

混凝土拱坝温度裂缝及其扩展稳定性分析

邓爱民, 张小芹, 王向东, 徐道远

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:在朱伯芳院士所提出的拱坝温度荷载计算方法基础上,提出了按混凝土损伤和断裂理论进行混凝土拱坝的温度裂缝及其扩展稳定性的有限元分析计算方法和新的蓄水期温度荷载计算方法。认为温度损伤是产生温度裂缝的内在原因,通过坝体损伤和断裂的耦合计算,判断坝体裂缝的产生及裂缝的扩展稳定性。在损伤计算中考虑了拉、压损伤的等效性,并引入了等价换算系数;同时,在裂缝扩展稳定性判断时,采用了考虑混凝土断裂韧度尺寸效应的断裂判据。

关键词:拱坝;温度裂缝;扩展稳定性;混凝土损伤理论;混凝土断裂理论;有限元

中图分类号:TV642.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2002)06-0091-04

混凝土拱坝作为大体积混凝土结构,发生的裂缝绝大多数是由于温度变化引起的表面裂缝。由于温控措施不力,使一部分表面裂缝发展为深层裂缝甚至贯穿性裂缝,影响拱坝的整体性和耐久性,危害拱坝的正常运行。因此,温度裂缝的形成及其稳定性分析是拱坝设计中十分重要的问题。

拱坝是分期分层浇筑的,在浇筑过程中,混凝土的水化热将放出热量,使自身温度升高,可能引起坝体开裂。蓄水期坝体混凝土的水化热往往没有散尽,因蓄水的冷击作用引起温度的剧烈变化,产生较大拉应力,使得坝体混凝土开裂。由于拱坝坝体较薄,运行期坝体的温度仍将随外界气温、水温的变化而变化,坝体也会受到温度荷载作用。考虑到拱坝温度荷载的重要性,研究拱坝在温度荷载作用下裂缝的形成及扩展稳定性是十分必要的。河海大学损伤-断裂力学课题组研制的有限元软件SSDL08P2N^[1]及DL20P3^[2]能较好地计算温度荷载作用下结构的位移场、损伤场及应力场,并由此确定裂缝是否产生。对于有缝结构,则程序采用断裂力学方法分析裂缝扩展的稳定性。本文就拱坝温度荷载、温度损伤及温度断裂的计算进行了研究,关于拱坝的温度荷载问题,朱伯芳院士已有系统的论述^[3,4],本文在此基础上提出了蓄水期的温度荷载计算方法,并介绍了用损伤与断裂的方法分析温度裂缝的形成及裂缝扩展稳定性的原理。

1 温度荷载计算

拱坝作为一个整体结构,拱坝内部温度分布往往是一条曲线,如图1(a)所示,坝内温度在任一时刻都可分解为三部分:沿坝厚方向的平均温度 T_m 、等效温差 T_d 和非线性温差 T_n ^[3],见图1(b)(c)(d)。在假定拱坝中面法线在变形前后保持为直线、坝体保持自由变形的条件下,由于 T_n 引起的非线性应力具有局部的性质,不影响坝体的整体变形,拱坝温度荷载计算通常仅考虑 T_m 、 T_d 。

拱坝的温度场是时间的函数,坝体灌浆前温度应力可按浇筑块计算。从坝体灌浆后到水库正常运行,拱坝具有如下三个重要的特征温度场:(a)封拱温度场 $T_f(x)$,即接缝灌浆时的坝体温度场,其平均温度为 T_{m0} ,等效温差为 T_{d0} 。(b)运行期年平均温度场 $T_1(x)$,即水库运行期间坝体断面上每点沿时间坐标的年平均温度,其平均温度为 T_{m1} ,等效温差为 T_{d1} ,且有

$$T_{m1} = (T_{UM} + T_{DM})/2 \quad T_{d1} = T_{DM} - T_{UM} \quad (1)$$

式中: T_{DM} ——下游表面年平均温度,等于年平均气温加日照影响; T_{UM} ——上游表面年平均温度,水下部分等于年平均水温^[4]。(c)运行期变化温度场 $T_2(x)$,即外界温度波动所引起的内部温度变化,其平均温度为

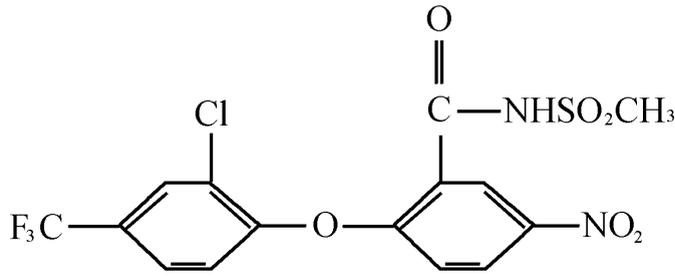


图1 温度场的分解

Fig.1 Decomposition of thermal field

T_{m2} 等效温差为 T_{d2} 其中 T_{m2} 与 T_{d2} 的确定见文献 [3]。

根据三个特征温度场,对施工期、蓄水期和运行期 3 种情况分别计算拱坝的温度荷载。(a)施工期温度荷载。拱坝中通常设有横缝,设横缝灌浆时的坝体温度场即封拱温度场为 $T_f(x)$,浇筑完毕而封拱前按浇筑块计算^[5]得到的温度场为 $T_c(x)$,则封拱温度荷载为 $T_f(x) - T_c(x)$ 。(b)蓄水期温度荷载。考虑拱坝封拱后不久即蓄水,且蓄水期很短,则温度荷载为

$$T_m = T'_{m1} - T_{m0} \quad T_d = T'_{d1} - T_{d0} \quad (2)$$

式中: T'_{m1} ——蓄水期沿坝厚方向平均温度; T'_{d1} ——蓄水期沿坝厚方向等效温差。其计算可参照公式(1),但其中之 T_{UM} 和 T_{DM} 采用蓄水期时段的平均值。(c)运行期温度荷载:

$$T_m = T_{m1} - T_{m0} + T_{m2} \quad T_d = T_{d1} - T_{d0} + T_{d2} \quad (3)$$

2 温度损伤计算及温度裂缝判断

在温度荷载计算式中,只有封拱温度 T_{m0} 和 T_{d0} 是可以人为控制的,为了减轻拱坝的温度荷载,减小坝体拉应力,封拱温度通常控制如下:

$$T_{m0} = T_{m1} \quad T_{d0} = T_{d1} \quad (4)$$

有了温度荷载之后,将它转化成结点等效荷载列阵 R^t ,同时考虑其它作用于坝体的荷载 R^l (自重、水荷载等),通过一般有限元支配方程

$$K\delta = R^l + R^t \quad (5)$$

便可求得任一时刻坝体变形及坝体应力(对于运行期仅需计算温升、温降两种最不利组合)。在计算得坝体变形(表现为各结点位移)基础上,计算各结点应变,得坝体应变场,根据指数函数损伤模型的演变方程^[6]计算损伤度 D 。

$$\left. \begin{aligned} D &= D_0 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} (D_f - D_0) & (\varepsilon \leq \varepsilon_f) \\ D &= 1 - (1 - D_f) \left\{ \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_f}{\varepsilon_u - \varepsilon_f} \right) f(\varepsilon) \right] - \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_f}{\varepsilon_u - \varepsilon_f} \right) \exp \left[- f(\varepsilon) \right] \right\} & (\varepsilon > \varepsilon_f) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$f(\varepsilon) = B \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_f}{\varepsilon_u - \varepsilon_f} \right)^c$$

式中: D_0 ——初始损伤; D_f ——对应应力峰值点的损伤; ε_f ——峰值应变; ε_u ——极限应变; B, C ——曲线参数,由试验确定。

由于混凝土拉、压应力(或应变)区均会发生损伤,但在数值相同的应力(或应变)下,损伤程度是大不相同的,在文献[7]中已经导出了在数值相同的应变下,拉、压损伤的等效系数 γ ,对一般混凝土而言,可取 γ 为 18。在计算中,首先对各结点主应变作如下判断:当主应变为拉应变时,直接代入损伤演变方程(6)计算该点主损伤值;当主应变为压应变,则将压应变除以系数 γ ,并取绝对值后代入式(6)计算该点主损伤值,从而得坝体损伤场。结合考虑坝体应力场和损伤场,确定裂缝开裂部位及裂缝长度,为下一步分析裂缝稳定性做准备。

3 温度断裂有限元计算

对于已经存在宏观裂缝的坝体, 裂缝的扩展稳定性便可由断裂有限元解决. 断裂有限元与一般有限元的区别在于为了能够反映裂缝尖端处应力和应变的 $r^{-1/2}$ 奇异性, 在缝端周围区域布置了一套特殊的奇异性缝端网格群(如图 2), 详见文献 [1]. 其支配方程仍然为式 (5).

通过求解支配方程, 得到坝体结构位移场 δ . 根据 Williams 位移展开式推得的计算应力强度因子计算式为

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sqrt{2\pi E}}{4(1-\mu)^{3/2}} \frac{U_i}{\sqrt{r_i}} \quad K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sqrt{2\pi E}}{4(1-\mu)^{3/2}} \frac{V_i}{\sqrt{r_i}} \quad (7)$$

式中: E, μ ——弹性模量与泊松比; U_i, V_i ——裂缝缝岸上第 i 点垂直于缝向和沿缝向位移; r_i ——第 i 点距缝端的距离. 可见, 断裂有限元计算最关键的部分是缝岸上各点的位移.

4 断裂判据

对于平面问题, 最一般情况下裂缝为 I - II 复合型. I 型和 II 型可视为其特例 [8], 断裂判据为

$$K^*(K_I, K_{II}, K_{IC}) \leq K_{IC} \quad (8)$$

式中: K_I, K_{II} ——根据公式 (7) 计算出的裂缝尖端处的应力强度因子; K_{IC} ——材料的 I 型临界断裂韧度, 由试验计算得出; K^* ——相当应力强度因子.

由于 K_{IC} 具有众所周知的尺寸效应, 小尺寸试件所测得的结果并不能直接应用于诸如拱坝这样的大体积混凝土之中, 而人们又不可能作拱坝的原型试验来测定其断裂韧度, 因此有必要找到混凝土断裂韧度的尺寸效应关系. 由 Weibull 脆性破坏统计理论, 可以得到尺寸大小不同的混凝土试件的断裂韧度关系式 [9]

$$\frac{K_{ICL}}{K_{ICS}} = \left(\frac{W_L}{W_S}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{V_L}{V_S}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (9)$$

式中: K_{ICL}, K_{ICS} ——大、小混凝土试件的断裂韧度; W_L, W_S ——大、小混凝土试件的断面高度; V_L, V_S ——大、小混凝土试件的体积; α ——Weibull 分布的形状参数, 对于混凝土材料一般取 $\alpha = 10$.

根据拱坝实体尺寸大小, 通过公式 (9) 的转换, 便可由试验中测得的小试件的 K_{ICS} 推算得有限元计算所需要的拱坝实体的断裂韧度 K_{ICL} . 无论试件尺寸大小如何, 其统计模型是相同的 [8], I - II 复合型的统计模型形式

$$AK_{II}^2 + BK_I K_{IC} = K_{IC}^2 \quad (10)$$

参数确定: 如令 $K_{II} = 0$, 实际上就是 I 型, 这时 $K_I = K_{IC}$, 得 $B = 1$. 如令 $K_I = 0$, 实际上就是 II 型, 这时 $K_{II} = K_{IC}$, 得 $A = (K_{IC} / K_{II})^2$, 一般可取 $K_{IC} = 1.5K_{II}$, 则 $A = 2.25$, 临界曲线方程变为

$$2.25K_{II}^2 + K_I K_{IC} = K_{IC}^2 \quad (11)$$

引进一缝端稳定安全系数

$$n = \frac{K_C}{K^*}$$

$$K^* = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad K_C = \sqrt{K_I^2 + \frac{K_{IC}^2 - K_I K_{IC}}{2.25}}$$

显然, $n \geq 1$ 时裂缝是稳定的; $n < 1$ 时裂缝将会扩展.

参考文献:

[1] 符晓陵, 徐道远. 平面结构断裂有限元计算程序 [A]. 见: 姜弘道主编. 水工结构与岩土工程的现代计算方法及程序 [C]. 南京: 河海大学出版社, 1992. 192 ~ 209.
 [2] 符晓陵, 徐道远. 空间结构断裂有限元计算程序 [A]. 见: 姜弘道主编. 水工结构与岩土工程的现代计算方法及程序 [C]. 南

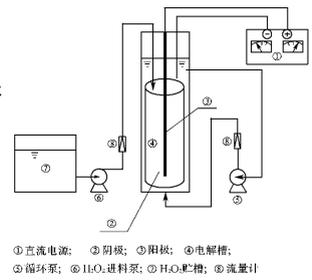


图 2 缝端网格群
Fig.2 Grids group at crack tip

京:河海大学出版社,1992.210~225.

- [3]朱伯芳.朱伯芳院士文选[M].北京:中国电力出版社,1997.82~95.
- [4]朱伯芳.朱伯芳院士文选[M].北京:中国电力出版社,1997.96~110.
- [5]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,1999.255~258.
- [6]何明,徐道远.混凝土的损伤模型[J].福州大学学报,1994(4):109~114.
- [7]邓爱民,符晓陵,徐道远.混凝土拉、压损伤的等价关系研究[J].工程力学,2001(增刊1):343~349.
- [8]徐道远.混凝土I-II型复合裂纹断裂判据的探讨[J].水利学报,1982(6):57~61.
- [9]朱为玄,符晓陵,徐道远.用概率模型和分布模型方法确定大体积混凝土结构的断裂参数[J].河海大学学报(计算力学专辑):107~111.

Thermal cracks in concrete arch dams and their propagation stability

DENG Ai-min, ZHANG Xiao-qin, WANG Xiang-dong, XU Dao-yuan

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

Abstract: Based on the methods for calculation of the thermal load on arch dams developed by ZHU Bo-fang and the theory of concrete damage and fracture, an FEM-based principle and method is proposed for calculation and analysis of thermal cracks in arch dams and crack propagation stability, and a new method is developed for calculation of the thermal load on arch dams in water storage stage. It is concluded that the thermal damage is the internal cause of thermal cracks. By calculation of the damage to and fracture of dam bodies, the occurrence of cracks and the stability of crack propagation are estimated. In calculation of concrete damage, the equivalence between the tension damage and compression damage is considered, and the coefficient of equivalent conversion between the tension damage and compression damage is introduced. Meanwhile, the fracture criterion considering the size effect of the fracture tenacity is adopted in the estimation of crack propagation stability.

Key words: arch dam; thermal crack; propagation stability; concrete damage theory; concrete fracture theory; FEM