

考虑渗流热学效应的大坝稳定温度场有限元数值分析

许增光¹,李康宏¹,柴军瑞^{1,2,3},邓祥辉¹,何 杨¹

(1. 西安理工大学水利水电学院,西安 710048; 2. 三峡大学土木水电学院,宜昌 443002;
3. 四川大学水利水电工程学院,成都 610065)

摘 要:在利用有限元法求解二维稳定温度场的基础之上,推求了渗流影响下的二维稳定温度场的有限元计算格式,编写相应程序计算温度场内各节点温度值,最后运用程序对一简单工程算例进行有限元法分析。结果表明,一般情况下,当渗透系数 $K = 10^{-9} \text{ m/s}$ 的时候,可以不考虑渗流对温度的影响;但是当渗透系数 $K > 10^{-9} \text{ m/s}$ 的时候,就必须考虑渗流对温度的影响。

关键词:渗流;热学效应;温度;有限元;数值分析

中图分类号:TV315;TV139.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-408X(2006)02-0112-04

1 引言

渗流的热学效应分析是水利工程中不可忽略的一部分,特别是在混凝土被大量应用于现代筑坝工程以后,渗流热学效应的分析对工程安全性的影响已越来越明显。通过渗流的热学效应分析,可研究介质中温度场受渗流影响的大小,从而得到更接近于实际的温度分布,进而采取相应措施,以确保工程的安全^[1~2]。近些年来关于渗流对温度的影响问题已做了不少的工作,文献[1]中以考虑渗流的一维导热方程的解析解为基础,分析了坝体渗流随坝高、水头、渗透系数的变化对坝体稳定温度场的影响;文献[3]中阐述了混凝土坝渗流对温度场影响的机理,并得出了渗流影响下的温度场数学模型;等等。

本文试图从连续介质中渗流影响下的温度场数学模型出发,借助有限单元法,对渗流影响下的二维

稳定温度场的分布状况作初步的研究,以便探索渗流对温度场分布的影响大小,从而为分析非稳定的状况奠定一定的基础。

2 考虑渗流影响的稳定温度场有限元数值求解步骤

2.1 求解二维稳定渗流场

假设介质渗透特性各向同性,根据二维稳定渗流场数学模型,认为三角形单元水头函数为线性多项式,并应用达西定律便可得流速 x, y 的表达式^[4]。

2.2 求解不考虑渗流影响的二维稳定温度场

假设介质传热特性各向同性,根据二维稳定温度场数学模型,同样认为三角形单元温度函数为线性多项式,易得温度 T 对 x, y 的偏导数表达式^[1]。

2.3 求解考虑渗流影响的二维稳定温度场

渗流影响下的二维稳定温度场数学模型为^[5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial T}{\partial y} \right] - c_w w \left[\frac{\partial (-xT)}{\partial x} + \frac{\partial (-yT)}{\partial y} \right] = 0 \quad (1)$$

式中的 λ 为导热系数, c_w 为水的比热, w 为水的密度。

2.3.1 求解 $-c_w w \left[\frac{\partial (-xT)}{\partial x} + \frac{\partial (-yT)}{\partial y} \right]$

将上面所求的稳定渗流场的流速 x, y 与不考

虑渗流影响的温度 T 对 x, y 的偏导数代入所求关系式得:

收稿日期:2005-11-24;修回日期:2006-03-17

基金项目:国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(项目批准号 50579092),教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(2005),湖北省青年杰出人才基金项目(2004ABB012),三峡大学湖北省“楚天学者计划”特聘教授资助项目(603108),三峡大学科技创新团队资助项目(603402),教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(106-220331),西安理工大学科技创新研究计划项目(106-210303,220275),陕西省教育厅自然科学专项研究计划项目(03JK098)

作者简介:许增光(1982-),男,陕西省富平县人,硕士研究生,主要从事水工结构渗流分析研究,E-mail:xzg830124@163.com。

Q = - c_w w [\frac{\partial (\sum x T)}{\partial x} + \frac{\partial (\sum y T)}{\partial y}] = \frac{c_w w}{2} [\sum x (b_i T_i + b_j T_j + b_m T_m) + \sum y (c_i T_i + c_j T_j + c_m T_m)] (2)

式中 ———三角形单元面积;
b_i、b_j、b_m、c_i、c_j、c_m ———三角形单元三个顶点坐标的表达式^[4]。

容易得知, Q 对于任一单元 e 来说为一个常数。

2.3.2 求解考虑渗流时的二维稳定温度场

将 Q 看成源汇项,推求渗流影响下的二维稳定温度场的有限元计算格式。本文在已有的二维稳定渗流场三角形单元有限元计算程序^[6]的基础之上,按推求的考虑渗流影响的二维稳定温度场的有限元计算格式,编写相应程序计算研究区域内各节点温度值。

3 算例分析

3.1 计算模型、网格划分与边界条件

计算模型和网格划分如图 1,该研究区域被划分为 93 个节点,142 个三角形单元。

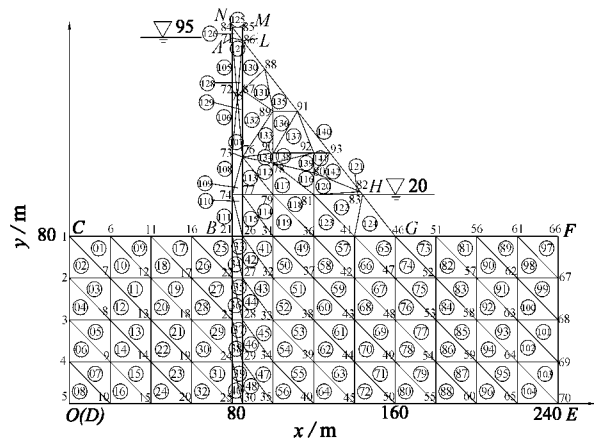


图 1 坝基与坝体的三角形单元剖分图

渗流边界条件:坝高 100 m,坝底宽 80 m,坝顶宽 5 m,下游坝坡 1 0.8,坝基宽取 240 m、深取 80 m,水头 H_{ABC} = 95 m, H_{HGF} = 20 m,在靠近上游坝坡面 5 m 处设排水管,一直延伸到坝基 20 m 处,并根据经验假设排水管处水头折减为上游水头的 40 %, CDEF 面为隔水边界,其余各点水头未知。

温度边界条件: T_{BC} = 10 , T_{GF} = 18 ,坝顶及下游坝坡表面温度等于气温,取 25 ,上游坝面温度沿水深逐渐降低, T₇₂ = 17 、 T₇₃ = 14 、 T₇₄ = 12 , T₇₁ = T₈₃ = 20 (上、下游水位与坝面的交汇处), CDEF 面为绝热面,其余各点温度未知。

3.2 稳定渗流场计算

首先由水力学^[5]得出浸润线的初始位置为: 78 点坐标为 (100, 114. 64), 80 点坐标为 (120, 109. 57), 逸出点坐标为 (141. 76, 102. 80), 排水管以上部分近似认为是线性的, 其次再采用有限元法^[7]经迭代运算确定最终浸润线与各节点水头。计算区域为坝基和坝体浸润线以下的部分, 如图 1, 共可分为 83 个节点, 124 个三角形单元, 最终得出浸润线上 78 点坐标为 (100, 115. 435 2), 80 点坐标为 (120, 110. 998 5), 逸出点坐标为 (143. 04, 101. 203 8), 同时绘出稳定渗流场等水头线见图 2。

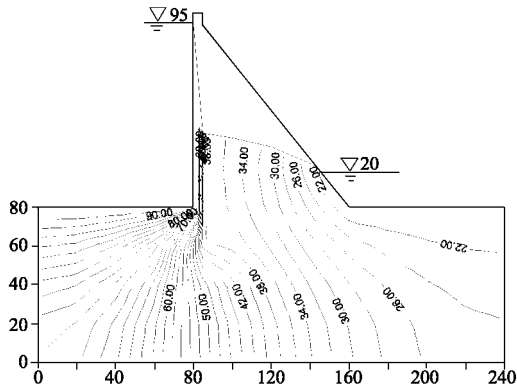


图 2 稳定渗流场等水头线图 (单位: m)

3.3 不考虑渗流影响的稳定温度场计算

研究区域包括坝基和坝体的整个区域, 如图 1, 将整个区域划分为 93 个节点, 142 个三角形单元, 易得不考虑渗流影响的稳定温度场等温线见图 3。

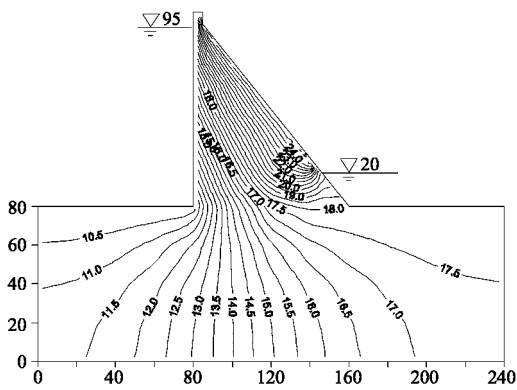


图 3 不考虑渗流影响时的稳定温度场等温线图 (单位:)

3.4 渗流影响下的稳定温度场计算

求解渗流影响下的稳定温度场与不考虑渗流影

响的稳定温度场的研究区域相同,所以单元划分完全相同,边界条件也相同。计算中所用到的水头值为稳定渗流场的计算结果。用到的其他参数取工程中的常用值:水的比热 $c_w = 4.1868 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 水的密度 $\rho_w = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, 导热系数 $\lambda = 2.575 \times 10^{-3} \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$, 渗透系数 $K = 10^{-8}, 10^{-9}, 10^{-10} \text{ m/s}$ 。

通过计算得渗透系数 K 分别为 $10^{-8}, 10^{-9}, 10^{-10} \text{ m/s}$ 影响下的稳定温度场等温线,见图 4、图 5、图 6。

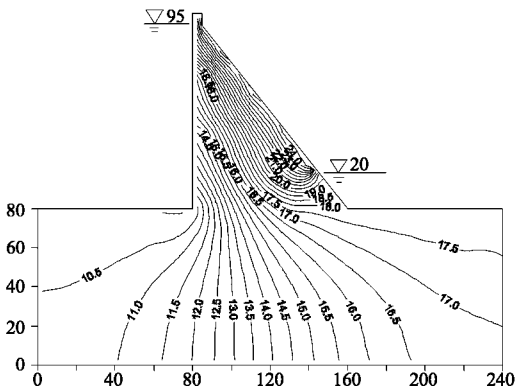


图 4 渗透系数 $K = 10^{-8} \text{ m/s}$ 时的温度场等温线图 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

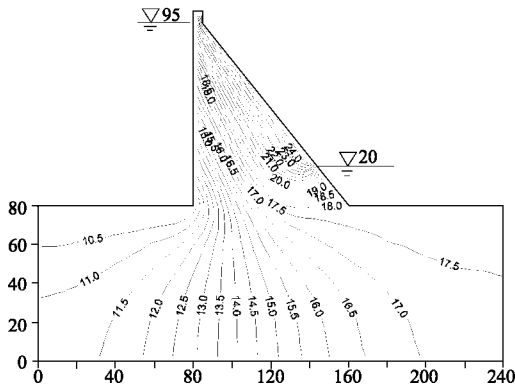


图 5 渗透系数 $K = 10^{-9} \text{ m/s}$ 时的温度场等温线图 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

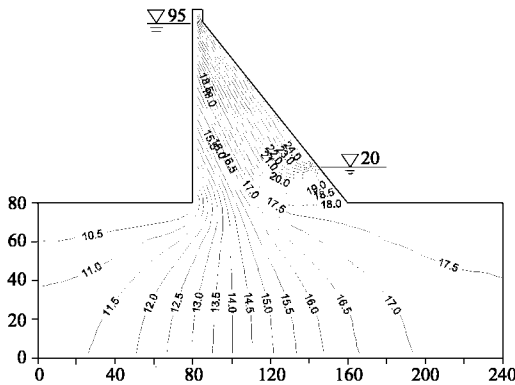


图 6 渗透系数 $K = 10^{-10} \text{ m/s}$ 时的温度场等温线图 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

计算考虑渗流影响下的稳定温度场的各节点温度值与不考虑渗流影响下的稳定温度场的各节点温度值二者的差值,绘制不同渗透系数影响下的各节点温度值与不考虑渗流影响下的各节点温度值的温度差等值线图,分别见图 7、图 8、图 9。

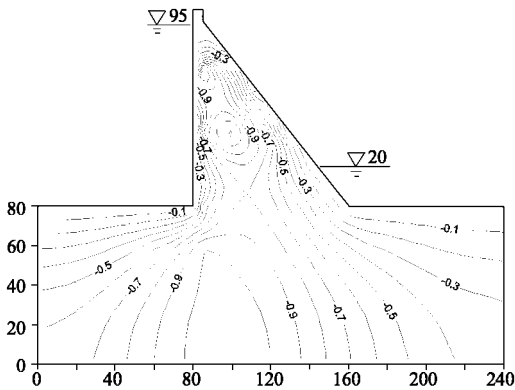


图 7 渗透系数 $K = 10^{-8} \text{ m/s}$ 时与不考虑渗流影响时的温度差等值线图 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

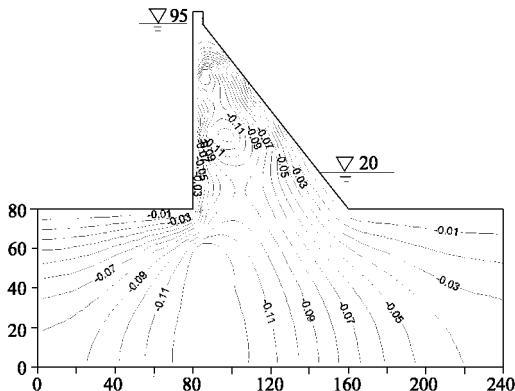


图 8 渗透系数 $K = 10^{-9} \text{ m/s}$ 时与不考虑渗流影响时的温度差等值线图 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

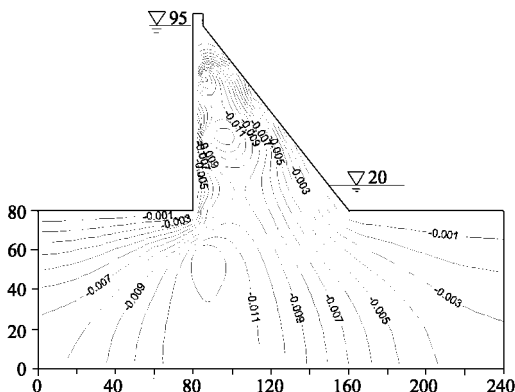


图 9 渗透系数 $K = 10^{-10} \text{ m/s}$ 时与不考虑渗流影响时的温度差等值线图 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

3.5 计算结果分析

比较图 4、图 5、图 6 与图 3,由于水流从低温向高温流动,会带走介质中的一部分热量,所以考虑渗流时的温度场温度会普遍偏低一些。如图 7,当渗透系数 $K = 10^{-8}$ m/s 时,温度场最大偏低 1.22 (相对不考虑渗流影响的温度场而言,下同),约低了 7.1% (指占考虑渗流影响时相应节点温度的百分数,下同);如图 8,当渗透系数 $K = 10^{-9}$ m/s 时,温度场最大偏低 0.14,约低了 0.7%;如图 9,当渗透系数 $K = 10^{-10}$ m/s 时,温度场最大偏低仅 0.01,约低了 0.1% 左右。可见渗透系数越大,介质中的渗流量就越大,从而各节点温度值与不考虑渗流时各节点温度值的差值就越大。因此,一般情况下,当渗透系数 $K = 10^{-9}$ m/s 的时候,可以不考虑渗流对温度的影响,但是当渗透系数 $K > 10^{-9}$ m/s 的时候,就要考虑渗流对温度场的影响。从图 7、图 8、图 9 中均可以看出,由于排水管处的水流梯度比较大,即流速比较大,故在排水管处渗流对温度的影响偏大一些。

4 结论

本文主要是针对渗流对温度场的影响作用进行了初步的分析与计算,并引入算例进行了验证。由算例可得出以下结论:

(1) 从考虑渗流与不考虑渗流时的温度场分布可以得出,水流从低温向高温流动时,考虑渗流的温

度场温度普遍偏低;

(2) 从考虑不同渗透系数与不考虑渗流的温度场的温度差值可以得出,当渗透系数越大时,各节点温度值与不考虑渗流时各节点温度值的差值就越大;

(3) 由排水管处渗流对温度的影响普遍偏大可以得出,渗流对温度的影响大小最终是由流速的大小来决定的;

(4) 从渗流影响下的稳定温度场数学模型出发,讨论温度场内温度分布状况,能更加准确地反映实际工程的温度分布,结果更接近于实际。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 柴军瑞. 大坝工程渗流力学[M]. 拉萨:西藏人民出版社,2001.
- [3] 柴军瑞. 混凝土坝渗流场与稳定温度场耦合分析的数学模型[J]. 水力发电学报,2000,(1):27-35.
- [4] 毛昶熙. 渗流分析与控制[M]. 北京:中国水利电力出版社,2003.
- [5] 柴军瑞,韩群柱. 岩体渗流场与温度场耦合的连续介质模型[J]. 地下水,1997,19(2):59-62.
- [6] 杜延龄,许国安. 渗流分析的有限元法和电网络法[M]. 北京:水利电力出版社,1992.
- [7] Herbert F. Wang, Mary P. Anderson 著,赵君译. 渗流数值模拟导论[M]. 大连:大连理工大学出版社,1988.

Finite Element Numerical Analysis of Steady Temperature Field of Dam Considering Thermal Effect of Seepage

XU Zeng-guang¹, LI Kang-hong¹
CHAI Jun-rui^{1,2,3}, DENG Xiang-hui¹, HE Yang¹

(1. College of Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048;

2. College of Civil and Hydroelectric Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002;

3. College of Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065)

Abstract: Based on the finite element method for solving two-dimensional steady temperature field, the finite element formulations of two-dimensional steady temperature field considering the seepage effect are derived and the corresponding programs are developed to compute the node temperature in temperature field. Finally, the finite element analysis of a case study is illustrated. It has been shown that when permeability coefficient 10^{-9} , seepage effect may not be considered for temperature under normal conditions, but when permeability coefficient $> 10^{-9}$, seepage effect should be considered.

Key words: seepage; thermal effect; temperature; finite element; numerical analysis