

文章编号:0559-9350(2010)06-0703-08

## 坝址温度场与变物性渗流场全耦合分析

吴志伟, 宋汉周

(河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:在只考虑流体性质受温度的影响条件下,根据多孔介质渗透系数与温度之间存在的线性关系,利用相关数据,分析了渗流场对温度较为敏感的敏感性。从温度变化引起水的密度和黏度的变化来考虑温度场对渗流场的影响,建立了温度场和变物性渗流场的瞬态全耦合数学模型,并初步探讨了这种全耦合模型的求解思路。采用FEMLAB软件,在原有模型的基础上做了二次开发,从而实现了该全耦合问题的有限元求解。通过工程实例,对所建的坝址温度场与变物性渗流场全耦合模型做了数值验证。计算结果表明,采用全耦合模型求解渗流问题时,坝址区温度升高,渗流流速普遍降低;温度场变动比较小,而渗流场变动相对大一些。

关键词:坝址温度场和渗流场;变物性;耦合;数值模拟;FEMLAB

中图分类号:TV148

文献标识码:A

## 1 研究背景

在坝址区,温度场受渗流控制,温度场与渗流场具有相似性,等温线与等势线同样受到岩体透水性、建基面形态及帷幕体的防渗性等多方面影响。对渗流部位温度场的监测,有助于揭示坝址各处的实际渗流状况<sup>[1]</sup>。通过温度示踪探测地下水运动在实践中已有许多运用<sup>[2-4]</sup>,一些模拟地质体中热量运移的计算软件相继问世,如VS2DH<sup>[5]</sup>、HST3D<sup>[6]</sup>和SUTRA等,这些软件是基于流体运动引起热量对流扩散来模拟实际问题,都是假设流体物理性质不随温度而改变。

事实上,温度场与渗流场是相互影响的。一方面,势能差引起渗流流体在介质的孔隙中扩散和流动,流体作为热能传播的媒介,在介质中携带热能沿运动迹线进行交换和扩散。另一方面,进入坝址地下水系统的水流大多来自水库底部的低温水,其水温远低于地温,这种低温高密度的库水处于上部,而高温低密度的地下水处于下部,这种密度差异在自重的影响下将形成自然对流,对此难以用传统的地下水动力学理论加以刻画。此外,温度变化对流体的黏度影响最为明显,而渗透系数也不是单纯受固相介质及其结构的影响,流体性质也是一个重要因素。流体密度和黏度都是温度的函数,渗透系数也是温度的函数。总之,渗流和温度相互影响的过程实际上包括了能量平衡和耗散过程,以及媒介物质发生理化反应等过程,二者的作用是一种耦合关系。

国内对温度场与渗流场的耦合研究,首先是对地下介质做连续性假设,得到渗流场与稳定温度场耦合分析的连续介质数学模型<sup>[7]</sup>,通过水温对水的运动黏滞系数影响,温度差形成的温度势梯度造成水的流动及渗流传热三个方面将两场耦合起来,采用迭代法得到两场耦合的数值解。赖远明等<sup>[8]</sup>研究了寒区大坝温度场与渗流场的关系,并推导了全场耦合计算的有限元公式;许增光等<sup>[9]</sup>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。Yu-shu Wu等<sup>[10]</sup>对裂隙介质中非饱和热流耦合模型做了探讨。

现有的研究多数还是单一考虑渗流引起的对流传热,全场耦合时流体物理性质保持不变,渗透系数

收稿日期:2009-03-10

作者简介:吴志伟(1985-),男,河南信阳人,硕士生,主要从事地下水、应用地球物理探测研究。E-mail:wzw85@126.com

一般假设为常数。这与实际情况存在一定的偏差,因此应该寻求建立反映二者相互作用的实时全耦合模型。在温度场与渗流场耦合计算中,通常把不考虑密度和黏度等流体物理性质随温度而变的计算称常物性耦合,把流体密度和黏度因温度而变的计算称变物性(Variable Properties)耦合。本文从温度变化引起水的密度和黏度的变化来考虑温度场对渗流场的影响,建立温度场和变物性渗流场的瞬态全耦合数学模型,并借助 FEMLAB 软件,在二次开发的基础上,实现该全耦合问题的有限元求解,最后应用工程实例对所建模型进行分析验证。

## 2 常态水物理性质的热学效应

常态水的密度和黏度是受温度影响较为显著的两个物理指标。其微观机理是水具有热膨胀性,因此水的密度总体上随着温度的升高逐渐降低;同时温度的升高也使得水分子的分子动能增大,分子间引力减小,从而流体的黏度明显降低。浅部地下水的温度多在 0~40℃ 之间,在该区间内常态水的密度及动力黏滞系数的变化(Weast<sup>[11]</sup>,1982)如图 1 所示。

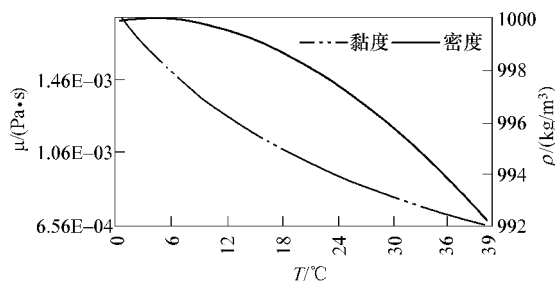


图 1 常态水密度及动力黏滞系数与温度的关系<sup>[11]</sup>

应用多项式拟合的方法,得到常态水的动力黏滞系数及密度与温度满足如下关系:

$$\mu(T) = 0.001 \times (1.7920 - 0.0620T + 0.0017T^2 - 3.5481 \times 10^{-5}T^3 + 5.9912 \times 10^{-7}T^4 - 3.0042 \times 10^{-9}T^5) \quad (1)$$

$$\rho(T) = -0.0088T^2 + 0.0851T + 999.7 \quad 0^\circ\text{C} < T < 4^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$\rho(T) = -0.0052T^2 - 0.0236T + 1000.1 \quad 4^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C} \quad (3)$$

上述各式中:温度单位为℃;密度  $\rho$  为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;动力黏度  $\mu$  为  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

各表达式相关系数  $R^2$  都在 0.9998 以上,可见能准确反映动力黏度和密度与温度的关系。由图 1 和拟合关系可知,流体密度变化幅度较小,但是这种差异会形成自然对流,对流体运动具有一定的影响,应该加以考虑。

含水介质渗透系数  $K$  的计算公式包含  $\rho g/\mu$  项,这里将其称为流体因子,用  $f$  表示。由以上分析可知  $f$  主要取决于流体种类和温度。对于常态水,流体因子与温度呈线性关系(图 2)。

通过对 0~40℃ 的水的热物理性质的分析得到二者的关系为:

$$f(T) = 234253T + 5 \times 10^6 \quad (4)$$

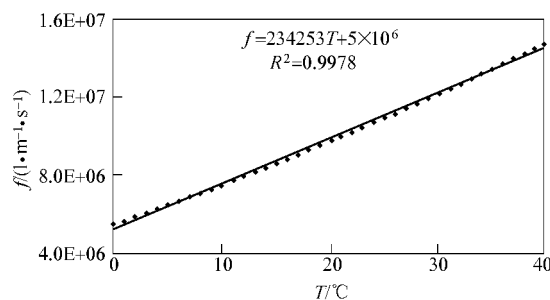


图 2 渗透系数中流体因子  $f$  与温度的关系

式中： $F$  的单位为  $1 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。式(4)的相关系数达 0.9978，可见其精度较高。由此可知，温度升高，介质的渗透系数可近似认为是线性增大的。

渗透系数  $K$  与温度的关系及发生温度波动  $\Delta T$  后的渗透系数分别可以表示为：

$$K(T) = f(T) \cdot k; \quad K(T + \Delta T) = f(T + \Delta T) \cdot k \quad (5)$$

则相对于温度波动  $\Delta T$  的渗透系数变化率  $\tau$  为：

$$\tau(\Delta T) = \frac{K(T + \Delta T) - K(T)}{K(T)} = \frac{f(T + \Delta T) - f(T)}{f(T)} = \frac{234253\Delta T}{234253T + 5 \times 10^6} \quad (6)$$

若原始温度为  $15^\circ\text{C}$ ，温升为  $1^\circ\text{C}$ ，则  $\tau = 0.027515$ ，可见温升  $1^\circ\text{C}$ ，渗透系数约增大 3%，这足以反映渗透系数对温度的变化较为敏感。需要指出的是，上述定量关系只考虑流体性质的变化对渗透性的影响，若考虑温度升高带来固相介质的热膨胀，那么渗透性的变化将比较复杂。

### 3 含水层中双场全耦合模型

**3.1 模型建立** 首先做以下基本假设：水流运动过程中所受的外力只有重力；稀浓度溶液，可忽略因浓度差异而造成的弥散；忽略液-固相间的质量交换，流体密度只受温度和压强的影响；水流运动符合 Darcy 定律；含水层骨架是均质、多孔介质。

地下水研究领域的多数公式在推导时都假设流体密度、黏度和介质孔隙度不变，但是在考虑温度场与渗流场耦合时，地下水密度和黏度都不是常量。在含水层内任取一无限小的平行六面均衡单元体，根据质量守恒定律，得渗流连续性方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi\Delta x\Delta y\Delta z) + \left[ \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] \Delta x\Delta y\Delta z = \rho Q\Delta x\Delta y\Delta z \quad (7)$$

式中： $\phi$  为孔隙度； $\rho$  为密度； $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  为流速； $Q$  为源汇项。

因为密度是温度和压强的函数，孔隙度是压强的函数，且只在  $z$  方向上会发生形变，因此式(7)左边第一项为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi\Delta x\Delta y\Delta z) = \left[ \rho\phi \frac{\partial\Delta z}{\partial t} + \rho\Delta z \frac{\partial\phi}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \phi\Delta z \left( \frac{\partial\rho}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial\rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \right) \right] \Delta x\Delta y \quad (8)$$

根据地下水动力学的相关公式<sup>[12]</sup>：

$$d(\Delta z) = \alpha\Delta z dp \quad (9)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial p} = (1 - \phi)\alpha \quad (10)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial p} = \rho\beta \quad (11)$$

式中： $\alpha$  为多孔介质的压缩系数； $\beta$  为液体的体积压缩系数； $p$  为压强。令释水率  $S_s = \rho g(\alpha + \phi\beta)$ ，则有：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi\Delta x\Delta y\Delta z) = \left[ \frac{S_s}{g} \frac{\partial p}{\partial t} + \phi \frac{\partial\rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \right] \Delta x\Delta y\Delta z \quad (12)$$

因密度不均一，则式(7)左边第二项可变为：

$$\left[ \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] \Delta x\Delta y\Delta z = \left( \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho \frac{\partial v_y}{\partial y} + \rho \frac{\partial v_z}{\partial z} + v_x \frac{\partial\rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial\rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial\rho}{\partial z} \right) \Delta x\Delta y\Delta z \quad (13)$$

根据 Darcy 定律的基本假定，即对于黏滞力占优势的流体流动时，描述流体运动的 N-S 方程中的流体惯性力和加速度项可以略去，且由黏滞力产生的流速与流体黏度和介质特性成线性关系，而体积力只有自重。利用文献[13]中的结论，流体运动速度可表示为：

$$v_j = - \frac{k_j}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho g e_j \right) \quad (14)$$

式中： $j$  表示笛卡尔坐标系，分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向； $e_1 = e_2 = 0$ 、 $e_3 = 1$ ；其它符号意义同前。

这里是用压强来表示各位置的能态,渗透系数也因密度和黏度的变化而在各位置存在差异,可见式(14)能更加真实地反映地下水流动状态。

将式(12)一(14)代入式(7),并利用密度与温度的关系把密度梯度用温度梯度来表示,可得到地下水运动方程:

$$\sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{k_j}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho g e_j \right) \right] + \sum_j \frac{k_j}{\rho \mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho g e_j \right) \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{S_s}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\phi}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} - Q \quad (15)$$

式(15)中,右端第一项表示该时间段内均衡单元体内弹性释放(或贮存)的水量;第二项表示由于温度随时间变化引起密度变化所导致的液体质量的变化;最后一项相当于源汇项。另外,密度也作为一个变量,这里假设密度的改变仅由温度差异所致,因此在温度分布已知的条件下,密度项就是常量。

在水-岩热交换瞬时完成的假设条件下,考虑含水层的弹性释水和流体密度改变所产生的水量所带来的热量转移,新的地下水热量运移方程为:

$$c_{eq} \rho_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} - \sum_j c \rho \frac{k_j}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho g e_j \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} = \sum_j \lambda_{eq} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + c \rho (T' - T) Q + c \left( \frac{S_s}{g} \frac{\partial p}{\partial t} + \phi \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \right) T \quad (16)$$

式中: $\lambda_{eq}$ 为地层等效导热系数; $c_{eq}$ 为地层等效比热容; $\rho_{eq}$ 为地层等效密度;在数值上有: $\lambda_{eq} = \phi \lambda_w + (1 - \phi) \lambda_s$ ,  $\rho_{eq} c_{eq} = \phi \rho_w c_w + (1 - \phi) \rho_s c_s$ ,  $\lambda_s$ 、 $\lambda_w$ 分别为固体介质和水的导热系数, $c_s$ 、 $c_w$ 分别为固体介质和水的比热容, $\rho_s$ 、 $\rho_w$ 分别为固体介质和水的密度; $T'$ 为源项的温度。

联立式(15)、式(16)、式(1)、式(2)或式(3)这4个方程,有 $p$ 、 $T$ 、 $\rho$ 、 $\mu$ 4个未知数,因而可以求解。这就是地下水密度和黏度随温度而变的渗流场和温度场全耦合方程组。

**3.2 模型求解** 温度场与变物性渗流场的耦合问题中,两场相互作用包含渗流引起对流传热和温度改变引起水流物理状态改变两个方面,它们是强耦合关系。本文在求解该强耦合问题时借助了 FEMLAB 软件。FEMLAB<sup>[14]</sup>是基于 MATLAB 语言开发的有限元数值仿真软件,其主要特点是以偏微分方程(PDEs)为基础来建立模型并解决科学及工程问题。由于它具有直观的图形用户界面(GUI),用户可以根据需要选择或建立适合自己的方程与方程组,设定不同物理场之间的耦合变量,从而得到多场耦合问题的解。

FEMLAB 采用的 PDEs 方程参数形式为:

$$\begin{cases} d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla(-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \cdot \nabla u + a u = f & u \in \Omega \\ n \cdot (c \nabla u + \alpha u - \gamma) + q u = g & u \in \partial \Omega \\ h u = r & u \in \partial \Omega \end{cases} \quad (17)$$

其中: $u$ 为因变量; $f$ 、 $g$ 、 $r$ 分别为求解域和边界上的源项; $d_a$ 、 $c$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\beta$ 、 $a$ 、 $q$ 、 $h$ 均为系数; $n$ 为求解域外法线方向; $\nabla$ 为微分算子。方程里各系数,在不同的问题中有不同的物理意义,但是本质上所有的物理现象都可以用式(17)表示。

本文选择 FEMLAB 地球科学模块中的 Darcy 定律(压强分析)和多孔介质对流传热模块作为基础模型来求解温度场与渗流场全耦合问题,当然在两组偏微分方程之间还需定义多个交叉耦合项。由于软件默认的微分方程尚不能解决该全耦合问题,笔者对方程式系数做了相应的修改。

软件定义的温度场和渗流场控制方程分别为:

$$c_{eq} \rho_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda_{eq} \nabla T) = Q_G - c_w \rho_w \mathbf{u} \cdot \nabla T \quad (18)$$

$$S_s \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \left[ -\frac{k}{\mu} \nabla(p + \rho g e_j) \right] = Q_s \quad (19)$$

式中: $Q_G$ 、 $Q_s$ 分别为温度场和渗流场的源汇项; $\mathbf{u}$ 为流速矢量,可通过 Darcy 定律由压力分布得到。

由于流体密度变化带来了流体流量和热量改变,相当于在系统内部存在热源,那么偏微分方程的源汇项可作如下修改:

$Q_s$  为

$$- \phi / \rho_{\text{hof\_esdl}} * \text{diff}(\rho_{\text{hof\_esdl}}, T) * \text{diff}(T, x) \quad (20)$$

$Q_c$  为

$$CL\_eshcc * (S\_esdl * \text{diff}(p\_esdl, x) / \rho_{\text{hof\_esdl}} / g\_esdl + \phi / \rho_{\text{hof\_esdl}} * \text{diff}(\rho_{\text{hof\_esdl}}, T) * \text{diff}(T, x)) * T \quad (21)$$

对比式(19)与式(15),耦合问题渗流控制方程左边考虑由密度变化所产生的水量,因此需修改渗流方程,具体做法是修改 Physics > Equation System > Subdomain Setting 中的  $\beta$  项为:

$$\begin{cases} - kap\_esdl / \rho_{\text{hof\_esdl}} / \eta_{\text{esdl}} * \text{diff}(\rho_{\text{hof\_esdl}}, T) * \text{diff}(T, x) \\ - kap\_esdl / \rho_{\text{hof\_esdl}} / \eta_{\text{esdl}} * \text{diff}(\rho_{\text{hof\_esdl}}, T) * \text{diff}(T, y) \end{cases} \quad (22)$$

$\gamma$  项为

$$\begin{cases} - \rho_{\text{hof\_esdl}} * g\_esdl * kap\_esdl / \eta_{\text{esdl}} * \text{diff}(D\_esdl, x) \\ - kap\_esdl * g\_esdl / \eta_{\text{esdl}} * \text{diff}(\rho_{\text{hof\_esdl}}, T) * \text{diff}(T, x) * \text{diff}(D\_esdl, x) \\ - \rho_{\text{hof\_esdl}} * g\_esdl * kap\_esdl / \eta_{\text{esdl}} * \text{diff}(D\_esdl, y) \\ - kap\_esdl * g\_esdl / \eta_{\text{esdl}} * \text{diff}(\rho_{\text{hof\_esdl}}, T) * \text{diff}(T, y) * \text{diff}(D\_esdl, y) \end{cases} \quad (23)$$

通过以上变动,就建立了温度场与变物性渗流场全耦合问题的控制方程。

另外在 Options > Expressions > Scalar Expressions 中写入温度和流体密度及黏度的关系式(式(1)、式(2)或式(3)),作为耦合传递变量,可以在计算时实时调用以更新研究区介质的物理性质。 $d_a$  改为  $S\_esdl / \rho_{\text{hof\_esdl}} / g\_esdl$ 。借助前述人机交换过程,能够解决此类全耦合问题。

## 4 工程实例

以文献[7]中的工程实例作为本文的计算模型。文献[7]设定水的运动黏滞系数与温度的经验公式,并考虑温度梯度引起水的运移来研究双场耦合,然后比较了耦合与非耦合的计算结果差异。本文以常态水的物性与温度的拟合关系作为耦合变量,结合前述分析计算稳定温度场与变物性渗流场的耦合,并拟对常物性耦合与变物性耦合计算结果做对比分析。

(1)几何模型。龙滩碾压混凝土(RCC)重力坝最大坝高216.5m。选取此坝的第12号坝段进行稳定渗流场与稳定温度场的耦合分析,计算模型如图3所示<sup>[7]</sup>。碾压混凝土坝不同于常态混凝土坝,它本身是多孔隙低透水性介质,因此坝体内部也会形成渗流场,这里将其与坝基部分同时分析。坝体上游布有排水孔,根据经验,坝体水头在排水孔附近骤降,因此假设坝体渗流自由面形态近似用CJ(此为边界编号,如图3所示,下同)表示。这里假设自由面流体通量为零。

(2)计算参数。对原文中各计算参数的单位进行折算,取15℃时的地下水密度和黏度将渗透系数折算为渗透率。得到模型所采用的参数值,如表1所示。

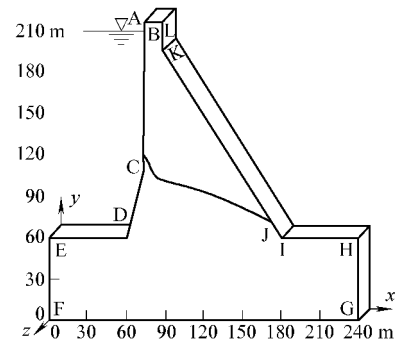


图3 几何模型(引自文献[7],A~L为边界编号)

表1 计算参数(根据文献[7])

参数	单位	坝基	坝体
渗透率	$\text{m}^2$	$1.16 \times 10^{-14}$	$1.16 \times 10^{-16}$
密度	$\text{kg}/\text{m}^3$	2400	2694
比热	$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	967.2	967.2
孔隙率		0.3	0.1
导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	2.207	2.207
重力加速度	$\text{N}/\text{kg}$	1000	1000
水的导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	0.68	0.68

(3)边界条件与初始条件。如图3所示,渗流场边界条件为: $H_{DE} = 150\text{m}$ 、 $H_{HI} = 0\text{m}$ ;DC的水头

按其埋深线性变化;EF、FG、GH 以及  $z = 0\text{m}$  和  $z = 3\text{m}$  断面为零通量面 ( $q = 0$ );BCJ 和 JI 分别为自由面和溢出面边界。温度场边界条件为:上游坝面 B 处温度为多年平均表层水温  $21^\circ\text{C}$ ,水深  $60\text{m}$  以下保持  $12.1^\circ\text{C}$  不变,水深  $0 \sim 60\text{m}$  之间按线性变化;下游坝面按多年平均气温并考虑太阳辐射作用取为  $22.1^\circ\text{C}$ ;EF、FG、GH 以及  $x = 0\text{m}$  和  $x = 3\text{m}$  断面为绝热面。初始渗流场水头取零,初始温度场温度取  $15^\circ\text{C}$ 。

(4) 求解方法。采用 FEMLAB 软件,选取地球科学模块中的 Darcy 定律(压强分析)子模块和对流传导子模块。将式(1)、式(3)作为全局耦合变量,把对流传导的流速项设为渗流场的速度。按式(20)一(23)修改模型,设定求解稳态问题,在输入相应的边界条件和初始条件后即可运算。

(5) 模拟结果分析。纵向断面的温度分布和流网图分别如图 4 与图 5 所示。图中反映大坝在长期运行之后,坝基温度场主要受库底水温影响,坝基地质体温度与库底水温基本一致。坝体温度场存在渐变现象,即由上游的低温区逐渐过渡为下游的高温区。渗流场形态与传统计算方法得到的渗流状态十分类似,坝前至坝后存在稳定渗流。坝趾和坝踵正下方的流速比较大,流速波动范围在  $3.3 \times 10^{-8} \sim 11.7 \times 10^{-8}\text{m/s}$  之间。

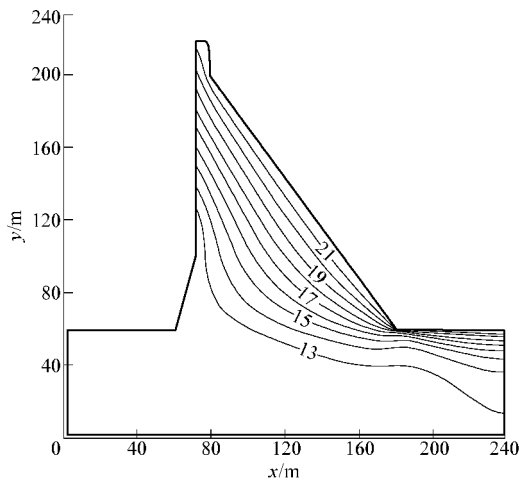


图 4 大坝断面温度分布(单位:  $^\circ\text{C}$ )

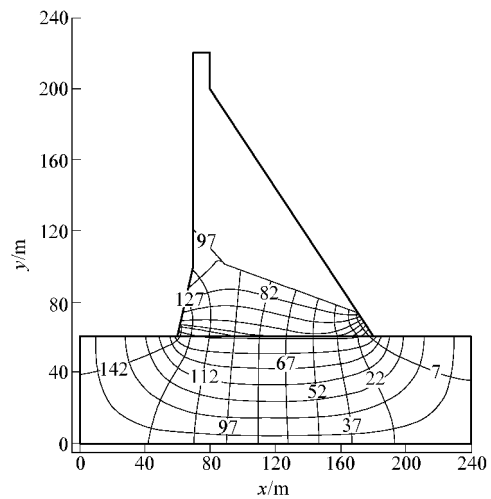


图 5 大坝断面流网(单位:m)

在  $y = 50\text{m}$  处取一水平剖面,该剖面线上流体密度和黏度变化曲线(图 6)与坝基温度变化有较好的相似性,即温度低的部位流体密度和黏度都较大,温度高的部位流体密度和黏度都较小。

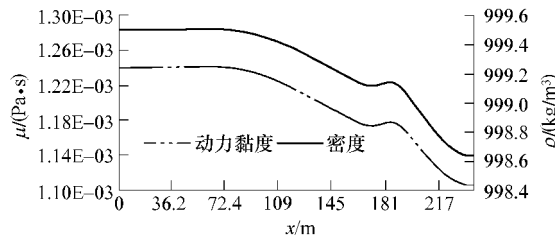


图 6  $y = 50\text{m}$  剖面线流体密度和黏度变化曲线

取  $15^\circ\text{C}$  水的各项物理指标作为常物性耦合的计算参数,得到大坝常物性耦合与变物性耦合流速差值等值线图(图 7)。由图 7 可知:变物性的耦合对常物性耦合计算的改正值在  $-2.4 \times 10^{-8} \sim 8 \times 10^{-9}\text{m/s}$  之间,变物性耦合得到的地下水流速普遍减小,这里认为是由于相比于常物性耦合坝基温度(大多是  $12.5^\circ\text{C}$ )低于  $15^\circ\text{C}$ ,该处渗透系数降低,那么地下水流速相应地也降低。坝体部分温度升高,相应的地下水流速也增大。坝趾和坝踵下部坝基渗流流速的改正值最大,如图中 2 个等值线封闭区所示。整体来看,变物性耦合得到的流速比常物性耦合( $15^\circ\text{C}$ )流速平均减小 3.89%。

按两种计算方法得到的大坝温度场差异等值线见图 8。由图 8 可知:变物性的耦合对常物性耦合

计算的温度场改正值比较小,在  $-0.02 \sim 0.36^{\circ}\text{C}$ 。变物性耦合得到的温度场普遍增大,且在下游坝基部分的这种变化更明显,等值线较密集,说明在温差大的部位变物性耦合与常物性耦合计算的偏差较大。由于热对流是热量传递的主要影响因素,渗流场的变化将导致温度场的变动。综合分析计算数据,变物性耦合得到的温度比常物性耦合温度平均增大  $0.19\%$ 。

变物性耦合是非线性耦合过程,流速与温度之间相互作用,逐步达到平衡。该耦合过程中二者对应关系显得非常复杂。

综合所建模型与实例计算结果可知,在温度场与渗流场耦合计算中考虑温度对流体物理性质的影响,能够提高模型计算的精度,使得仿真模拟结果与实际情况更加接近,对认识二者的真实作用过程具有一定的意义。

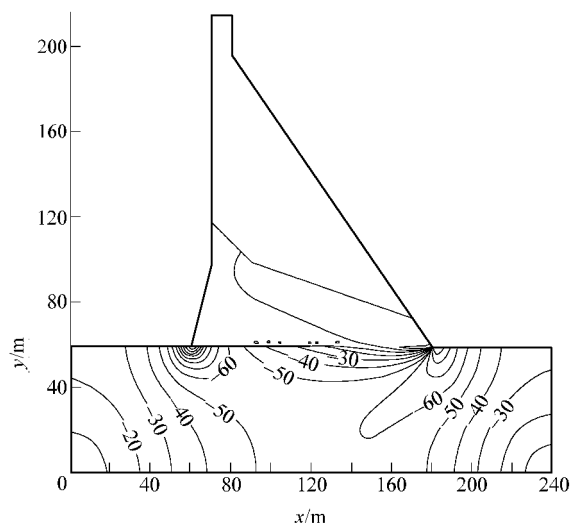


图7 变物性耦合与常物性耦合渗流场  
差值等值线(单位:  $\times 10^{-10} \text{ m/s}$ )

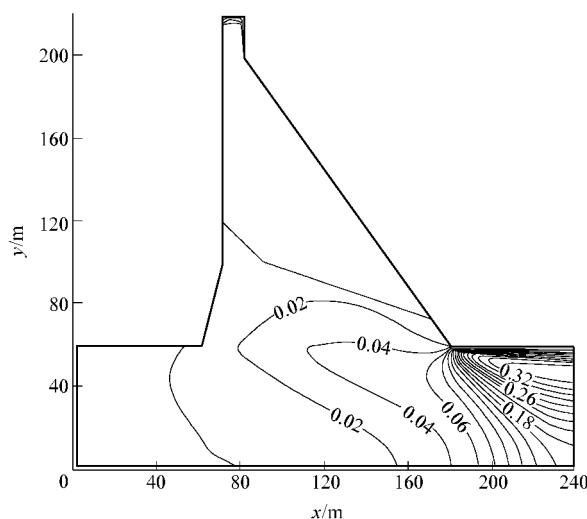


图8 变物性耦合与常物性耦合温度场  
差值等值线(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

## 5 结论

对于多孔介质,单纯考虑流体物理性质受温度的影响,基于一定的假设条件,得到介质渗透系数与温度线性相关的结论。由常态水的物理参数,经分析与计算,得知渗流场对温度较为敏感。

从渗流连续性方程出发,考虑流体物性受温度的影响,建立了流体密度和黏度随温度变化的双场全耦合数学模型。通过 FEMLAB 软件的二次开发,实现了温度场与变物性渗流场全耦合模型的有限元求解。

以龙滩碾压混凝土重力坝作为应用实例,得到采用变物性全耦合模型求解稳态温度场时,温度计算值普遍比常物性耦合计算值大,而地下水流速普遍降低。且温度场变动比较小,渗流场变动相对来说要大一些。

本文所建的温度场与渗流场全耦合模型考虑了三方面的耦合因素——流体的对流传热、温度对流体密度的影响及温度对流体黏度的影响,相对以往研究更为全面,提高了数值模拟的精度。

## 参 考 文 献:

- [1] 肖才忠,潘文昌. 由温度场研究坝基渗流初探[J]. 人民长江,1999,30(5): 21-23.
- [2] 宋汉周,王建平,周名权,等. 某抽水蓄能电站输水系统下平段区围岩渗透薄弱部位探测[J]. 岩土力学,2008,29(3): 639-644.
- [3] Mongelli, Pagliarulo. Influence of water recharge on heat transfer in a semi-infinite aquifer[J]. Geothermics,

- 1997, 26(3): 365 – 378.
- [ 4 ] Lazear G D. Evidence for deep groundwater flow and convective heat transport in mountainous terrain , Delta County , Colorado , USA [J]. Hydrogeology Journal , 2006 , ( 14 ) : 1582 – 1598.
- [ 5 ] Constantz J. Interaction between stream temperature , stream flow , and groundwater exchanges in alpine streams [J]. Water Resources Research , 1998 , 34(7) : 1609 – 1616.
- [ 6 ] Bravo H R , Feng J , Hunt R J. Using groundwater temperature data to constrain parameter estimation in a groundwater flow model of a wetland system [J]. Water Resources Research , 2002 , 38(8) : 1 – 14.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 赖远明 , 刘松玉 , 邓学钧. 寒区大坝温度场和渗流场耦合问题的非线性数值模拟 [J]. 水利学报 , 2001(8) : 26 – 31.
- [ 9 ] 许增光 , 李康宏 , 柴军瑞 , 等. 考虑渗流热学效应的大坝稳定温度场有限元数值分析 [J]. 红水河 , 2006 , 25(2) : 112 – 115.
- [ 10 ] Yu-Shu Wu , Sumit Mukhopadhyay , Keni Zhang. A mountain – scale thermal – hydrologic model for simulating fluid flow and heat transfer in unsaturated fractured rock [J]. Journal of Contaminant Hydrology , 2006(86) : 128 – 159.
- [ 11 ] Weast R C. Handbook of Chemistry and Physics [M]. 63rd ed. Boca Raton. Fla. : Chemistry Rubra Pun. Co. Press. 1982: 261 – 263.
- [ 12 ] 薛禹群 , 朱学愚. 地下水动力学 [M]. 北京:地质出版社 , 1997:1 – 50.
- [ 13 ] 张勇 , 薛禹群 , 谢春红. 高温差条件下达西定律的理论推导 [J]. 水科学进展 , 1999 , 10(4) : 362 – 367.
- [ 14 ] 盛金昌 , 廖秋林 , 刘继山. 基于 FEMLAB 的钻井过程中流固热耦合响应分析 [J]. 工程力学 , 2008 , 25(2) : 219 – 229.

## Fully-coupled analysis of temperature field and variable properties seepage field around dam-site

WU Zhi-wei , SONG Han-zhou  
(Hohai University , Nanjing 210098 , China)

**Abstract:** Under the condition of only the variations of water properties affected by temperature was considered , the characteristic of seepage flow that the flow field is sensitive to temperature field is analyzed based on the linear relationship between permeability coefficient of porous and temperature. On the assumption that the density and viscosity of water are closely related to temperature , a model for seepage field which fully couples the temperature field with the variable properties of water was established. A preliminary solving approach was also discussed. Based on the suggested model the software FEMLAB is applied to carry out the secondary development of the model to deduce the finite element solution of the fully-coupled analysis. The validity of the model is verified by numerical analysis result of an example. It is found that the caculated temperature around dam-site will be higher and the seepage flow velocity will be lower if the proposed model is adopted.

**Key words:** temperature field; seepage flow; dam-site; variable properties of water; coupled analysis; numerical simulation; FEMLAB

(责任编辑:王冰伟)