

DOI:10.3969/j.issn.1004-4701.2018.04.05

拱坝运行期温度荷载计算方法研究

张继松¹, 王志强²

(1. 江西省河道湖泊管理局, 江西 南昌 330009; 2. 南昌工程学院水利与生态工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要:我国现行的拱坝设计规范中,运行期温度荷载是基于无限长自由平板的解析解得出的,没有考虑非线性温差的影响.本文在介绍相关温度荷载计算原理的基础上,以自由平板为例,计算了解析法、准稳定温度场法、规范方法对应的温度场,说明了利用所编程序进行准稳定温度场分析的合理性.随着计算机水平的发展,实际运用中可采用准稳定温度场法计算拱坝的温度荷载.

关键词:拱坝;温度荷载;计算方法

中图分类号:TV642.4 **文献标识码:**B **文章编号:**1004-4701(2018)04-0261-04

0 引言

温度荷载是拱坝的主要设计荷载之一,过去采用美国垦务局的经验公式进行计算.20世纪80年代初,我国提出了一些考虑当地气温和水温变化的荷载计算方法,并纳入拱坝设计规范.我国现行的拱坝设计规范中,运行期温度荷载是基于无限长自由平板的解析求解得出的,仅考虑坝体截面的平均温度和截面等效线性温差,没有考虑非线性温差的影响,这种简化具有一定的近似性^[1].坝体混凝土在水化热和初始温差的影响消失后,坝体进入准稳定温度场,坝体准稳定温度场可以根据实际的气温和水温等资料,通过有限元仿真计算求出,对应的温度荷载定义为准稳定温度场与封拱温度场的差值^[2,3].

本文在介绍相关温度荷载计算原理的基础上,以自由平板为例,计算了解析法、准稳定温度场法、规范方法对应的温度场.

1 计算原理

1.1 规范方法

(1) 一般规定

坝体内温度分布可分解为三部分,即平均温度 T_m 、等效线性温差 T_d 和非线性温差 T_n (图1),三者可

按以下公式计算。

平均温度 T_m

$$T_m = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} T dx \quad (1)$$

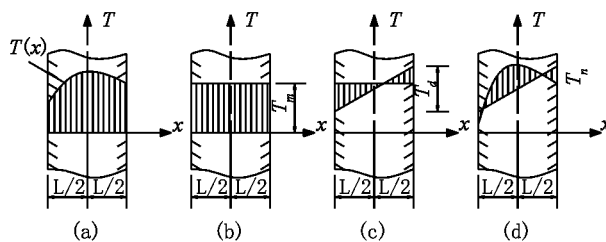
等效线性温差 T_d

$$T_d = \frac{12}{L^2} \int_{-L/2}^{L/2} T x dx \quad (2)$$

非线性温差 T_n

$$T_n = T - T_m - \frac{T_d x}{L} \quad (3)$$

式中: L 为坝体厚度,m; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$,为坐标 x 的函数。



(a)实际温度;(b)平均温度 T_m ;(c)等效线性温差 T_d ;(d)非线性温差 T_n

图1 坝体温度分布示意图

(2) 计算公式

根据上述的三个特征温度场,建议由下式计算拱坝

收稿日期:2018-05-03

作者简介:张继松(1979-),男,大学本科,高级工程师.

运行期的温度荷载。

$$T_m = T_{m1} + T_{m2} - T_{m0} \quad (4)$$

$$T_d = T_{d1} + T_{d2} - T_{d0} \quad (5)$$

式中： T_m 、 T_d 为拱坝的温度荷载，kN； T_{m0} 、 T_{d0} 为封拱温度场的平均温度和等效温差，℃； T_{m1} 、 T_{d1} 为运行期年平均温度场沿厚度的平均温度和等效温差，℃； T_{m2} 、 T_{d2} 为运行期变化温度场沿厚度的平均温度和等效温差，℃。

由上式可知，拱坝的温度荷载包括两部分，一部分是初始温差，即坝体年平均温度与封拱温度之差 $T_{m1} - T_{m0}$ 及 $T_{d1} - T_{d0}$ ，它们是不随时间变化的；另一部分是时变温差，即外界水温和气温的变化在坝内所引起的温度变化 T_{m2} 和 T_{d2} ，这一部分温差是随时间作周期性变化的，夏季为温升，冬季为温降。其他公式见《混凝土拱坝设计规范》SL282-2003。

1.2 解析法

拱坝在运行期时，上游面主要与水库水接触，下游面主要与空气接触，坝内的温度会随着水温和气温的变化而变化。当拱坝厚度 L 与坝体曲率半径 R 的比值 $L/R \leq 0.5$ 时，可以忽略坝体曲率的影响，坝体的温度场按平板来计算和分析^[4]。

解析法对应的温度荷载是针对无限长自由平板得到，自由板是指完全不受外界约束，在各个方向都可以自由变形的板。自由板内的温度应力完全是由于温度分布不均匀而产生的自生应力。无限长自由平板见图2。

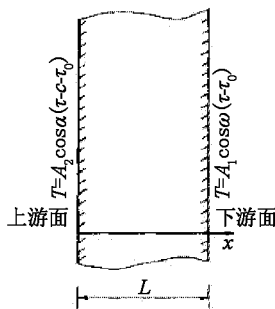


图2 无限长自由平板

其中，平板上下游表面点的温度等于边界温度。

计算平板内部点的温度时，上下游面的多年年平均温度通过线性插值反映，上下游面的多年平均气温年变幅通过式(6)反映。

对于如图2所示的平板，满足热传导方程和边界条

件的理论解为：

$$A(x, \tau) = A_1 k_1 \cos[\omega(\tau - \tau_0) + \phi_1] + A_2 k_2 \cos[\omega(\tau - \tau_0) + \phi_2] \quad (6)$$

式中：

$$k_1 = \sqrt{\frac{\cosh 2\zeta - \cos 2\zeta}{\cosh 2\zeta_0 - \cos 2\zeta_0}}$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{\cosh 2(\zeta - \zeta_0) - \cos 2(\zeta - \zeta_0)}{\cosh 2\zeta_0 - \cos 2\zeta_0}}$$

$$\phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \zeta}{\tanh \zeta}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\tan \zeta_0}{\tanh \zeta_0}\right)$$

$$\phi_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\tan(\zeta - \zeta_0)}{\tanh(\zeta - \zeta_0)}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\tan \zeta_0}{\tanh \zeta_0}\right)$$

$$\zeta = x/\eta, \zeta_0 = L/\eta, \eta = \sqrt{\alpha P/\pi}, \omega = 2\pi/P$$

公式中有关参数的含义见参考文献[4]。

各点的温度计算出来后，减去各点的初始温度（封拱温度）得到各点的温度荷载。

1.3 准稳定温度场法

一般而言，坝体混凝土在水化热和初始温差的影响消失后，坝体进入准稳定温度场，以准稳定温度场与拱坝封拱温度场的差值作为温度荷载计算出的应力场即为拱坝运行期的温度应力。

所谓准稳定温度场，指的是当拱坝较薄时，由于气温和水温的周期性变化的影响，将不存在稳定温度场，只存在准稳定温度场。准稳定温度场的计算方法与非稳定温度场计算方法基本上相同，只是不考虑水泥水化热作用。此处的准稳定温度场为无热源的非稳定温度场，与考虑施工过程中混凝土水化热的非稳定温度场不同。

2 算例

为了说明利用所编程序进行有限元分析的合理性，以自由平板为例，采用规范方法、解析法、准稳定温度场法计算了平板对应的温度荷载。其中规范方法的结果是通过对准稳定温度场的结果整理得到。

2.1 基本资料

平板高400.00 m，厚40.00 m，年平均气温18℃，气温年变幅10℃，初始温度16℃，上游水位400.00 m，下游无水，恒温层水深60.00 m，混凝土导温系数3 m²/月。

有限元网格沿水平方向和竖直方向剖分20份，有限元网格见图3。

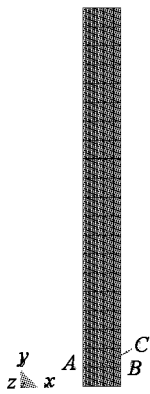


图 3 平板有限元网格

2.2 计算结果分析

采用准稳定温度场法时,平板下部 20.00 m 高程上

游面点 A、下游面点 B、中间点 C 对应的温度随时间变化的曲线见图 4~6。由图可以看出,上游面点 A 的温度随时间基本不变化,这是因为 A 点在恒温层以下;下游面点 B 的温度随时间做年周期性变化,这是因为 B 点在空气中,随外界气温做周期性变化;中间点 C 第 20 年以后温度趋于稳定。准稳定温度场法计算温度场时间为 50 年,本文取第 49 年 8 月中旬的温度作为温升对应的温度。

以平板下部高程 20.00 m 处为例,8 月中旬的温度荷载见图 7。由图 7 可以看出:(1)准稳定温度场法与解析法得到的结果基本相同,说明本文所编程序进行准稳定温度场分析是合理的。(2)规范方法对应的结果是通过对准稳定温度场的结果整理得到,在上下游之间呈线性变化,不能反映非线性温差的影响,误差较大。

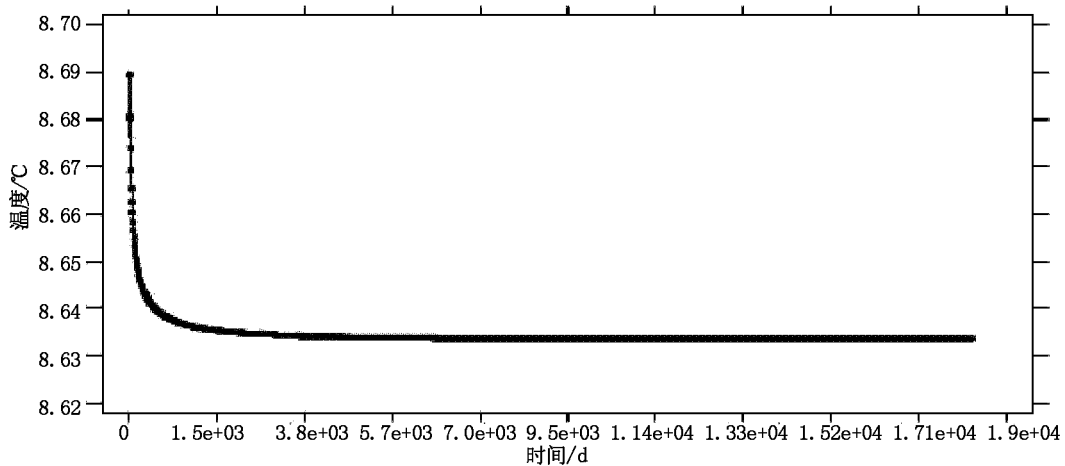


图 4 A 点温度随时间变化曲线

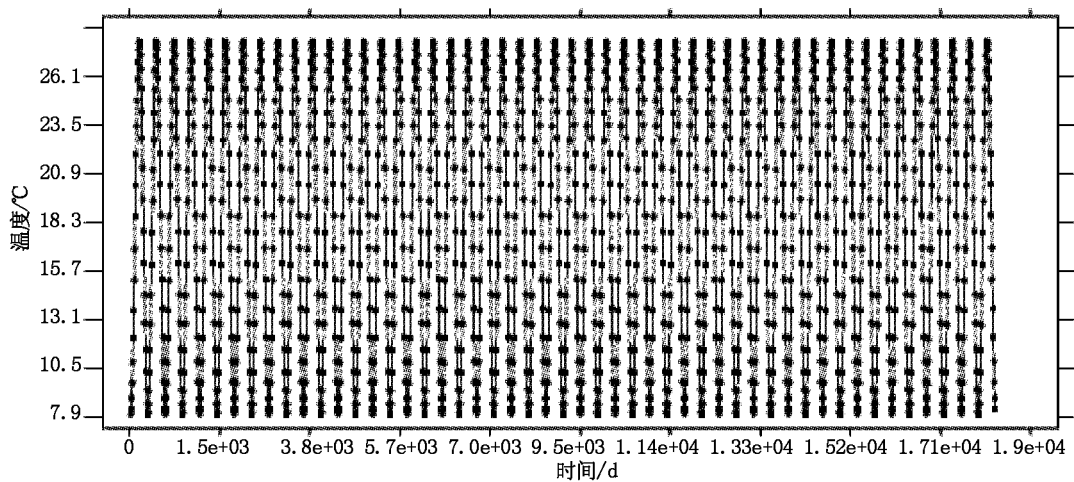


图 5 B 点温度随时间变化曲线

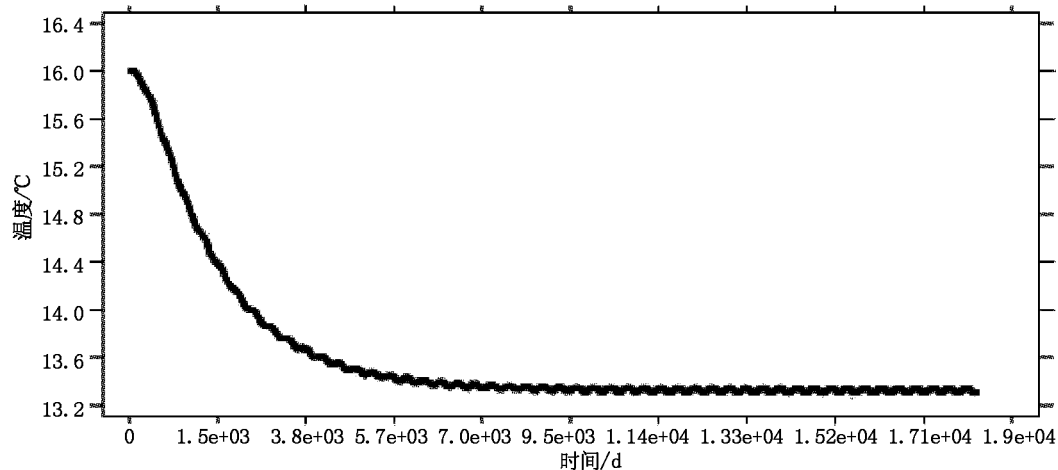


图6 C点温度随时间变化曲线

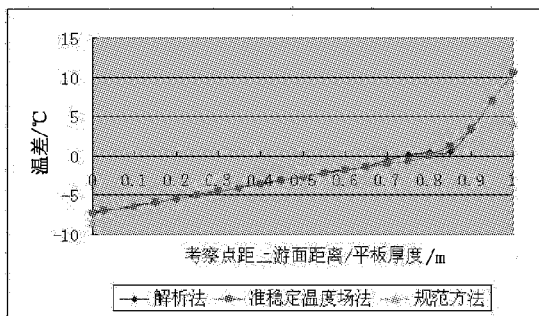


图7 高程20.00 m处8月中旬的温度荷载

4 结 语

本文在介绍相关温度荷载计算原理的基础上,以自由平板为例,计算了解析法、准稳定温度场法、规范方法对应的温度场,说明了利用所编程序进行准稳定温度场

分析的合理性。

采用准稳定温度场法计算拱坝的温度荷载,可以考虑非线性温差的影响,能反映上下游水位变化区温度梯度影响及大坝与地基交界处的热传导效应。随着计算机水平的发展,实际运用中可采用准稳定温度场法计算拱坝的温度荷载。

参考文献:

- [1] SL282-2003. 混凝土拱坝设计规范[S].
- [2] 杨波,朱伯芳. 拱坝运行期非线性温差应力分析[J]. 水利水电技术, 2003,34(6):24~26.
- [3] 李同春,王志强,赵兰浩. 高拱坝温度荷载计算方法探讨[J]. 水力发电学报,2010,29(5):35~38.
- [4] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

编辑:张绍付

Study on calculation method of temperature load in operation period of arch dam

ZHANG Jisong¹, WANG Zhiqiang²

(1. Administration of River and Lake in Jiangxi Province, Nanchang 330009, China;

2. Nanchang Institute of Technology, Water Resources and Ecological Engineering College, Nanchang 330099, China)

Abstract: In the current code for design of arch dam in China, the temperature load in operation period is based on the analytical solution of infinitely long free plate, the effect of nonlinear temperature difference is not considered. This article is based on the calculation principle of relevant temperature load, taking the free plate as an example, the temperature field corresponding to the analytical method, the quasi steady temperature field method and the standard method is calculated, the rationality of the quasi steady temperature field analysis by using the program is explained. With the development of computer level, the quasi steady temperature field method can be used to calculate the temperature load of arch dams.

Key words: Arch dam; Temperature load; Calculation method

翻译:张继松