

水管冷却混凝土温度场分析

林志祥, 朱岳明

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

关键词: 混凝土温度场; 水管冷却; 有限元; 仿真计算; 迭代求解; 温控防裂

摘要: 在文献[3]的基础上, 基于冷却水管与混凝土之间热量交换的平衡原理, 提出水管冷却混凝土温度场问题有限元求解的改进迭代算法。通过试验验证及在工程中的应用, 说明该算法不但在理论上精确、严密, 而且具有很高的迭代计算效率和计算精度。

Solution to temperature field of concrete with water-cooling pipe and its application

Lin Zhi-xiang, Zhu Yue-ming

(College of Water Conservancy & Hydroelectric Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098)

Key Words: temperature field in concrete; water pipe cooling; finite element method; simulative calculation; iterative solution; and temperature control and cracking prevention

Abstract: On the basis of the work of the reference [3], the authors improved and suggested a iterative FEM procedure for solution to thermal problem in concrete with water-cooling pipes. The procedure is theoretically strict, totally solved the problem and has high accuracy and efficacy. Using the method and the calculation code, the results of an example and from the applications to one dam are given and illustrated.

中图分类号: TV315

文献标识码: A

水管冷却技术是目前混凝土温控防裂最常用和最有效的措施之一。然而由于水管水温的沿程不断变化、管内水体的流动以及混凝土内数目众多的冷却水管, 使得水管冷却混凝土温度场成为极复杂不易求解的三维不稳定温度场。朱伯芳院士在文献[1]中把冷却水管看成温度场中的负热源, 建立了等效热传导方程, 并在文献[2]中对这一方法进行了改进, 在文献[3-4]中他提出另一个迭代解法, 奠定了水管问题精确求解的基础。笔者在该方法的基础上, 基于水管与混凝土之间热量交换的平衡原理, 改进了这一算法^[5], 即无需简化成平面问题, 而且在计算水管水体与混凝土之间的热量交换时, 无论水管段曲直, 也可直接严格的按沿程各个水管单元边界的曲面进行积分, 大大提高了计算的仿真度。

1 水管冷却混凝土温度场的精确计算方法

1.1 不稳定温度场的求解

众所周知, 根据变分原理, 三维非稳定温度场的求解可取如下泛函:

$$I(T) = \iiint_V \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{1}{a} \left(\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right) T \right\} dx dy dz + \iint_{\Gamma^3} \left[\frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{T}{2} - T_0 \right) T \right] ds \quad (1)$$

式中 R 为计算域, T 为温度, α 为导温系数, θ 为绝热温升, λ 为导热系数, β 为边界面散热系数, T_0 为环境温度, τ 为时间, τ 为龄期, Γ^3 为第三类边界域。

由泛函数的驻值条件 $\frac{\delta I}{\delta T}$ 和时间域的向后差分, 可得不稳定温度场仿真计算的递推方程组:

$$([H] + \frac{1}{\Delta t_n} [R]) \{T_{n+1}\} - \frac{1}{\Delta t_n} [R] \{T_n\} + \{F_{n+1}\} = 0 \quad (2)$$

由已知上一时刻的结点温度的解 $\{T_n\}$, 计算得到下一时刻的解 $\{T_{n+1}\}$ 。

1.2 水管冷却混凝土温度场的有限元仿真计算^[5]

在混凝土温度场中, 任取其中一段含有 3 个单元的冷却水管(见图 1)。

根据热传导定律, 水管外壁面任何一点处的混凝土热流

收稿日期: 2004-12-06

基金项目: 水利部科技创新重点资助项目(SCXC2003-10); 河海大学院士学科发展基金资助项目(HHUYS003)

作者简介: 林志祥(1978—), 男, 江苏姜堰人, 博士研究生, 从事水工结构工程的温控研究。

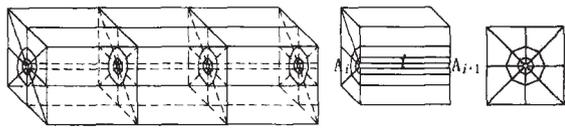


图1 混凝土冷却水管段和水管周围单元网格的加密

量 $q = -\lambda T/n$ 。考察 dt 时段内在截面 A_i 和 A_{i+1} 之间第 i 水管段元混凝土和水管水体之间的热量交换情况(水管壁厚很小,一般无需考虑水管本身热能的变化):

混凝土经该水管段元整个内壁面 Γ^0 向水流放出或吸收的热量

$$dQ_c = \iint_{\Gamma^0} q_w ds \cdot dt = -\lambda \iint_{\Gamma^0} \frac{\partial T}{\partial n} ds \cdot dt \quad (3)$$

经水管段元入口断面 A_i 水体的热能

$$dQ_{w1} = c_w \rho_w T_{w1} q_w dt \quad (4)$$

经水管段元出口断面 A_{i+1} 水体的热能

$$dQ_{w2} = c_w \rho_w T_{w2} q_w dt \quad (5)$$

式中 q_w 、 c_w 和 ρ_w 分别为冷却水的流量、比热和密度, T_{w1} 、 T_{w2} 分别为该水管段的入口和出口水温。

两截面之间水管段元内水体增加或减少的热量为:

$$dQ_w = \int_{l_i}^{l_{i+1}} c_w \rho_w \left(\frac{\partial T_{wp}}{\partial t} dt \right) \cdot A_p dl \quad (6)$$

式中 T_{wp} 为水管内水体的温度, l 为水管沿程坐标, A_p 为水管截面积。由热量平衡条件,得:

$$dQ_{w2} = dQ_{w1} + dQ_c - dQ_w \quad (7)$$

将式(3)-(6)代入式(7),并根据水管段元的水温增量 $\Delta T_{wi} = T_{w2} - T_{w1}$ 可得:

$$\Delta T_{wi} = \frac{-\lambda}{c_w \rho_w q_w} + \iint_{\Gamma^0} \frac{\partial T}{\partial n} ds + \frac{A_p}{q_w} \int_{l_i}^{l_{i+1}} \frac{\partial T_{wp}}{\partial t} dl \quad (8)$$

考虑到水管内水体体积很小,且在一个迭代步的通气时段内水管段元内的水体温度沿程变化也不大,上式可简化成

$$\Delta T_{wi} = \frac{-\lambda}{c_w \rho_w q_w} \iint_{\Gamma^0} \frac{\partial T}{\partial n} ds \quad (9)$$

计算时,曲面积分 $\iint_{\Gamma^0} \frac{\partial T}{\partial n} ds$ 可沿冷却水管外缘面作高斯数值积分求得。

由于冷却水的入口温度已知,利用公式(9),对每一根冷却水管沿水流方向可以逐段推求沿程水温。设某根冷却水管共分为 m 段,入口水温为 T_{w0} ,第 i 段内水温增量为 $\Delta T_{wi}^{[3]}$,则有

$$T_{wi} = T_{w0} + \sum_{j=1}^i \Delta T_{wj} \quad i=1,2,3,\dots,m \quad (10)$$

式中 T_{wi} 为上述第 i 水管段元截面 $i+1$ 处的温度。

“水管冷却问题”是一个边界非线性问题,式(9)的计算与温度梯度 T/n 有关,温度场无法一步求出,必须采用迭代解法逐步逼近真解^[5]。开始计算时假定整个冷却水管的沿程水温

均等于冷却水管的入口温度,利用隐式时间差分法式(2),先求得整体温度场的近似解,再用式(9)和(10)求得计算域内所有水管水体的沿程水温。重复上述过程,直到混凝土温度和冷却水温的解得到收敛,迭代结束。计算精度控制准则可简单地取为

$$\max(|T^k_{wi} - T^{k+1}_{wi}|) < \varepsilon \quad i=1,2,\dots,m; \varepsilon > 0 \quad (11)$$

式中 k 为迭代次数, ε 为事先给定允许误差小值。须指出的是,笔者近来获悉文献[6]已提出了这一迭代过程的改进解法。同时顺便指出,因事先无法知道水管沿程水温以及水管周围混凝土的热学参数是随混凝土龄期而变化的,文献[6]的子结构解法并不能真正适用于混凝土水管冷却温度场问题的求解。

2 混凝土水管冷却现场试验

2.1 实验概况

以淮河入海水道二河新闸第V联中墩为试验模型,考察水管冷却混凝土温度场精确算法的正确性。冷却水管及5个温度测点布置见图2。

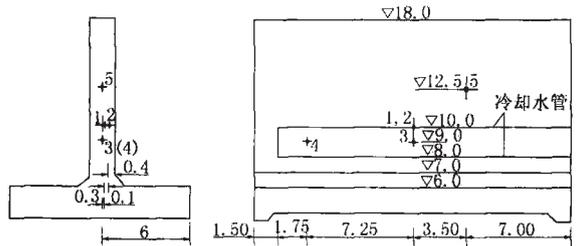


图2 冷却水管及温度测点布置示意(单位 m)

闸墩采用 C25 现浇混凝土。混凝土绝热温升:

$$\theta = \begin{cases} 0, & \tau \leq 0.5 \\ 34.50(\tau - 0.5)^{1.325} / (2.372 + (\tau - 0.5)^{1.325}), & \tau > 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

式中, τ 为混凝土龄期, d 。

采用竹胶模板,表面散热系数 $\beta = 17.086$,裸露表面采用草袋覆膜养护,此处 $\beta = 9.40$ 。中墩浇筑日期为 2002 年 5 月 30 至 2002 年 6 月 2 日。当地年平均气温如表 1 所示。为了方便起见,计算时外界环境平均气温用下式确定

$$T_a = 14.075 + 12.882 \times \cos\left[\frac{\pi}{6}(m - 7.192)\right] \quad (13)$$

式中 m 为月份。

考虑气温日变化,采用式:

$$T_a^d = T_a + A \cos\left[\frac{\pi}{24}(h - 14.0)\right] \quad (14)$$

式中 h 为 1 天中的时刻, A 是气温日变化幅度,根据地区和季节不同而变,由于缺乏资料,本次计算简单地统一取 5°C 。

冷却水管采用内径为 5.00 cm、外径为 5.60 cm 的钢管,通水 5 d,通水方案为 2002 年 5 月 3 日 9:00 至 10:30 第一次通

表 1 当地年平均气温

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年平均
气温/ $^\circ\text{C}$	1.3	2.3	6.5	12.8	19.3	24.5	26.9	25.3	21.6	18.0	8.8	3.6	14.08

水,2002年5月31日11:40至6月1日18:20第二次通水,2002年6月1日19:50至6月2日22:20第三次通水,2002年6月2日22:54至6月5日11:30第四次通水。冷却水采用地下水,水温约为 18°C ,通水流量为 $11.5\text{ m}^3/\text{h}$ 。

2.2 试验步骤

(1)在支模时布置并固定好冷却水管和温度测点,浇筑混凝土。

(2)每隔一定的时间对各温度测点测温一次,并记录。通水时每2h测温一次,不通水时每6h记录一次。混凝土龄期较大时测量时间间隔适当延长。

(3)利用上述三维水管冷却计算方法进行数值仿真计算,并和实测温度进行对比分析研究。

2.3 试验结果分析

水管冷却时,部分温度测点实测温度和计算温度的比较见图3,由图3可知,计算预测结果与实测过程线的曲线走势和具体值大小基本一致,证明笔者这一关于水管冷却的三维模拟计算算法是准确有效的。

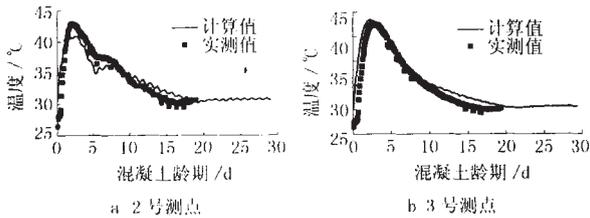


图3 实测温度和计算温度的比较

为了考察冷却效果,同时对水管冷却和自然冷却计算中墩的温度场的部分计算结果进行比较(见图4)。从冷却效果来看,冷却水管对水管四周约 1.5 m 范围内的混凝土水化热形成的温度峰值降低明显;对 1.5 m 之外的混凝土削峰效果则不太明显,这一方面是由于混凝土为传热不良导体,另一方面也与冷却水温和混凝土浇筑温度的差距小以及通水冷却时间较短有关。就冷却水管降低浇筑层的平均温度而言,笔者认为效果是非常显著的。

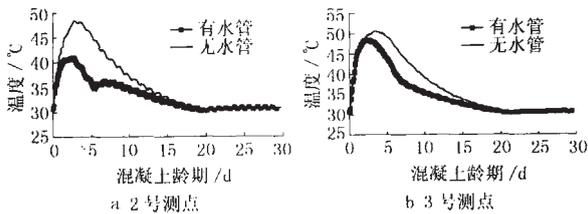


图4 有、无水管情况下各测点温度变化比较

3 华光潭拱坝温控研究

浙江华光潭双曲拱坝坝高为 103.85 m ,坝顶宽为 5.80 m ,最大坝厚为 18.88 m ,拱冠梁底厚为 17.49 m ,顶拱中心线弧长为 227.90 m 。由于坝体比较薄,对环境温度的变化比较敏感,温控防裂问题较突出。精确仿真计算提出恰当的温控标准和

相应措施并指导施工,是保证工程施工质量和进度的重要举措之一。

仿真分析采用“生死薄单元”模拟分期封拱,即在坝体横缝处布置接缝薄单元,在封拱前,这些薄单元的力学参数取为极小值,不起传力作用,封拱后将这些参数还原为混凝土材料对应值,封拱高程以下坝体视为整体结构。在环境温度一定的条件下,坝体混凝土的温度主要是由混凝土的水化热、浇筑温度和冷却水管水温共同控制。

(1)不同通水时间的冷却效果不同,通水时间越长,温度越低。但通水时间太长,混凝土内部降温会过大,在局部区域会产生过大的拉应力。

(2)相对来说,冷却水温低,冷却效果好,但水温太低水管附近温度梯度过大,有可能在水管附近产生过大的拉应力,导致坝体内部先开裂。

(3)管距越小,冷却效果也越好,但管距越小,水管耗材就越大。

基于以上原因,在实际的工程中,水管的层距应结合施工层厚或浇筑层厚度来考虑。考虑到浇筑仓面散热的影响,水管的层距一般应大于间距,在华光潭拱坝中,经计算分析建议水管层的间距和管距取为 2.0 m 和 1.5 m 。在通水期间,距水管越近,温度梯度越大,特别在通水初期,水管附近混凝土温度梯度可能会很大,这会使水管表面混凝土产生不利的拉应力,甚至是过大的拉应力。

经计算,在华光潭工程水管一期冷却时,冷却水温不应低于 $12\sim 13^{\circ}\text{C}$ 。最好能够在不同的时间变换冷却水温,确保水管附近混凝土不裂的前提下,达到最佳的导热降温效果。在水管冷却和表面有散热降温的作用下,整个坝体的温度表现为内部水管区和外部表面区的温度较低,除水管附近混凝土温度梯度较大外,其他地方温度分布较为均匀,说明水管冷却法明显地减小了坝体的内外温差。

冷却水管水体流动沿程不断吸收热量,沿程水温不断上升。该坝7号坝段通过 15°C 水5d后水管中的水体沿程水温变化的情况见图5,从图中可知,水温每上升 1°C 所需水管长度先小后大,在进水口附近的管首区约为 20 m ,而在水管出口附近的管尾区约为 29 m ,平均约为 24 m 。有水管冷却时坝体施工到2004年6月15日时 $y=0\text{ m}$ 横剖面上的温度分布及为有水管冷却时 $x=0\text{ m}$ 纵剖面上的温度分布见图6。夏季浇筑区无水管冷却时,最高温度较高,达 45.52°C ,内外温差也最大;有水管冷却时,坝体最高温度只有 38.62°C ,两者相差 6.90°C 。

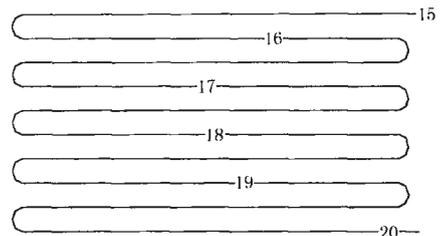


图5 水管水温沿程分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)

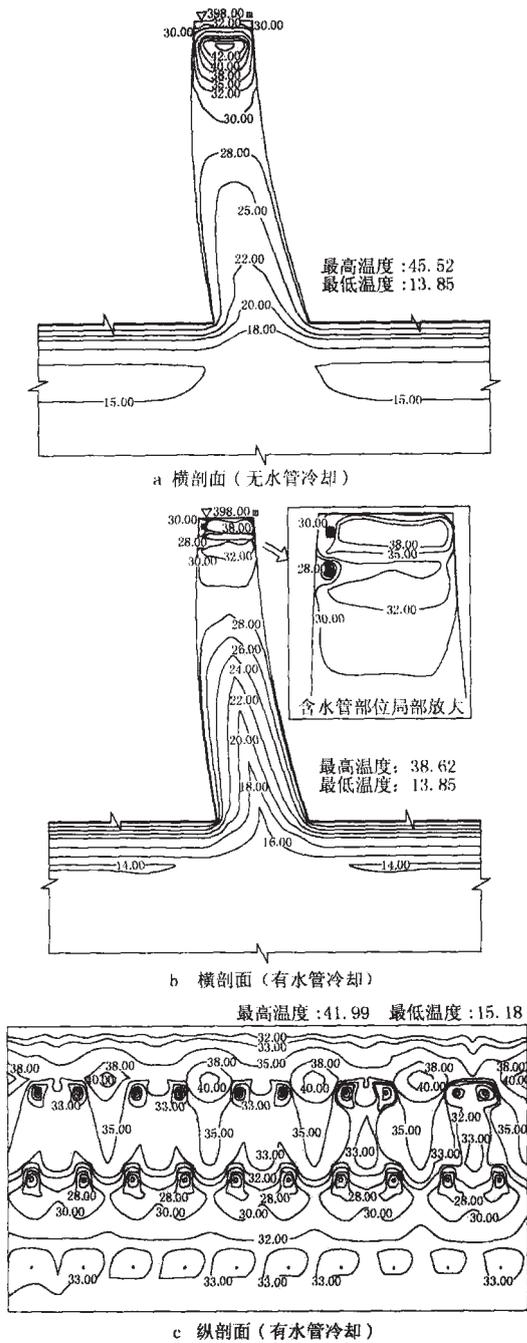


图6 $y=0$ m横剖面及 $x=0$ m纵剖面上的温度分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)

4 结论与建议

(1)在文献[3]的基础上,笔者发展和完善了一种在理论上比较严密的求解水管冷却混凝土温度场的有限元迭代求解方法。数值计算表明,该法不但理论严密,而且迭代计算的效率和精度都很高。

(2)冷却水管能够很好地起到削峰降温,改善应力状态的作用。影响水管冷却效果的主要因素为通水时间、水管层距和管距、水温、管径、流量、通水方向等,该算法均能够在理论上严格模拟这些因素进行温度场的求解,若事先进行精细的计

算论证,就可以给出坝体水管布置的最优方案。

(3)为了提高计算精度,水管周围的单元网格需布置得细密一些,对于大坝,特别是高拱坝工程,仿真计算规模很大,应引入并行计算技术。

参考文献:

- [1] 朱伯芳.考虑水管冷却效果的混凝土等效热传导方程[J].水利学报,1991,(3):28-34.
- [2] 朱伯芳.考虑外界温度影响的水管冷却等效热传导方程[J].水利学报,2003(3):49-54.
- [3] 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.
- [4] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].中国电力出版社,1999.
- [5] 朱岳明,徐之青,贺金仁,等.混凝土水管冷却温度场求解的一种正确算法[J].长江科学院院报,2003,20(4):19-22.
- [6] 刘宁,刘光廷.水管冷却效应的有限元子结构模拟技术[J].水利学报,1997,(12):43-49.

(上接第38页)

5 结论

本文以溪洛渡拱坝左右岸C3块体为例,定量分析了拱坝超载过程中拉裂面受力变化过程,计算并对比分析了超载过程中计入拉裂面抗力与否的块体安全度。结果表明,拱坝在超载过程中,拉裂面存在局部拉坏的情况,出现拉应力的区域分布在靠近河床的部位,且随着加载,受拉区域面积越来越大;计入拉裂面岩体抗拉力后,块体各级加载下的安全度有不同程度的提高;就溪洛渡工程而言,直至超载3倍,左右岸拉裂面仍基本上处于受压状态,这说明,高拱坝拉裂面在正常荷载工况以外很大的安全余幅下,拉裂面提供的岩体抗力是可以利用的。这对高拱坝工程而言具有积极的现实意义。

本文分析没有考虑构造应力。显然,仅就拉裂面提供抗力而言,较大的水平构造应力对稳定是有利的,对滑面提供抗滑阻力也是有益的。

参考文献:

- [1] 朱伯芳,高季章,陈祖煜,厉易生.拱坝设计与研究[M].北京:中国水利水电出版社,2002.
- [2] 杨强,陈新,周维垣.基于D-P准则的三维弹塑性有限元增量计算的有效算法[J].岩土工程学报,2002,24:16-20.
- [3] 杨强,陈新,周维垣,杨若琼.推求拱坝极限承载力的有效算法[J].水利学报,2002,(11):60-65.
- [4] 陈新,杨强,黄岩松,陈欣.基于D-P准则的理想弹塑性材料本构关系积分的渐近解析解——子增量法[J].岩石力学与工程学报,2002,21:2465-2469.
- [5] 杨强,陈新,周维垣.三维弹塑性计算中的不平衡力分析[J].岩土工程学报,2004,26:323-326.
- [6] 潘家铮.溪洛渡电站拱坝设计优化之我见[J].中国三峡建设,2004,(2):4-5.