过程、空气湿度变化过程以及降雨过程等,能事先预测工程结构中任何一点处任何时刻温度大小、应力大小及是否会开裂等信息,能细致地进行混凝土结构的防裂研究,提高工程的抗裂能力与安全度.

要实现仿真计算,必须使计算域随施工情况而变化,同时边界条件也应随外部环境的变化而变化. 为此,笔者与他人合作编制了大型有限元程序. 此程序不但可以随施工情况自动调整计算网格,而且边界条件也可以随外部条件而变化,达到了温度场和应力场变化过程的仿真模拟.

2 工程实例

某大型水闸分 10 孔,每孔间距为 10.0 m,其中闸墩长 21.0 m,厚 1.3 m,高 12.1 m. 施工期为 2001 年的 3 月份,混凝土的热力学性能及力学性能如表 1 所示.

本文计算的是其中一个闸墩,取闸墩和两边各一半的地基和底板,三维网格单元 5 502 个,节点 7 104 个,

表 1 水闸混凝土的热力学及力学参数

Table 1 Thermodynamic and mechanical parameters of concrete of sluice

导温系数 ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	导热系数 ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	表面散热系数(有模板板) ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	表面散热系数(无模板) ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	绝热温升/ $^\circ\text{C}$
0.003 60	8.99	27.43	69.16	$52.8\tau/(0.97 + \tau)$
热膨胀系数/ $^\circ\text{C}$	泊松比	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	最终体积变形/ 10^{-6}
0.874×10^{-5}	0.167	$26.6[1 - \exp(-0.4\tau^{0.513})]$	$2.04\tau/(4.8 + \tau)$	50.0

如图 1 所示. 计算分 104 个时段, 施工过程如图 2 所示(y 轴平行于闸墩的上下游方向, z 轴垂直向上).

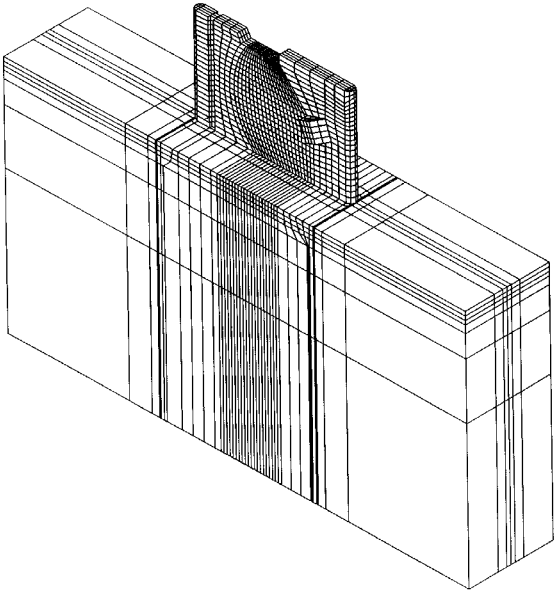


图 1 单元网格
Fig.1 Element mesh

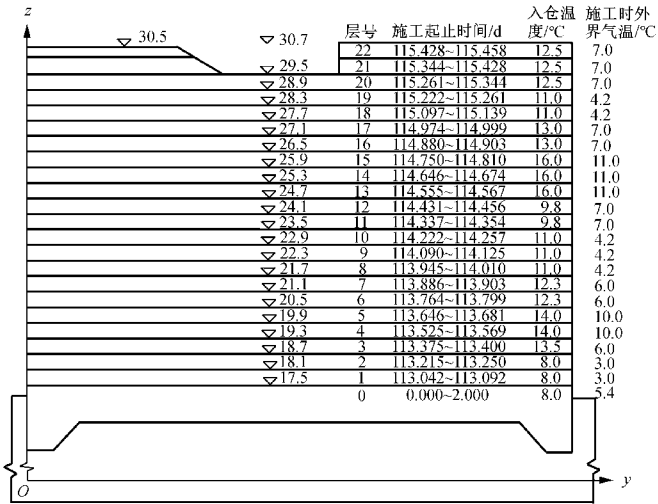


图 2 施工过程
Fig.2 Construction process

通过计算,可以得到各时段温度场及徐变应力场. 整个闸墩温度峰值及达到温度峰值的时间、最大温降幅值(即同一点的最高温度和最低温度之差)、内外最大温差(同一位置闸墩中心和表面温度之差)是工程界最为关心的温控指标,故本文给出了各浇筑层的温度特性值(表 2)及施工完毕后若干时刻温度等值线图.

由表 2 可以看出,温度峰值一般出现在混凝土浇筑后 2~3 d 内,也就是说,在 2~3 d 后混凝土就开始降温,届时一般还未拆模. 混凝土最大的内外温差出现在混凝土达到最高温度时,约 18.1℃;闸墩最大温降出现在离底板 0.5 m 以上部分,最大值为 27.8℃. 由此可知,各项温度指标均不容乐观.

表 2 各浇筑层温度峰值 $T_{\max}$ 及其时间 t_m 、最大温降 $T_{j\max}$ 和内外最大温差 $T_{c\max}$

Table 2 $T_{\max}$, t_m , $T_{j\max}$, and $T_{c\max}$ of each cast layer

浇筑层	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	t_m/d	$T_{j\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{c\max}/^{\circ}\text{C}$	浇筑层	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	t_m/d	$T_{j\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{c\max}/^{\circ}\text{C}$
1	22.57	2.26	6.24	13.07	12	41.27	2.42	24.94	15.97
2	36.22	1.75	19.84	12.60	13	42.81	2.42	26.48	14.56
3	41.22	2.22	24.90	17.43	14	44.15	2.42	27.82	17.14
4	42.95	2.26	26.62	18.05	15	44.13	3.00	27.80	16.98
5	43.43	2.34	27.10	18.12	16	43.40	3.00	27.07	17.49
6	43.02	2.34	26.69	17.86	17	42.35	3.00	26.02	15.85
7	42.26	2.42	25.93	17.30	18	41.15	3.00	24.82	15.13
8	41.80	2.42	25.47	16.65	19	40.71	3.00	24.38	14.66
9	41.40	2.42	25.07	16.37	20	40.93	3.00	24.60	14.21
10	41.00	2.42	24.67	16.07	21	42.29	3.00	25.96	13.50
11	40.93	2.42	24.60	15.81	22	39.99	3.00	23.65	16.60

闸墩施工完毕后各时刻闸墩对应的最大拉应力如表 3 所示(拉应力为正,下同). 若干时刻的应力等值线如图 4 所示. 由表 3 可以看出,最大拉应力 $\sigma_{y\max}$ 出现在下游面和弧形闸门槽之间的中间部位,自施工起第 8 d 即施工完毕后第 5~6 d 时 $\sigma_{y\max}$ 达 1.45 MPa,已超出了混凝土当时的抗拉强度 1.27 MPa,将有可能导致混凝土开裂. 从时间上看,混凝土应力超过抗拉强度的时间正是混凝土降温时期. 由图 4 可以看出,闸墩最大拉应力出现在离底板以上 0.5~3.0 m 之间,而不是在闸墩最底部. 也就是说,裂缝不是从闸墩最底部开始的,而是离底部有一定距离. 这是由于靠近闸底板的闸墩混凝土的温变并不是最大,产生的拉应力也不是最大的. 由图 4 还可看出,在闸墩上部,拉应力已非常小,裂缝不会扩展到上部. 从现场观测的资料来看,图 4 中拉应力较大部位确实出现了若干长短不一的裂缝,如图 5 所示,这说明计算结果与工程实际情况是相符合的.

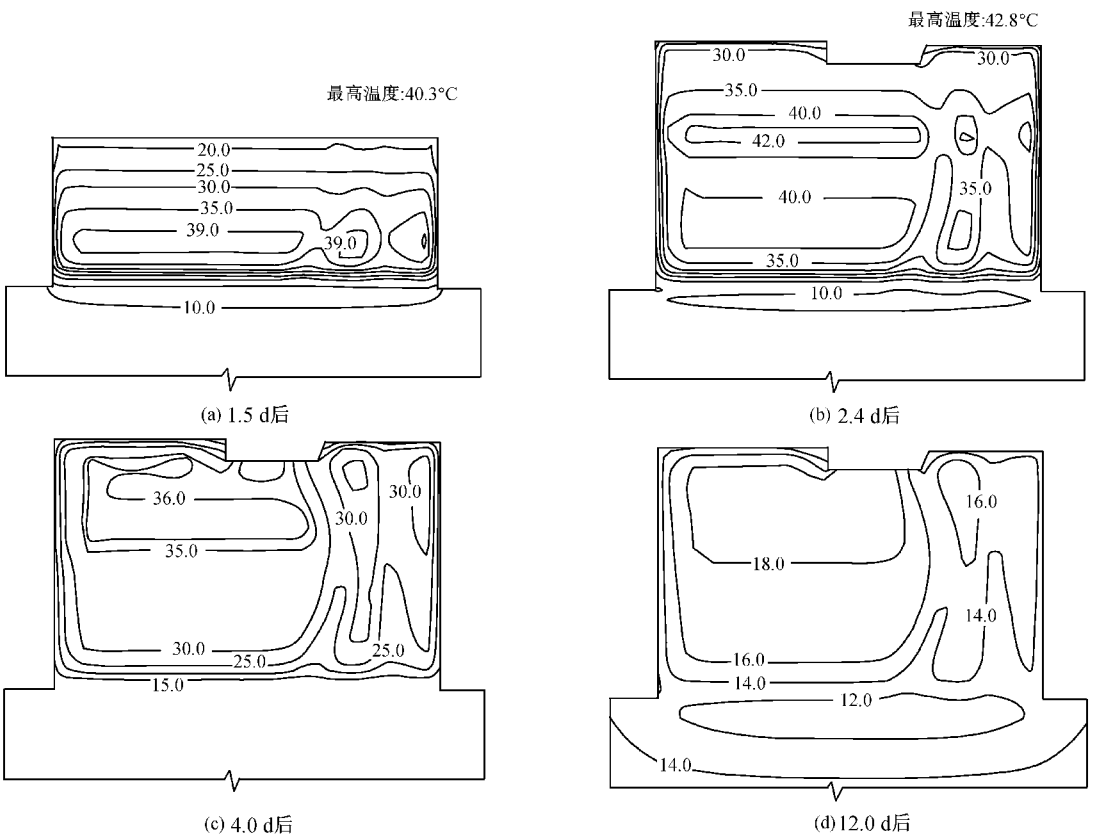


图 3 闸墩中心面上的温度等值线

Fig.3 Temperature contour for central plane of sluice pier

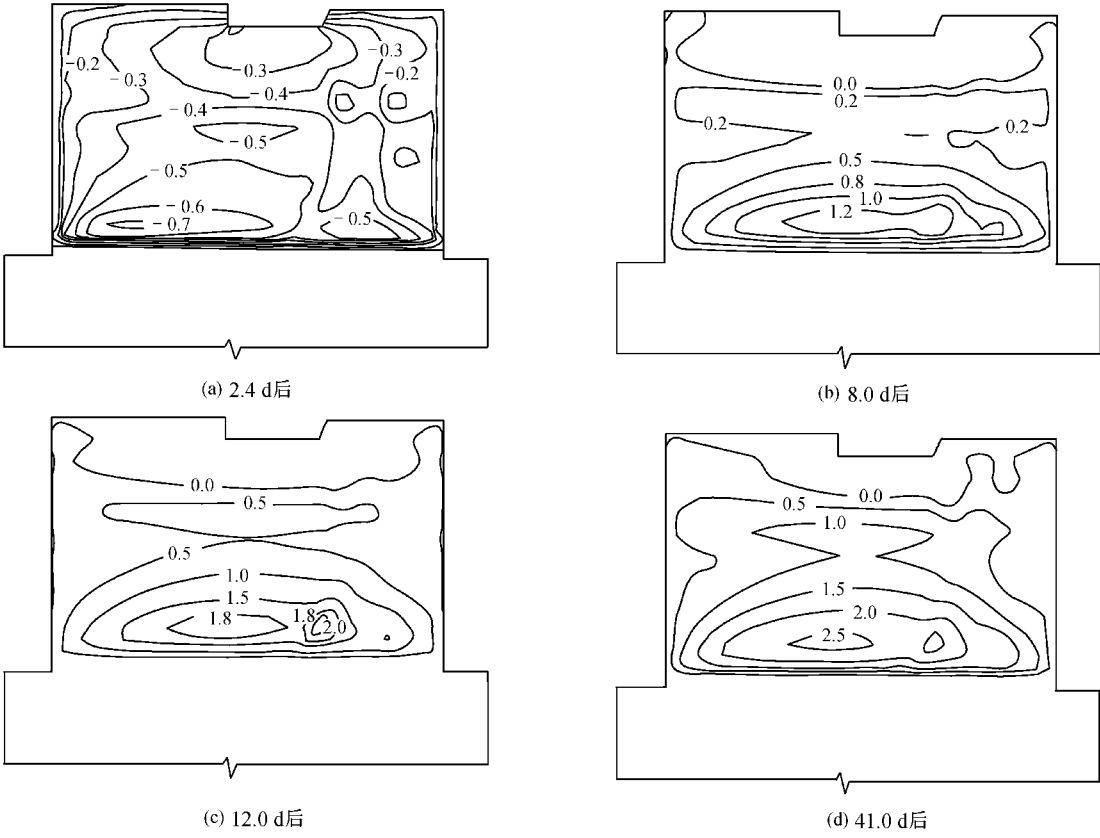


图 4 闸墩中心面上 σ_y 应力等值线 (单位 MPa)

Fig.4 Contour of σ_y on the central plane of sluice pier

表 3 闸墩对应各时刻的 $\sigma_{y\max}$ 和抗拉强度

Table 3 $\sigma_{y\max}$ and tensile strength of difference times											
时间/d	2.4	3.0	4.0	6.0	8.0	10.0	11.0	12.0	14.0	16.0	41.0
$\sigma_{y\max}$ /MPa	0.31	0.39	0.62	1.10	1.45	1.71	1.87	2.17	2.35	2.73	2.67
抗拉强度/MPa	0.68	0.78	0.92	1.13	1.27	1.38	1.42	1.46	1.52	1.57	1.83

注 时间指自闸墩开始浇筑算起.

3 结 论

- a. 运用非稳定温度场理论和徐变应力场理论编制大型有限元程序,可以实现对复杂水工结构(如水闸)的仿真计算,并能得到和实际较为一致的各时段温度场和应力场,为设计和施工提供重要的参考依据.
- b. 据计算结果,对水闸闸墩这样的水工混凝土薄壁结构,如果没有温控措施或温控措施不当,出现裂缝在所难免.
- c. 本文从定量指出,水闸闸墩裂缝不是从闸墩最底部开始,而是从离底板以上一定距离处开始,属贯穿性裂缝,但裂缝在高度上不会到达顶板,即:有‘下不着底,上不着顶’的特性.

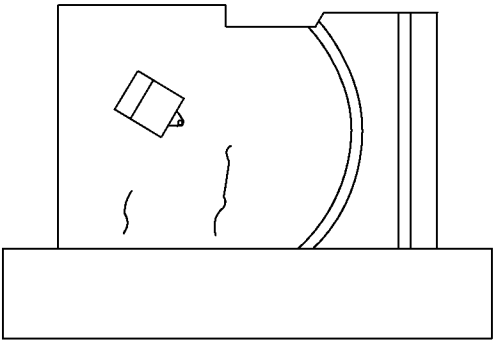


图 5 闸墩实际开裂情况
Fig.5 Cracking of sluice pier

参考文献:

[1] 朱伯芳.混凝土结构徐变应力的隐式解法[J].水利学报,1983(3):25~30.
[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,1999.199~205.
[3] 姜袁,黄达梅.混凝土坝施工过程仿真分析若干问题探讨[J].武汉水利电力大学学报,2000(6):64~68.

Numerical simulation of temperature field and stress field of sluice piers

CAO Wei-min, WU Jian, SHAN Li

(Department of Project Construction and Management, Huaihe Water Conservancy Committee, Bengbu 233001, China)

Abstract: The cracking of sluice piers under construction is a usual phenomenon. It is necessary to develop a numerical method to simulate the properties of concrete, the construction process, and the variation of environmental effect, so as to quantitatively reveal the mechanism of cracking. A study is performed on the computation theory and code design method for numerical simulation of the unsteady temperature field and creep stress field of sluice piers. With an existing sluice as an example, the analytic results indicate that it is difficult to avoid cracking in sluice piers if no effective temperature control measure is adopted.

Key words: sluice pier; temperature field; stress field; simulation