

考虑渗流场影响的混凝土坝温度场分析

陈建余¹,朱岳明¹,张建斌²

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098 2.厦门路桥管理公司,福建 厦门 361026)

摘要 从热传导基本原理出发,建立了受渗流场影响的温度场数学模型,给出了有限元求解格式,开发出相应的程序.通过算例,定性分析了渗流场影响温度场的主要因素,定量分析了各因素对温度场的影响.结果表明,水位、渗透性、渗控措施和温差对温度场的影响较大.

关键词 混凝土坝 渗流场 温度场 有限元法

中图分类号:TV315

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2003)02-0119-05

现有混凝土坝工温控分析中通常都不考虑渗流场对温度场的影响.实际上,在温度场计算域中随着水等渗透介质在渗流场中的运移,热量必然要在温度场中迁移.特别是对高水头碾压混凝土坝而言,在水库初期蓄水时,坝体内存在着相对强透水能力的层面和缝面^[1,2],此时渗流场能比较显著地影响温度场及温度应力的分布,研究渗流场对温度场影响的意义显得更为突出.本文从渗流和导热基本原理出发,建立了在渗流场作用下三维非稳定温度场求解的数学模型,推导了有限元求解格式,并编制了相应的计算程序,最后通过算例计算分析了渗流场对碾压混凝土坝和常态混凝土坝温度场影响及影响程度的差异,探讨了渗流场影响温度场的主要因素,证明了考虑渗流场影响对正确求解混凝土坝温度场的重要性.

1 数学模型

当混凝土内部同时存在渗流场和温度场时,内部热量的来源主要包括:(a)混凝土水化热等内部热源产生的热量;(b)水等渗透介质迁移过程中夹带的热量.如图 1 所示,任取微元体 $dx dy dz$,设沿 x 方向流入微元体的热量为 q_x ,流出微元体的热量为 $q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx$.类似地可以假定沿 y 及 z 方向流入及流出的热量.根据热传导理论^[3],微元体在单位时间内净流入热量和内部热源之和等于微元体内能增量.由此得

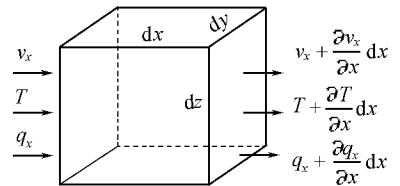


图 1 渗流作用下微元体热量流动模型

Fig.1 Model of heat flow in micro-element under seepage

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) + c\rho \frac{\partial \theta}{\partial \tau} dx dy dz = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (1)$$

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} = \left[\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - c_m \rho_m \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + T \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \right] dx dy dz \quad (2)$$

$$-\frac{\partial q_y}{\partial y} = \left[\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - c_m \rho_m \left(v_y \frac{\partial T}{\partial y} + T \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right] dx dy dz \quad (3)$$

$$-\frac{\partial q_z}{\partial z} = \left[\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - c_m \rho_m \left(v_z \frac{\partial T}{\partial z} + T \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (4)$$

式中: c_m, ρ_m ——渗透介质的比热容、密度; c, ρ ——混凝土的比热容、密度; v_x, v_y, v_z ——渗流速度; λ, θ ——混凝土导热系数和绝热温升.由此可得渗流场作用下的温度场导热方程

$$\alpha \nabla^2 T - b \left[v \cdot \nabla T + T \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

式中： α ——混凝土导温系数， $\alpha = \lambda / (c\rho)$ ； b ——渗透介质与混凝土的热容量比值， $b = c_m \rho_m / (c\rho)$ ； ∇ ——拉普拉斯算子。若令 $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0, \frac{\partial T}{\partial t} = 0$ ，则可得渗流场影响下的稳定温度场导热方程

$$\alpha \nabla^2 T - b \left[v \cdot \nabla T + T \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] = 0 \tag{6}$$

2 模型求解

在求解渗流场作用下温度场分布时需先求解坝体及坝基渗流场分布，在此假定渗流场已知，且渗流场与温度场求解采用同一网格，根据相关渗流及温度场计算理论^[4,5]可知

$$-v \cdot \nabla T = k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \frac{\partial T}{\partial x_i} - T \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = Tk_{ij} \frac{\partial^2 h}{\partial x_i \partial x_j} \tag{7}$$

将式(7)代入式(5)即可得渗流场影响下的温度场求解方程

$$\alpha \nabla^2 T + b_1 \frac{\partial T}{\partial x} + b_2 \frac{\partial T}{\partial y} + b_3 \frac{\partial T}{\partial z} + c_1 T + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial T}{\partial t} \tag{8}$$

$$b_i = bk_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad c_1 = bk_{ij} \frac{\partial^2 h}{\partial x_i \partial x_j} \tag{9}$$

已知条件 $h = h(x, y, z, t)$

温度场初始条件 $T = T_0(x, y, z)$

边界条件 $\Gamma^1: T = T_b \quad \Gamma^2: \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad \Gamma^3: -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_a)$

式中： T_b ——已知边界温度； T_a ——环境温度； β ——混凝土表面放热系数。

对方程(8)用 Galerkin 加权余量法^[6]，以形函数 $N_i (i = 1, \dots, 8)$ 为权函数，可得

$$\iiint_{\Omega} N_i \left[\nabla^2 T + \left(\frac{b_1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{b_2}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{b_3}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{c}{\alpha} T + \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \frac{\partial T}{\partial t} \right) \right] dx dy dz - \iint_{\Gamma^3} \frac{\partial T}{\partial n} N_i ds = 0 \tag{10}$$

在三维空间域进行有限元离散，在时间域采用向后差分进行离散，可得渗流场影响下的温度场有限元求解方程

$$\left(L + P + C + \frac{2}{\Delta t} G \right) T_{t+\Delta t} + \left(L + P + C - \frac{2}{\Delta t} G \right) T_t + F_{t+\Delta t} + F_t = 0 \tag{11}$$

求解稳定温度场时，式(11)变为

$$(L + P + C) T = 0 \tag{12}$$

式中 T 为未知温度节点列阵；

$$L_{ij} = \sum_e l_{ij} \quad l_{ij} = \iiint_{\Omega} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dx dy dz + \frac{\beta}{\lambda} \iint_{\Gamma^3} N_i N_j ds$$

$$P_{ij} = \sum_e p_{ij} \quad p_{ij} = -\frac{1}{\alpha} \iiint_{\Omega} N_i \left(b_1 \frac{\partial N_j}{\partial x} + b_2 \frac{\partial N_j}{\partial y} + b_3 \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dx dy dz$$

$$G_{ij} = \sum_e g_{ij} \quad g_{ij} = -\frac{1}{\alpha} \iiint_{\Omega} N_i N_j dx dy dz$$

$$C_{ij} = \sum_e c_{ij} \quad c_{ij} = -\frac{1}{\alpha} \iiint_{\Omega} c N_i N_j dx dy dz$$

$$F_{ij} = \sum_e f_{ij} \quad f_{ij} = -\frac{1}{\alpha} \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial \theta}{\partial \tau} dx dy dz - \frac{\beta}{\lambda} \iint_{\Gamma^3} N_i T_a ds$$

3 算例

以某一稳定温度场为例^[7]，取某一实际工程典型混凝土挡水坝段，混凝土密度 $\rho_c = 2\,400 \text{ kg/m}^3$ ，导温系数 $\alpha = 0.004 \text{ m}^2/\text{h}$ ，比热容 $c = 0.97 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，水的比热容 $c_m = 4.19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，水的密度 $\rho_m = 1\,000 \text{ kg/m}^3$ 。坝上游水头 $H_1 = 375.0 \text{ m}$ ，下游水头 $H_2 = 256.0 \text{ m}$ 。坝体下游面取当地多年年平均气温 20.1°C ，考虑日照辐射

升温,上游水温按不同深度取多年年平均水温,参照文献[2]进行估算,下游取河水多年年平均水温 21.0℃,坝基部分取为绝热边界. 为了比较渗流场对碾压混凝土坝和常态混凝土坝影响的大小,计算中调整坝体渗透系数,考虑坝体排水和不排水,共计算了 9 种工况. 结果如表 1 所示.

表 1 渗流场对稳定温度场影响的计算工况及结果
Table 1 Stable temperature field under seepage calculated for different cases

工况	坝型	排水	渗透系数/(cm·s ⁻¹)			最大降温/℃	
			坝基	坝体(水平)	坝体(竖直)	坝体	坝基
1	碾压	有	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁹	6.22	9.02
2	碾压	有	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻¹⁰	3.10	4.15
3	碾压	有	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻¹⁰	1.50	3.90
4	碾压	无	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁹	3.90	6.60
5	碾压	无	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻¹⁰	2.95	5.01
6	常态	有	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁹	1.0×10 ⁻⁹	0.70	3.50
7	常态	有	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻¹⁰	1.0×10 ⁻¹⁰	0.40	2.82
8	常态	无	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁹	1.0×10 ⁻⁹	1.50	6.00
9	常态	无	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻¹⁰	1.0×10 ⁻¹⁰	0.90	3.98

图 2 分别为工况 3,5,6,8 渗流场等水头线,图 3 分别为工况 2,3,4,6 考虑渗流场影响的稳定温度场降温等值线. 所有工况渗流场作用下稳定温度场降温计算结果如表 1 所示.

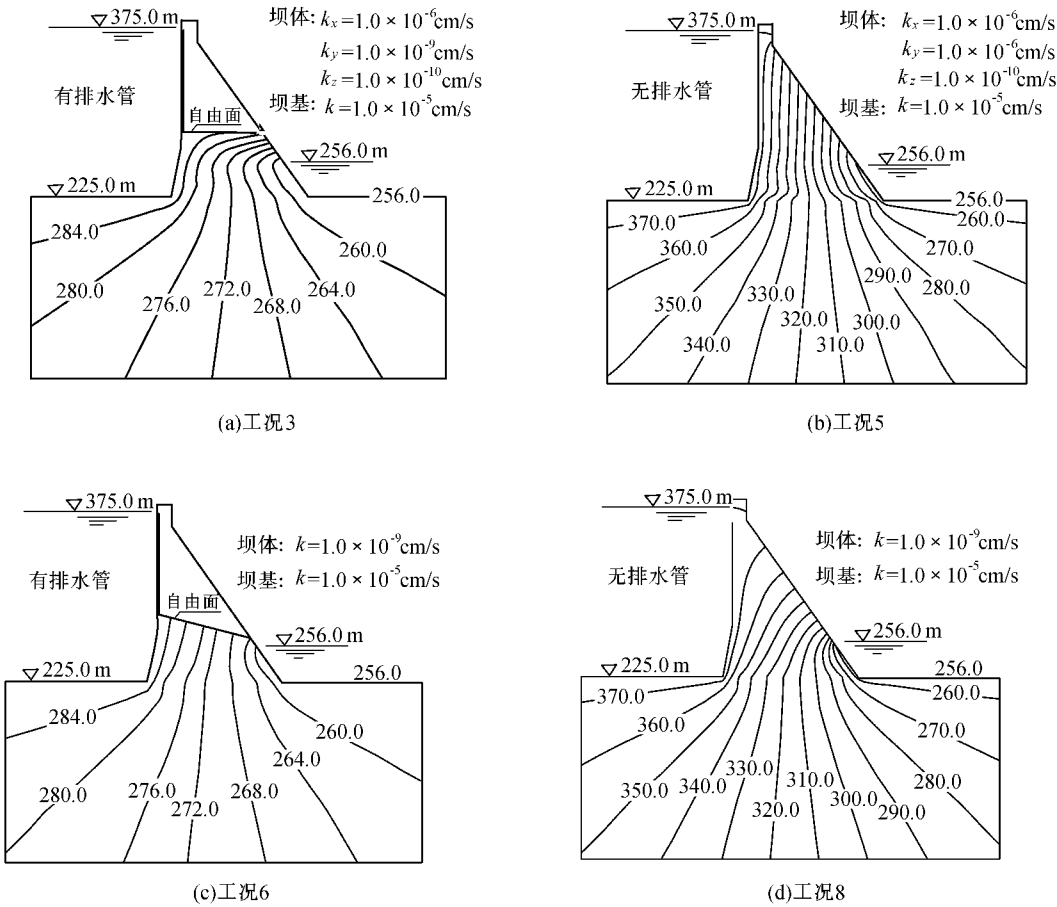


图 2 渗流场等水头线分布(单位 m)
Fig.2 Distribution of seepage hydraulic head isoline(unit m)

计算结果表明:(a) 渗流场对温度场的影响主要在坝体浸润面以下的饱和区,这是因为渗透水流的运动引起了坝体内热量的迁移;(b) 无排水设施时,坝体浸润面更高,渗流场对温度场的影响加剧;(c) 在渗流场对

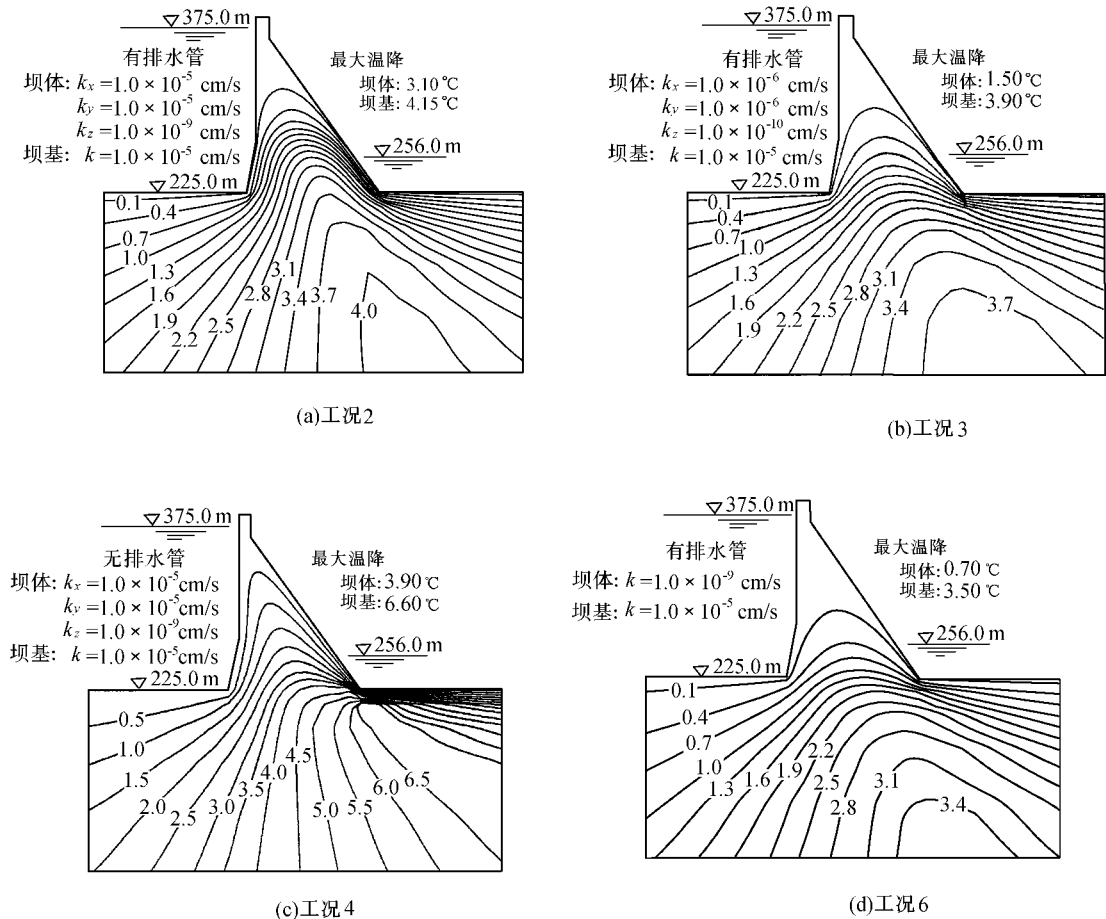


图 3 降温等值线分布(单位: °C)

Fig.3 Distribution of temperature decrease isoline(unit: °C)

温度场作用的过程中,坝基及坝体渗透特性有着显著的影响,由于碾压混凝土和常态混凝土在渗透特性上有明显差异,碾压混凝土坝中渗流场对温度场的影响更大;(d)上游坝踵及下游坝趾区温降梯度较其他区域更大,从正确计算温度应力角度出发,更需要考虑渗流场对温度场的作用;(e)一般水位、渗透性和温差,在渗流场对温度场的作用中影响较大。

4 结 论

- a. 由于渗透介质在渗流场中的迁移引起热量的交换,所以渗流场的作用会引起温度场及相应温度应力场的改变。
- b. 对于混凝土坝,影响渗流场对温度场作用的主要因素是水位、渗透系数张量、坝体防渗措施及坝体与渗透介质温差.和常态混凝土坝相比,碾压混凝土坝温度场更易受渗流场的影响。
- c. 本文建立的渗流场影响温度场的数学模型科学严密,开发的相应计算程序可以应用于类似工程问题的求解。
- d. 本文算例从验证数学模型和计算方法的正确性出发,只考虑了渗流场对稳定温度场的影响,实际工程则可能需要考虑非恒定流对非稳定温度场的影响等复杂情况。

参考文献:

[1] 刘浩吾. 混凝土坝动水压力与库水可压缩性效应[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(2): 10—13.

[2] 朱岳明, 张贵寿, 徐惠民. 长江三峡碾压混凝土坝方案坝段渗控特性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(2): 1—6.

[3] 张洪剂. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992. 150—187.

[4] 朱岳明,张燎军.渗流场求解的改进排水子结构法[J].岩土工程学报,1997,(2) 69—76.
[5] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京 水利电力出版社,1990.27—34.
[6] 王勖成,劝敏.有限单元法原理[M].北京 清华大学出版社,1995.11—25.
[7] 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.

Temperature fields in concrete dams with consideration of seepage fields

CHEN Jian-yu¹, ZHU Yue-ming¹, ZHANG Jian-bin²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. Xiamen Road & Bridge Management Company, Xiamen 361026, China)

Abstract : On the basis of the basic principle of thermal conduction, a mathematical model was developed for calculation of the influences of seepage fields on the temperature distribution in concrete dams, and relevant equations for finite element calculation were derived with corresponding programs developed. By some computational examples, the main factors influencing temperature fields were qualitatively analyzed, and the inflence of each factor was quantitatively analyzed. It is concluded that the water level, permeability, measures for seepage control, and temperature difference are of obvious effect on temperature fields.

Key words : concrete dam ; seepage field ; temperature field ; finite element method

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登本校在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

本刊创办于 1957 年,是我国中文核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种自然科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并获得全国优秀高校自然科学学报二等奖,以及中国期刊方阵‘双效期刊’、全国水利系统优秀期刊称号。

本刊每逢单月出版,国内外公开发行。邮发代号 28-63,每期定价 3.00 元,全年订费 48.00 元。欢迎广大读者在全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系。联系地址:南京市西康路 1 号《河海大学学报(自然科学版)》编辑部,邮政编码 210098。