

混凝土水管冷却试验与计算及应用研究

朱岳明¹,贺金仁²,肖志乔¹,方孝伍¹

(1. 河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098; 2. 浙江省水利水电勘测设计院,浙江 杭州 310002)

摘要 针对混凝土冷却水管温度场有限单元法,进行了一个室内混凝土温升试验和计算对比研究.结果表明,该算法在理论上是严密可靠的.同时,将该算法直接运用于一高碾压混凝土重力坝的温控研究中,认为在碾压混凝土坝中,埋设冷却水管仍然是一种效果好、操作简单、灵活易调整、适应性强、质量易保证且又相对经济的温控措施,特别适合坝体内部的削峰降温.

关键词 温度场;水管冷却;混凝土温升试验;有限单元法;迭代计算;温控

中图分类号 :TU528 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2003)06-0626-05

因水管中的水是流动的,且管中沿程水温事先不知道,水管冷却温度场的求解是一个复杂的三维温度问题,一直得到学术界和工程界的特别关心.笔者在文献[1]的基础上,完善了一种三维有限单元法迭代求解的算法,在温度场的仿真计算中能准确地模拟水管冷却的导热降温行为^[2,3].鉴于该方法的重要性,笔者做了一个带水管的室内混凝土温升试验,通过温度巡检仪定时地读取试块中预埋温度计测点的温度值,并运用该算法进行对比分析,取得令人满意的结果.另外,将某高碾压混凝土重力坝作为研究对象,进行了坝体高温期施工水管冷却温度削峰效果的应用研究.

1 水管冷却混凝土温度场的有限单元法求解

混凝土中有冷却水管时(图1),在表面散热与水管冷却的同时作用下,是一个典型的空间温度场问题.因水管很薄,对于一般工程问题而言,管壁可视为式(1)简单的第一类冷却边界,当用金属质水管时,更是如此.

$$\Gamma^0: T = T_w \tag{1}$$

式中: T ——温度; T_w ——冷却水温度; Γ^0 ——水管边界.

利用空间上的有限单元法和时间上的差分法,三维不稳定温度场求解的支配方程为

$$\left(H + \frac{1}{\Delta t_n} R \right) T_{n+1} - \frac{1}{\Delta t_n} R T_n + F_{n+1} = 0 \tag{2}$$

式中: Δt_n ——计算步长; H 、 R ——系数矩阵; F ——边界温度荷载列阵.

因管内水温未知,温度场的求解需采用迭代计算,本文在文献[1]的基础上进行如下方式的严密求解:
先假设整根冷却水管的沿程水温均等于入口水温,由式(2)求得整个计算域温度场的分布,再根据式(3)或式(4)^[2,3]以及式(5)^[1]求得冷却水管的沿程水温变化.

$$\Delta T_{wi} = \frac{-\lambda}{c_w \rho_w q_w} \iint_{\Gamma^0} \frac{\partial T}{\partial n} ds + \frac{A_p}{q_w} \int_{l_{i1}}^{l_{i2}} \frac{\partial T_{wp}}{\partial t} dl \tag{3}$$

式中: λ ——导热系数; q_w 、 c_w 、 ρ_w ——冷却水的流量、比热容和密度; n ——边界处法线方向; A_p ——水管的截面积; T_{wp} ——水管内的水体温度; t ——时间.

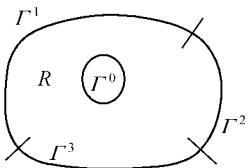


图1 冷却水管边界
Fig.1 Boundary of cooling water pipe

收稿日期 2002-12-18
 基金项目 水利部科技创新项目;河海大学周君亮院士学科发展基金资助项目(YS003);国家电力公司“十五”科技攻关资助项目(KJ00-03-23-01-01(3))
 作者简介 朱岳明(1958—),男,浙江长兴人,博士,教授,博士生导师,从事水工结构工程和岩土工程的渗控、温控、稳控和反问题研究.

考虑到水管内水体体积很小,且通水时段内水管水温沿程变化也不很大,式(3)可简化成:

$$\Delta T_{wi} = \frac{-\lambda}{c_w \rho_w q_w} \int_0^l \frac{\partial T}{\partial n} ds$$

(4)

$$T_{wi} = T_{w0} + \sum_{j=1}^i \Delta T_{wj} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m$$

(5)

将得到的沿程水温作为新的初始水温,再算出计算域温度分布.当各点冷却水温都收敛于稳定值时迭代结束,否则要将计算出的冷却水管的沿程水温又当作新的管内初始水温,继续进行迭代计算.

2 混凝土水管冷却试验

2.1 混凝土的材料特性参数

混凝土的导温系数 $a = 3.76 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$,导热系数 $\lambda = 8.49 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,竹胶模板的表面散热系数 $\beta = 18.15 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,混凝土的绝热温升函数

$$\theta = \begin{cases} 0 & \tau < 0.5 d \\ \frac{30.34(\tau - 0.5)^{1.47}}{1.386 + (\tau - 0.5)^{1.47}} & \tau \geq 0.5 d \end{cases}$$

试验过程中部分时刻冷却水管的进口水温见表 1.

表 1 冷却水管的进口水温

Table 1 Water temperature at the entrance of cooling water pipe

时间/d	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
水温/℃	17.8	17.6	17.3	17.2	17.0	17.0	16.8	16.5	15.5	15.4	14.4	14.2
时间/d	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0
水温/℃	13.7	13.6	13.5	13.3	13.4	12.8	12.9	12.4	12.5	12.1	11.9	11.5

2.2 试验方法

a. 进行室内试验时,首先将施工用竹胶模板加工成一个尺寸为 45 cm × 45 cm × 240 cm 的试模,在试模截面中心沿长度方向布置一根 $\varnothing 25 \text{ mm}$ 、长 2.4 m 的钢质冷却水管(图 2),在试模内的 6 个典型位置处各固定一支温度传感器,各测点的点号和坐标值[点号(x, y, z 坐标)](单位:cm)为:1(30.0,10.0,25.0),2(30.0,20.0,25.0),3(30.0,30.0,25.0),4(210.0,10.0,25.0),5(210.0,20.0,25.0),6(30.0,20.0,35.0).

b. 混凝土试块周围 6 个面均用竹胶模板固定并且架空底面,尽可能保证 6 个面边界条件的一致性.待试件成型后立即通水,并计算出冷却水在水管中的流速和流量.

c. 每隔一定时间用温度巡检仪对各个测点检测温度一次,同时记录该时刻的环境温度和水管进、出口处的水温.具体观测要求为:浇筑后第 1~3 d,每 2 h 观测一次;第 4~7 d,每 4 h 观测一次;第 8~15 d,每 8 h 观测一次,往后根据试验环境条件变化情况和检测结果情况酌情决定.

2.3 试验结果

根据上述方法,试验历时 16 d.同时,将整个混凝土试块作为计算域,运用前述算法进行了水管冷却混凝土三维温度场的有限单元法仿真计算.对计算域采用空间六面体 8 结点单元进行剖分,利用对称性后,网格结点和单元总数分别为 900 和 640 个,管内流量 $43.26 \text{ m}^3/\text{d}$,比热容 $4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,密度 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$.计算结果表明,各点的温度测值与计算值吻合得很好(图 3),其中绝大部分时段内的求解只进行了 2~3 次的迭代,算法效率很高.在试验进行过程中(试件成型后第 5 d 左右)停了约 1 d 的电,由于当时气温较低,停电期间室内温度明显降低,影响了试块内各测点的温度值,出现图 3 温度历时曲线局部处不光滑的现象.

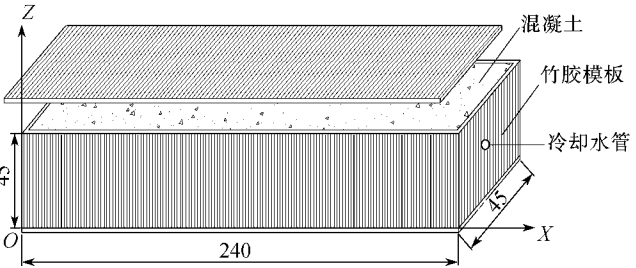


图 2 有冷却水管的混凝土温升试块(单位:cm)

Fig.2 Sketch of test concrete block with cooling water pipe(unit:cm)

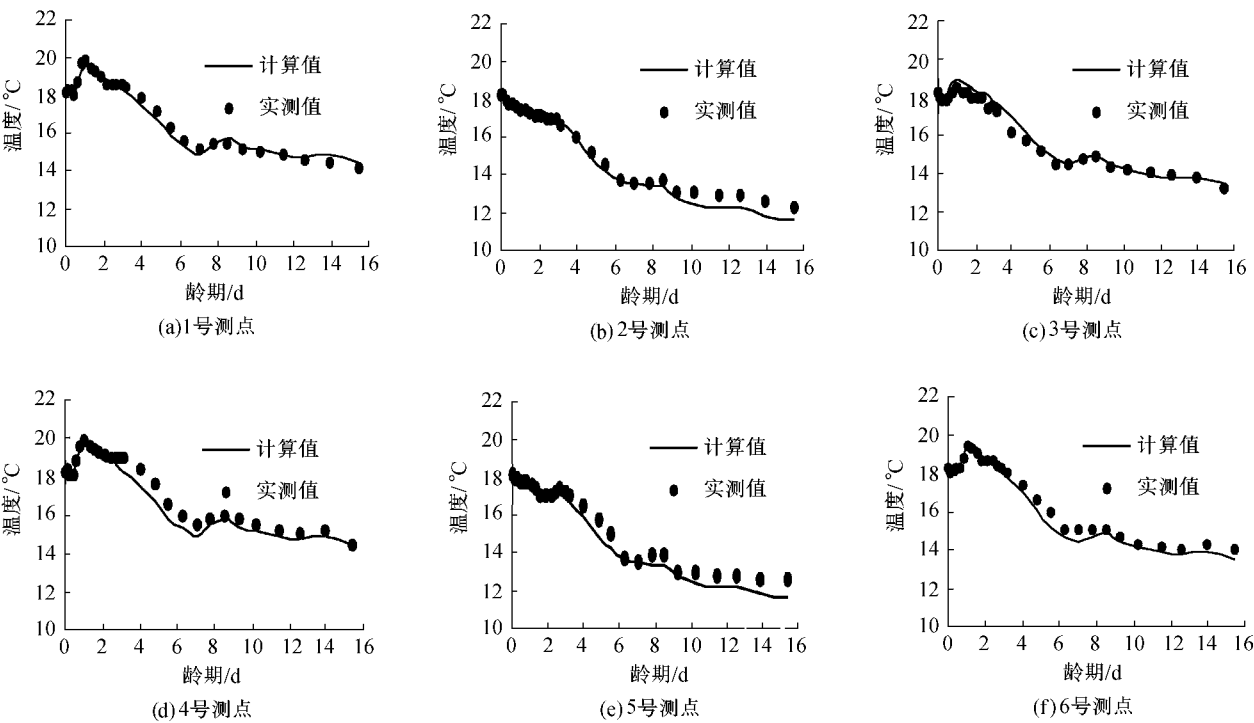


图 3 各典型测点温度值的试验值和理论计算值的历时变化过程

Fig.3 Time variations of tested and calculated temperatures at 6 measuring points

3 水管冷却在某高碾压混凝土重力坝中的应用

某高碾压混凝土重力坝,计算坝段高 157 m(高程 225 m~382 m),拟订的施工时间为 2003 年 11 月 1 日至 2005 年 9 月 5 日,其中高程 267.75 m~293.35 m 和 357.95 m~380.45 m 为两个夏季连续施工期.位于高程 225~231 m 的基础常态混凝土浇筑层厚为 0.5 m,每连续浇筑 2 层间歇 7 d.碾压混凝土的浇筑层厚 0.3 m,其中 5~9 月份施工时,连续浇筑 5 层间歇 5 d;其它月份施工时,连续浇筑 10 层间歇 9 d.

为了计算水管冷却降温削峰效果,决定在两个夏季高温期所施工的局部区域内埋设冷却水管,外径为 25.4 mm,考虑到碾压混凝土的施工特点,尽量减小水管埋设对施工的干扰,水管顺河向埋设,假定采用“一”字型水管,在第一个夏季施工区沿高度布置 18 根冷却水管,第二个夏季施工区布置 16 根冷却水管,垂直管距均为 1.5 m,水平管距为 2.0 m.为此,拟订了 3 种计算工况,工况 1 即不采取任何温控措施,混凝土的浇筑温度为自然浇筑温度(等于月平均气温+热辐射等其它不确定因素引起的混凝土温升值 3℃);工况 2 通水冷却,水温 10℃,通水时间 20 d,冷却水流量 q_w 为 43.26 m³/d,混凝土初凝时开始通水冷却,每 0.5 d 改变一次水流方向,混凝土的浇筑温度同工况 1;工况 3 的冷却水温为 15℃,其它情况同工况 2.

坝址区的逐月年平均气温如表 2 所示.地基计算区域的选取,坝踵上游、坝趾下游和坝基深度各取 150 m,沿坝轴线方向假定相邻两个管的中间垂直剖面为绝热面,计算域厚仅为 2.0 m,图 4 为计算单元网格.

表 2 坝址处逐月年平均气温

Table 2 Monthly average air temperature at dam site

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
气温	11.0	12.7	16.8	21.2	24.3	26.1	27.1	26.7	24.8	21.0	16.7	12.7

图 5 为计算工况沿坝高各水平截面的最高温度分布,与出现的两个高温区所对应的是两个夏季施工期.采取水管冷却的温控措施,能够明显地降低混凝土的最高温度,起到了良好的削峰效果.如冷却水温为 10℃,可使第一个高温区的最高温度降低 6.43℃,第二个高温区的最高温度降低 3.6℃;当冷却水温为 15℃时,第一个高温区的最高温度降低 4.4℃,第二个高温区的最高温度降低 2.6℃.冷却水温越低,所起的冷却效果就越好(但要同时注意水管周围混凝土拉应力的变化).据图 6,采用冷却水管还可以降低坝体的基础温

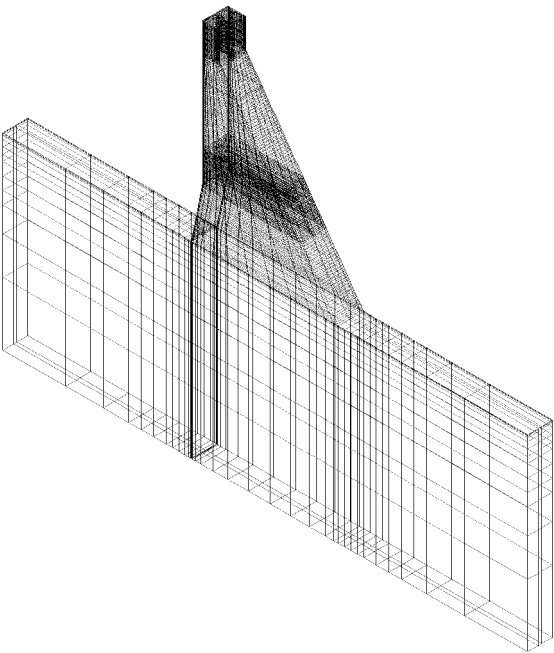


图 4 单元网格
Fig.4 Element grid

差,就各工况典型点(位于高程279 m,离上游面 25 m 的两根水管的中间位置)的基础温差进行比较,工况 1 的基础温差为 22.3℃,工况 2 的基础温差为 11.0℃,降低了 11.3℃;工况 3 的基础温差为 13.7℃,降低了 8.6℃.图 7 为工况 2 和工况 1 在大坝混凝土浇筑完工时的温度分布,可见,在夏季浇筑区局部位置埋设冷却水管,在降低坝体最高温度的同时,也降低了内外温差和层间温差.

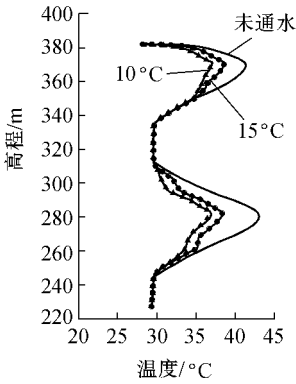


图 5 沿坝高各水平截面的最高温度分布
Fig.5 Distribution of highest temperature over horizontal sections along the dam height

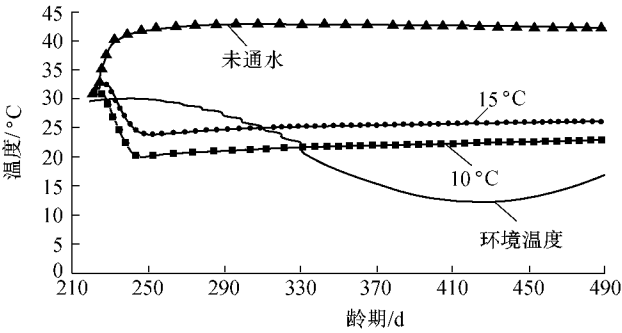


图 6 典型点的温度历时变化曲线
Fig.6 Time variation of temperature at typical points

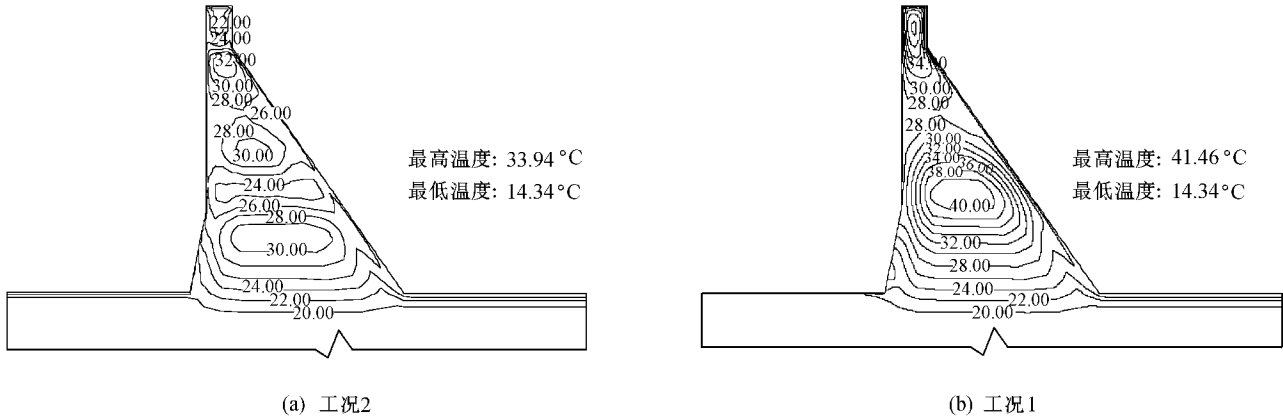


图 7 大坝混凝土浇筑完工时(2005 年 9 月 5 日)坝体温度场

Fig.7 Distribution of temperature in dam body after the completion of dam construction(Sep.5 2005)

4 结 论

针对水管冷却混凝土温度场的有限单元法求解的严密算法,进行了一个水管冷却温升试验.结果证明,该算法不但理论上是严密的,而且迭代效率和计算精度也很高.本文所提的试验方法对于反演冷却水管管材(如非金属材料)的热交换系数也具有实用价值.在坝体中运用水管冷却的计算结果表明,大体积混凝土局部高温区埋设冷却水管能够很好地起到削峰降温的作用,改善坝体内的温度分布,降低坝体的基础温差、内外温差等温控指标.由于水管冷却措施在施工现场的运用中具有很大的灵活性和适应性,相对成本又低,有了严密的算法后,相信坝工界将会更加广泛有效地运用这一技术.

参考文献:

- [1] 朱伯芳,蔡建波.混凝土坝水管冷却效果的有限元分析[J].水利学报,1985(4):27—36.
- [2] 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浮动网格法[D].南京:河海大学,2000.
- [3] 朱岳明,张建斌.碾压混凝土坝高温期连续施工采用冷却水管进行温控的研究[J].水利学报,2002(11):55—59.

Calculation and experimental comparison of temperature field of embedded cooling water pipes and their application

ZHU Yue-ming¹, HE Jin-ren², XIAO Zhi-qiao¹, FANG Xiao-wu

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
- 2. Zhejiang Provincial Investigation and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Hangzhou 310002, China)

Abstract For examination of the FEM used for calculation of the temperature field of embedded concrete cooling water pipes, a laboratory concrete temperature rise test is performed. The comparison of the tested result of temperature distribution with that calculated by the FEM indicates that the algorithm is not only robust in theory, but also precise enough for practical application. The application of the algorithm to the study of the temperature control for a high roller-compacted concrete gravity dam shows that the embedment of cooling water pipes in concrete is an economical and effective measure for temperature control, with the merits of simple operation, easy adjustment, high adaptability, and high quality, and is especially suitable for cutting off the internal temperature peak in dam bodies.

Key words: temperature field; water pipe cooling; concrete temperature rise test; FEM; iterative calculation; temperature control