

文章编号: 1006-4710(2011)03-0317-04

基于 FLUENT 的渗流场数值模拟分析

李国栋¹, 哈岸英^{1,2}, 钟小彦¹, 陈刚^{1,3}

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2. 宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司, 宁夏 银川 750004; 3. 安康学院, 陕西 安康 725000)

摘要: 传统上渗流问题的模拟都是求解渗透水头的拉普拉斯方程, 为了利用 CFD 软件强大的计算及前后处理功能, 通过在一般流体力学控制方程基础上增加渗透阻力的办法, 以源项的形式导入 FLUENT 软件的求解器中实现了对渗流的数值模拟, 并采用求解自由面的 VOF 法进行浸润面的计算。地下河槽及矩形土坝两个算例表明, 无论对于渗流量、浸润面还是溢出点, 计算结果与解析分析及实验数据高度吻合, 表明本研究方法精确可靠, 为研究渗流问题提供了新的途径。

关键词: 渗流; FLUENT; 浸润面; VOF 法

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Seepage Field Based on FLUENT

LI Guodong¹, HA Anying^{1,2}, ZHONG Xiaoyan¹, CHEN Gang^{1,3}

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Ningxia Water Resources & Hydropower Survey Design & Research Institute Cooperation Limited, Yinchuang 750004, China; 3. Ankang University, Ankang 725000, China)

Abstract: Traditionally, the simulation of seepage flow is to seek for the solution of Laplace equation to the permeation head. In order to make use of the powerful calculating and pre-processing and post-processing functions of CFD software, by adding the penetration resistance terms, served as a source terms of moment, to the general fluid dynamic equations, we achieved seepage field simulation based on FLUENT software. The wetted surface of seepage is simulated with VOF (Volume of fluid) method. Two examples of underground channel and square - shape dam shows that calculated seepage current, free surface and overflow location agreed very well with analysis and experimental results. The method provides a new vista for the seepage flow research.

Key words: seepage; FLUENT; wetted surface; VOF method

渗流控制是保证水利工程安全稳定的关键, 而渗流分析是实现渗流控制的基础^[1]。目前, 数值计算已成为渗流分析的主要工具且在各类工程问题的研究中被广泛应用。渗流计算中常用的数值模拟方法有差分法、有限单元法和边界元法。其中以有限单元法的应用最为广泛^[2]。基于有限元法的商用软件, 比如 Seepage、bank、理正, 等, 存在的共同不足之处是后处理相对简单, 不提供用户自定义的接口。在复杂渗流场中渗透系数离散大, 容易产生迭代计算不收敛现象。所以有许多学者根据温度场与渗流

场相似这一特征, 基于 ANSYS 软件计算温度场的功能, 结合 ANSYS 提供的 APDL 程序语言, 编制处理自由浸润面处理的程序, 利用 ANSYS 强大的分析与前后处理功能来实现对渗流场的模拟^[3-6]。FLUENT 是一个广为使用的 CFD 分析软件, 有强大的几何模型及网格生成前处理功能及流场特性分析的后处理功能, 其用户自定义函数可以根据需要定制, 从而实现设置边界条件、材料属性、输运方程中的源项、改进现有物理模型等功能。渗流属于流体力学的范畴, 开发利用 CFD 软件强大的功能进行渗流分

收稿日期: 2010-12-08

基金项目: 陕西省教育厅科学研究计划基金资助项目(08JK404); 陕西省重点学科建设专项资金资助项目。

作者简介: 李国栋(1967-), 男, 陕西米脂人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为水工水力学及计算流体力学。

E-mail: gdli2010@yeah.net.

析计算,对于促进渗流分析技术的发展具有重要的意义。杨海英等曾采用该软件求解拉普拉斯方程对有压渗流进行过研究,但是对于自由渗流问题的研究鲜见报道。

本研究利用 CFD 软件强大的计算及前后处理功能,通过在一般流体力学控制方程基础上增加渗透阻力的办法,以源项的形式导入 FLUENT 软件的求解器,实现了对渗流的数值模拟,并采用求解自由面的 VOF 法进行浸润面的计算。

1 渗流控制方程及浸润面确定

1.1 渗流控制方程

渗流是水或其他流体在岩土等孔隙或裂隙中的流动,由于介质孔隙大小及其分布异常复杂,因此流体在孔隙中的流程相当复杂很难求得水流质点的真实流速,所以渗流研究中普遍使用渗流模型,即认为渗流是充满整个孔隙介质的连续流动,把一般研究流体力学的方法引入到整个渗流区域。一般不可压缩流动的控制方程由连续性方程及 N-S 组成,即:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + f \quad (2)$$

这里 u 是微元断面的平均速度,它与孔隙流体真实速度的关系为 $u = nu'$; ρ 为流体密度; p 为渗透压力; f 为单位质量力,一般仅为重力; ν 为流体的运动粘性系数。方程中 $\nu \nabla^2 u$ 为反映流动内摩擦引起的粘性阻力项,对于渗流问题其值很小,显然它不能反映介质对流动实际产生的很大的阻力作用,为此在方程(2)的右端引入一个能反映介质对流动实际阻力的项,单位质量流体的渗流阻力为:

$$S = gJ \quad (3)$$

其中, J 为渗透比降, g 为重力加速度。

将(3)式代入达西定律 $v = -kJ$ 可得:

$$S = -g \frac{v}{k} \quad (4)$$

把渗透阻力(4)式作为源项加入到控制方程(2)中,即可得到控制渗流运动的微分方程。

在 FLUENT 软件平台,源项的添加可以通过用户自定义函数 UDF (User-Defined Function) 来实现。用户自定义函数 UDF 是 FLUENT 软件提供的一个用户接口,用户可使用由软件提供的 DEFINE 宏及函数,用 C 语言编写 UDF 程序,并编译加载到 FLUENT 中。加载后 UDF 的名字将会出现在 FLUENT 图形界面相应面板上,通过选择就能将其连接到 FLUENT 求解器,从而实现设置边界条件、材料属

性、输运方程中的源项、动网格运动、改进现有物理模型等。

本研究属于在动量方程中添加源项,将渗透阻力(4)用 C 语言编写到 UDF 指定的宏 DEFINE _ source (name, c, t, DS, eqn) 中,并加载到 FLUENT 后在用户界面 Defined/boundary Condition/Fluid 面板上导入。

1.2 浸润面确定方法

自由渗流浸润面是未知的,因而必须在计算过程中加以确定。最传统的办法是逐步迭代逼近^[2],是一种变网格的方法。但该方法对于处理复杂问题实施起来很困难。后来许多学者又致力于发展基于固定网格的办法,如 Bathe 等提出了单元渗透矩阵调整法, Desai 提出了剩余流量法,张有天等提出了初流量法,朱岳明等提出了结点虚流量法,速宝玉等提出了截止负压法,吴梦喜,梁业国,党发宁等学者也都提出过各自的处理方法。

在不考虑非饱和区域的情况下,自由浸润面实际上是水气的交界面,所以原理上可以按照流体力学中确定自由液面的办法来确定,在 FLUENT 软件平台使用的是体积率法 (VOF),VOF 是一种多相流的方法可以对水流和气流分别进行模拟,VOF 法中水气共用一套方程(2),不过其密度和粘性采用体积分数加权确定,为:

$$\rho = \beta \rho_w + (1 - \beta) \rho_a \quad (5)$$

$$\mu = \beta \mu_w + (1 - \beta) \mu_a \quad (6)$$

其中,体积分率 $\beta = \beta(x, t)$ 表示空间某位置流体所占的体积。当 $\beta = 1$ 时表示该位置为水相,当 $\beta = 0$ 时表示该位置为气相,若 $\beta \in (0, 1)$ 则表示处于界面区域。通过求解体积分率函数,即:

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + u \cdot \nabla \beta = 0 \quad (7)$$

可以得到空间各处的体积分率,在界面区域通用分段线性插值的几何重建方案得到水气分界面,即浸润面。

2 算例验证

算例1 如图1所示,水流从渠道沿透水层渗入相邻河道,不透水层的底坡 $i = 0.025^\circ$,土层渗透系数 $k = 0.002 \text{ cm/s}$,河道与渠道之间的距离 $l = 300 \text{ m}$,渠道入渗端水深 $h_1 = 2 \text{ m}$,河道出渗端水深 $h_2 = 4 \text{ m}$ 。

该算例可用解析法求得渗透量及浸润线,不透水层的底坡为正坡,且 $h_2 > h_1$,浸润线为壅水曲线,其浸润线方程为:

$$s = \frac{h_0}{i} \left[\frac{h_2}{h_0} - \frac{h_1}{h_0} + \ln \frac{h_0 - 1}{h_1} \right] \quad (8)$$

式中, h_0 为均匀渗流的水深, s 为任何两渗流断面间的距离, h_1 和 h_2 分别为相应断面的上下游水深。

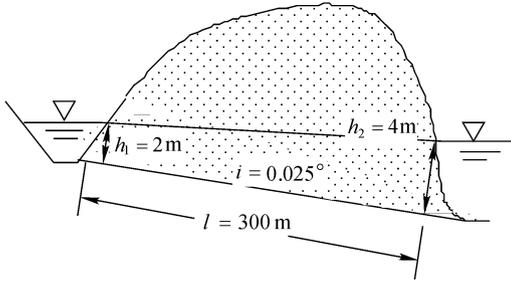


图1 渗流地下河槽示意图
Fig. 1 Sketch of underground channel

将 $h_1 = 2\text{ m}$ 、 $h_2 = 4\text{ m}$ 、 $s = l$ 代入式(8), 可求得 $h_0 = 1.885\ 602\text{ m}$, 单宽渗流量 $q = kih_0 = 9.428 \times 10^{-3}\text{ cm/s}$ 。计算网格沿流向 0.5 m , 沿水深方向 0.2 m , 计算单宽渗流量为 $9.336 \times 10^{-3}\text{ cm/s}$, 与理论分析值的相对误差为 -0.98% 。

计算与理论分析浸润线的对比如图2所示, 部分位置的结果对比如表1所示。从图2和表1可以看出计算和理论分析的结果高度吻合。

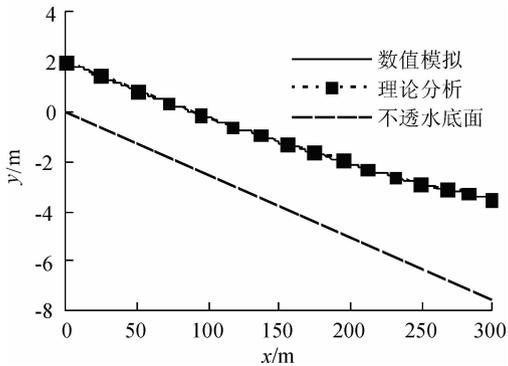


图2 地下河槽浸润线
Fig. 2 Seepage free surface of the underground channel

表1 地下河槽浸润线理论与计算对比

Tab. 1 The comparison of free surface between analysis solutions and calculated values for underground channel

距离/m	理论水深/m	模拟水深/m
50	2.097	2.096
100	2.261	2.260
150	2.520	2.518
200	2.895	2.894
250	3.391	3.392
300	4.000	3.998

算例2 以惯用文献中平底不透水地基上矩形均质土坝的稳定渗流为例(见图3), 土坝上游水深 $H_1 = 6\text{ m}$, 下游水深 $H_2 = 1\text{ m}$, 土坝宽 $L = 4\text{ m}$ 。上例中下游水深比上游大, 浸润线为壅水型, 下游的出渗水深是已知的。在本例中浸润线为降水型, 土坝宽度很小, 渗径短且上下游水深相差大, 涉及到出渗点位置确定的问题。

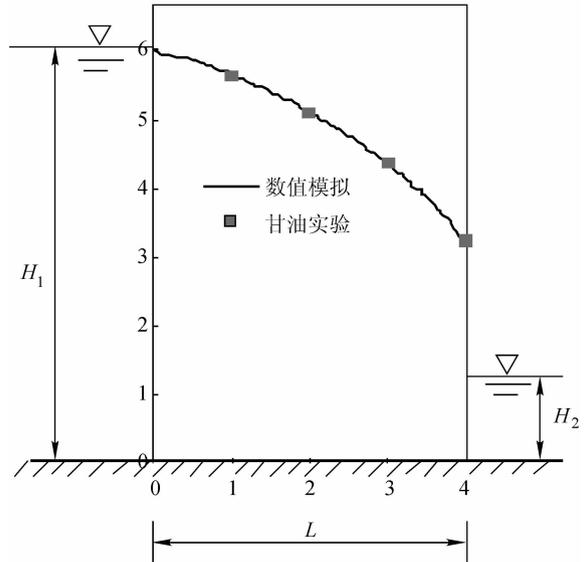


图3 矩形坝计算与实测浸润线
Fig. 3 Seepage free surface of the rectangular dam

表2 矩形土坝浸润线计算与实验比较

Tab. 2 The comparison of free surface between experimental measures and calculated values for rectangular dam

距离/m	计算水深/m	实验水深/m
1	5.650	5.63
2	5.112	5.10
3	4.369	4.38
4	3.255	3.25

上游边界按静水压力分布给定, 下游水面以下边界也按静水压力分布给定, 其它部分设定为潜在的出渗边界, 即设其压力为大气压。水气相体积分数为0.5的界线就是浸润线, 浸润线与下游面的交点为出渗点。模拟与甘油模型试验的结果绘制在图3上, 并列于表2中, 可见无论是浸润线还是溢出点位置, 计算与实验值都非常吻合。

3 结论

把达西定律表达的渗透阻力作为源项加入到流体的控制方程中, 并采用 VOF 法模拟浸润面, 本研究利用 CFD 软件 FLUENT 实现了对自由渗流场的

数值模拟。通过对地下河槽及矩形土坝两个算例的计算与对比分析,渗流量、浸润面、溢出点等特征量与理论值均高度吻合,表明本研究方法精准可靠。本研究为近一步应用 CFD 软件求解复杂边界、多种介质、各向异性、复杂空间的三维复杂自由渗流问题奠定了基础。

参考文献:

- [1] 陈益峰,周创兵,胡冉,等.大型水电工程渗流分析的若干关键问题研究[J].岩土工程学报,2010,31(9):1148-1154.
Chen Yifeng,Zhou Chuangbing,Hu Ran,et al. Key issues on seepage flow analysis in large scale hydropower projects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 31(9):1148-1154.
- [2] 毛昶熙.渗流计算分析与控制[M].第二版.北京:中国水利水电出版社,2003.
- [3] 蒙富强.基于 ANSYS 的土石坝稳定渗流的数值模拟[D].大连:大连理工大学,2005.
Meng Fuqiang. Numerical Simulation with ANSYS on Sta-

ble Seepage Field of Earth Rock-fill Dam [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2005.

- [4] 罗启北,张艳霞,刘东波.贮灰场渗流分析及 ANSYS 二次开发技术研究与应用[J].水力发电学报,2007,26(3):115-119.
Luo Qibei, Zhang Yanxia, Liu Dongbo. Seepage analysis of ash disposal area and further development technique of ansys[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(3):115-119.
- [5] 岳庆河.基于 ANSYS 的土石坝渗流与稳定分析研究[D].泰安:山东农业大学,2008.
Yue Qinghe. Seepage and Stabilization Study with ANSYS on Earth Rock-fill Dam[D]. Taian:Shandong Agricultural University,2008.
- [6] 许尚杰,党发宁,田威.基于 ANSYS 的土坝渗流分析及其应用[J].西安理工大学学报,2008,24(4):467-471.
Xu Shangjie, Dang Faning, Tian Wei. Analysis and application of dam seepage based on ansys[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2008,24(4):467-471.

(责任编辑 李虹燕)

简讯

西安理工大学 2011 年获国家自然科学基金项目再创历史新高

国家自然科学基金委员会近日公布了 2011 年国家自然科学基金申请项目评审结果,西安理工大学再创新高,在去年资助项目达到 40 项后,今年共有 51 个项目获得资助,增长 27%,其中青年基金项目 17 项,资助总经费达 2 317 余万元,增长 88%,资助项数和经费总额均创历史最好成绩。

此前,我校还获得国家社会科学基金项目 4 项。

(摘自西安理工大学新闻网 2011-08-31)