

土石坝渗流数值分析方法综述

李东艳¹ 闫 滨¹ 马 闯²

(1. 沈阳农业大学水利学院 辽宁 沈阳 110161; 2. 中国水利水电第六工程局 辽宁 丹东 118002)

摘要 对目前国内外渗流计算的主要数值分析方法进行综述,对有限差分法、有限单元法、边界元法、无单元法加以分析和比较,并对目前广泛应用的有限单元法及其在求解渗流自由面中的应用进行了重点阐述。

关键词 土石坝 渗流 数值分析 综述

中图分类号 :TV641 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2008)S1-0168-04

土石坝渗流是个复杂的空间问题,渗流力学是一门边缘学科,早期对堤坝渗流一般采用解析法或相应的经验公式等进行近似计算。解析法一般有直接解法、复变函数法、组合法、水力学法等^[1]。由于近似解法只适用于简单情况,对于一些复杂的渗流计算一般采用流网法和电模拟试验。试验分析法需要一定的设备,其建模困难、费用较高,费时费力,现在已经很少使用。随着电子计算机的快速发展和数值计算技术的进步,特别是自 20 世纪 70 年代以来,数值模拟逐渐占据了渗流计算的主导地位,也越来越受到人们的关注。数值模拟法具有下列优势:模拟过程在计算机上进行,不像物理模拟试验那样需要专门的试验仪器和试验费用,修改模型比较方便;易通过编制通用的计算程序使模拟过程程序化。

1 土石坝渗流数值分析方法

土石坝的渗流存在自由面(浸润面),且自由面随时间不断发生变化,这就给单元渗透矩阵的确定带来了困难。迄今,用数值计算方法求解土坝渗流时,最困难、最复杂的问题之一便是渗流自由面的确定。渗流自由面的位置是预先未知的,属于混合边界问题,必须同时满足 Dirichle(第一类)边界条件和 Neuman(第二类)边界条件,这使得求解渗流场问题异常复杂^[2]。目前求解土坝渗流采用的数值计算方法主要有:有限差分法、有限单元法、边界元法和新兴的无单元法,以及其他一些方法等,有时也将几种方法耦合求解。

1.1 有限差分法

有限差分法是里查森(Richardson)于 1910 年首先提出的,是计算流体力学中最重要、最成熟的离散化数值方法之一。有限差分法应用于渗流计算的基本思想是:用渗流区内有限个离散点的集合代替连续的渗流区域。在这些离散点上用差商去近似代替微分方程中的导数,将微分方程及其定解条件化为以未知函数在离散点上的近似值为未知量的代数方程,即将渗流基本方程转变为差分方程,并采用逐步逼近的计算方法来求得渗流场中各点处的水头差分方程,得到微分方程在这些离散点上的近似解。

该方法主要用于区域形状较为规则的问题,区域几何形状复杂时计算精度往往有所降低。但对于某些问题,差分法有其独到的优势。介玉新等^[3]将基于适体(boundary-fitted)坐标变换的有限差分法应用于渗流分析,该法通过求解 Poisson 方程自动生成贴合实际物理边界的计算网格,并将渗流问题变换至规则统一的直角网格系统下进行有限差分离散和数值求解,对不同的几何边界可以实现统一的数值求解算法。适体坐标变换方法用于计算流体力学中,可以实现曲线网格的自动生成,以模拟自由变动边界和溢出边界,不需要对复杂的计算域进行人为的网格划分,避免了有限元法繁杂的对自由面穿越单元的重新处理,简化了自由面渗流问题的分析难度,也使程序算法设计变得简单、容易。

差分法的优点是原理易懂、算式简单、有较成熟的理论基础,缺点是往往局限于规则的差分网格,对

基金项目 沈阳农业大学青年基金(20070110)

作者简介 李东艳(1983—),女,辽宁朝阳人,硕士研究生,从事土石坝渗流研究。E-mail:sg2lidongyan@163.com

通讯作者 闫滨(1972—),女,河南鹿邑人,副教授,博士,从事水工结构健康监测及评价研究。

· 168 · 水利水电科技进展 2008 28(S1) Tel:025-83786335 E-mail:jz@hhu.edu.cn http://kkb.hhu.edu.cn

曲线边界和渗透介质的各向异性模拟比较困难,而有限单元法则可克服这些问题。目前有限差分法在渗流分析中应用较少。

1.2 有限单元法

国外于 20 世纪 60 年代中期开始应用有限单元法研究渗流问题,国内则是从 20 世纪 70 年代起步。经过 30 多年的发展,有限单元法目前我国渗流计算中的应用已经比较成熟,可以用来求解各种复杂的渗流问题,并具有一批功能较强的计算程序。

有限单元法将实际的渗流场离散为有限个以结点互相联系的单元体,并首先求得单元体结点处的水头,同时假定在每个单元体内的渗透水头呈线性变化,因而可求得渗流场中任意一点处的水头和其他渗流要素^[4]。应用有限单元法求解渗流自由面问题主要有两大类方法:移动(变)网格法和固定网格法^[5-6]。以往应用较广的是移动网格法,取得不少成功的经验,但也暴露出该方法本身的缺陷:计算工作量较大,且网格的调整极易造成单元严重畸变,影响计算精度,对于求解三维问题尤为困难。由于存在这些严重的缺点,移动网格法已逐步被淘汰,取而代之的是固定网格法。固定网格法的核心是在计算过程中不变网格,采用扩大了的区域来进行求解,其研究核心就是计算中不改变网格。

具有代表性的固定网格法可以分成 2 种:

一种是调整单元渗透矩阵法,如 Bathe 的单元渗透矩阵调整法、李春华^[7]的改进单元渗透矩阵调整法、王贤能等^[8]的高斯点法。Bathe 法在迭代过程中把跨越自由面和自由面以上单元的渗透系数一律按实际渗透系数的千分之一计算,与实际不吻合。李春华则在迭代中根据自由面和单元的交截情况计算单元的渗透系数。王贤能根据高斯点的位置确定高斯点对应的渗透系数,计算单个高斯点对渗透矩阵的贡献,对所有高斯点求和得到单元的渗透矩阵。舒仲英等^[9]采用加密高斯点单元传导矩阵调整法来进行自由面的迭代,该法与高斯点法的不同之处在于通过加密复合单元的高斯积分点数目来提高复合单元传导矩阵值的计算精度。但该法计算量较大,在求解方程组的过程中需要高效率的求解器。速宝玉等^[10]提出截止负压法,允许非饱和区存在负压,由于只引用了单参数的罚函数,在考虑单元的部分饱和作用时会造成自由面附近区域的渗流计算不够精确。为此,张乾飞等^[11]提出了引用双参数罚函数的改进截止负压法,能更准确地考虑单元的部分饱和和非饱和作用,进而提高计算精度和收敛速度。

另一种是调整流量法,如 Desai 提出的剩余流量法、张有天等^[12]的初流量法等。Desai 法通过计算

自由面单元内过自由表面的流量来修改各节点的势,直到过自由面的流量小于某一允许值为止。Desai 法的缺点是工作量大,计算精度差。张有天的初流量法对 Desai 法作了许多重大改进,并从理论上给出了完整的描述。初流量法具有只需一次形成和分解总体传导矩阵,并不需在每次迭代步中确定自由面的近似位置和判别自由面与单元相交的实际情形等诸多优点。然而,众多计算表明,初流量法的收敛性不尽如人意,解的稳定性不好。王媛^[13]为此首先提出区域识别函数的新概念,进而提出了改进初流量法。但因没有解决出渗点的定位和奇异性问题,从而也就难以从根本上解决自由面在临近出渗面时的奇异现象。梁业国等^[14]提出子单元法的概念,将跨越自由面的单元细划。这种方法在应用过程中单元数和节点数随单元细划不断地变化,网格也在不停地变化,因此实际上并不是固定网格法。

渗流科学与工程实践的日益紧密结合,使得土坝渗流的研究进展也越来越快。近年来国内外专家学者研究提出了许多新的更加精确的计算渗流自由面的方法。吴梦喜等^[15]提出的虚单元法以上一次有限元计算求得的结点势为基础,求出自由面与单元节线的交点,移动跨自由面单元的某些结点,使结点落于交点处。这一方法的本质是固定网格基础上的移动网格法,计算过程中需要不断地移动网格。彭华等^[16]提出了一种求解渗流问题的弃单元固定网格法,该法通过插值函数确定出迭代过程中的自由面边界,最后迭代可一致收敛,因而可较准确地求出自由面边界。该法适用于稳定和非稳定渗流计算。凌道盛^[17]提出的虚节点法将穿过自由面的单元分成两部分,分别考虑位于自由面以上的节点和位于自由面以下的节点,如何使高斯积分域与自由面划分单元的区域相吻合与协调成为解决问题的关键,而自由面在迭代计算过程中时刻发生变化,因此该问题的解决实际上是困难的。张宜虎^[18]采用等效渗透系数法搜索渗流自由面,但该方法仅局限于三节点单元,对于其他单元形式显示出许多不足。党发宁等^[19]提出了确定稳定、非稳定渗流的变单元渗透系数法,根据自由面以上的结点水头小于其位置势的事实,变化自由面以上单元的渗透系数,迭代求出自由面的位置。郑宏等^[20]提出改进的有自由面渗流问题的 Bathe 算法,给出一个新的有自由面渗流问题的变分不等式提法,从而有效克服了 Bathe 算法所固有的网格依赖性,提高了数值稳定性。曹文贵等^[21]综合引进虚节点法与等效渗透矩阵法的思想,提出了加权截距法。李连侠等^[22]提出自由面适应网格法,即利用网格映射来确定自由面,为自由

面的计算提供了新的研究思路。李宝元等^[23]采用有限元固定网格和移动网格相结合的方法求解带自由面的坝体稳定渗流问题,其方法是针对一般坝体的结构,在有限元网格生成之后,又自动生成了网格移动所需的信息,实现了网格在迭代计算中随自由面的变化自动均匀移动,避免单元形状怪异,在欧拉空间中分区记录坝体不同的渗透性能,在网格移动到新位置后,自动识别网格所在的物性空间,从而确定单元在新位置上的渗流系数。

有限单元法应用在土坝渗流研究领域中有许多优点,如单元划分可任意大小,计算精度高,对边界适应性好以及能把计算方法编制成统一的标准化程序等,确实是解决复杂实际问题的最有效方法之一。有限单元法引入渗流计算给堤坝渗流分析带来一次革命,使传统解析方法求解堤坝渗流的众多缺陷得以克服。利用有限单元法可以计算二维、三维的堤坝稳定渗流和非稳定渗流,既可考虑堤身及堤基上的非均质性,也可考虑各向异性,因此,现有的渗流计算理论基本可以满足一般堤防工程渗流计算的需要。

1.3 边界元法

边界元法是在求边界积分的基础上,采用与有限单元法类似的单元剖分和线性插值,只不过它不是对研究区域进行离散,而只是剖分所研究区域的边界。目前,国内外对边界元法的研究和应用都给予了足够重视,在渗流分析中也得到一定应用。Niwa等^[24]提出采用边界元法确定渗流自由面的基本迭代方法,柴军瑞等^[25]对这种方法进行了改进,使计算简单易行,且具有较高的精度和计算效率。薛馨等^[26]提出具有渗流自由面的 Trefftz 直接法,并成功求解了边界非线性问题。该方法是一种半解析的边界型解法,在计算过程中避免了奇异积分,减少了有限单元法网格变动的麻烦,计算量小且精度高,目前已在众多领域得到应用。

与有限单元法相比,边界元法只在渗流边界上剖分单元,节点布置灵活,便于修改迭代。该方法可以处理无限和半无限渗透介质、渗流奇异点(如排水井点)和自由面等问题,由于只对研究域的边界进行剖分,其数据信息显著减少,一般说来其精度也高于有限单元法。当问题的介质种类较为单一时,用边界元法求解渗流问题较为有效。因此,边界元法通常被定位于有限单元法的一种重要的补充。其缺点是它所建立的系数矩阵是满阵,而且不对称,即使结点较少,也将占据可观的内存。同时,它对三维非均质渗透介质问题的应用尚存在相当大的困难。

1.4 无单元法

无单元法是一种新兴的工程数值计算方法,它

采用滑动最小二乘法近似场函数,摆脱了单元的限制,计算过程中可以任意布置节点,因此在求解有自由面的渗流问题等可动边界问题时具有独特的优势。Belytschko^[27]提出了无单元的 Galerkin 法,周维垣等^[28]的完善和发展已在很多领域得到了应用。曾清红等^[29]已将无单元法用于求解稳定渗流问题,李广信等^[30]、葛绵宏等^[31]也提出了有自由面渗流的无单元法,但他们都没有考虑如何准确施加渗流边界条件。李晓春^[32]将无单元法用于求解裂隙渗流问题,并考虑用罚函数法处理渗流边界条件,但未给出推导过程,并且选取罚因子时只进行了量级上的比较,未给出罚因子的具体表达式及其物理意义。沈振中等^[33]从变分原理出发,采用罚函数法处理渗流本质边界条件,给出了无单元法分析渗流问题的基本方程,研制和开发了相应的分析程序,并计算了覆盖层上均质土坝的渗流场。

应用无单元法进行渗流场分析是一项新颖的尝试,打破了有限单元法单元网格的限制,在一些复杂渗流问题上具有优势。它实现了积分网格和节点的独立布置,避免了对有自由面穿越的子域的重新处理,可根据需要灵活地增加、移动、减少节点,简化渗流问题的求解过程。与有限单元法相比,无单元法要花费更多的机时。因此,需要合理地确定影响半径和高斯积分的阶数,从而在满足精度的同时提高效率。目前,无单元法分析渗流问题尚处于尝试阶段,在三维问题、工程应用和实用化方面需要解决的问题还很多。

2 结 语

土石坝渗流数值分析方法已经日益成熟,并且在工程实践中得到了很好的验证及应用,取得了良好的经济效益和社会效益。未来,土石坝渗流数值分析方法将向如下方向发展:①高精度与高效率,在满足精度的同时提高效率;②适应复杂的边界条件、如曲线边界、各向异性介质、非均质材料等;③适用于三维稳定与非稳定渗流模型等。

参考文献:

- [1] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [2] 陈士俊, 张俊霞, 李莉. 工程渗流有限元计算方法研究[J]. 人民黄河, 2000, 22(9): 34-36.
- [3] 介玉新, 揭冠周, 李广信. 用适体坐标变换方法求解渗流[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 52-56.
- [4] 黄蔚, 刘迎曦, 周承芳. 三维无压渗流场的有限元算法研究[J]. 水利学报, 2001(6): 33-36.
- [5] BALLOFFET A, SCHEFFLER M. Numerical analysis of Teton

- dam failure flood[J]. J of Hydraulic Research ,1982 ,20(4) : 317-328.
- [6] 陈洪凯 ,唐红梅 ,张录坤 . 渗流自由面求解的基本方法、修正及应用 [J]. 重庆交通学院学报 ,1997 ,16(3) 5-10.
- [7] 李春华 . 稳定渗流有限元计算时采用固定网格的初步研究 [C] / 刘子方 . 第三届全国渗流力学讨论会论文汇编 (3). 武汉 : 长江科学院 ,1986 67-75.
- [8] 王贤能 ,黄润秋 . 有自由面渗流分析的高斯点法 [J]. 水文地质工程地质 ,1997 1(2) 1-4.
- [9] 舒仲英 ,邓建霞 ,李龙国 . 加密高斯点单元传导矩阵调整法在有自由面渗流分析中的应用 [J]. 四川大学学报 : 工程科学版 ,2007 39(1) 48-52.
- [10] 速宝玉 ,郭洪兴 ,詹美礼 . 非稳定渗流用截止负压法求解的研究 [J]. 岩土工程学报 ,1999 21(6) 711-714.
- [11] 张乾飞 ,吴中如 . 有自由面非稳定渗流分析的改进截止负压法 [J]. 岩土工程学报 ,2005 27(1) 48-54.
- [12] 张有天 ,陈平 ,王镭 . 有自由面渗流分析的初流量法 [J]. 水利学报 ,1988(8) 18-26.
- [13] 王媛 . 求解有自由面渗流问题的初流量法的改进 [J]. 水利学报 ,1997(3) 68-73.
- [14] 梁业国 ,雄文林 ,周创冰 . 有自由面渗流分析的子单元法 [J]. 水利学报 ,1997(8) 34-38.
- [15] 吴梦喜 ,张学勤 . 有自由面渗流分析的虚单元法 [J]. 水利学报 ,1994(8) 67-70.
- [16] 彭华 ,曹定胜 ,王家荣 ,等 . 有自由面渗流分析的弃单元法及其应用 [J]. 人民长江 ,1997 28(8) 38-40.
- [17] 凌道盛 . 有自由面渗流分析的虚节点法 [J]. 浙江大学学报 : 工学版 ,2002 36(3) 243-246.
- [18] 张宜虎 . 采用等效渗透系数法搜索渗流自由面 [J]. 工程地质学报 ,2004 12(2) 187-192.
- [19] 党发宁 ,王晓章 ,郑忠安 ,等 . 有自由面渗流分析的变单元渗透系数法 [J]. 西北水力发电 ,2004 20(1) 1-3.
- [20] 郑宏 ,戴会超 ,刘德富 . 改进的有自由面渗流问题的 Bathe 算法 [J]. 岩土力学 ,2005 26(4) 505-512.
- [21] 曹文贵 ,胡坚丽 ,卢山 . 加权截距法确定渗流自由面的有限元方法探讨 [J]. 湖南大学学报 : 自然科学版 ,2006 ,33(2) 6-9.
- [22] 李连侠 ,廖华胜 ,刘达 ,等 . 渗流计算中求解浸润面的自适应网格方法 [J]. 四川大学学报 : 工程科学版 ,2006 38(5) 76-81.
- [23] 李宝元 ,任亮 . 求解带自由面渗流问题移动网格法的改进及其工程应用 [J]. 计算力学学报 ,2007 24(3) 370-374.
- [24] NIWA A ,CLOUGH R W . Non-linear seismic response of arch dams [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics ,1982 10 267-281.
- [25] 柴军瑞 ,仵彦卿 . 采用边界元法确定渗流自由面的一种改进方法 [J]. 陕西水力发电 ,2003 16(1) 11-12.
- [26] 薛馨 ,金吾根 ,李珏 ,等 . Trefftz 直接法解渗流自由面问题 [J]. 岩土力学与工程学报 ,2005 24(13) 2322-2326.
- [27] BELYTSCHKO T . Element-free Galerkin methods [J]. Int J Num Meth Eng ,1994 37(6) 229-256.
- [28] 周维垣 ,寇晓东 . 无单元法及其工程应用 [J]. 力学学报 ,1998 30(2) 193-202.
- [29] 曾清红 ,卢德唐 ,齐岩 . 无网格法求解稳定渗流问题 [J]. 计算力学学报 ,2003 20(4) 440-445.
- [30] 李广信 ,葛锦宏 ,介玉新 . 有自由面渗流的无单元法 [J]. 清华大学学报 : 自然科学版 ,2002 42(11) 1552-1555.
- [31] 葛锦宏 ,李广信 ,介玉新 . 无单元法在有自由面渗流计算中的应用 [J]. 计算力学学报 ,2003 20(2) 241-243.
- [32] 李晓春 . 小湾水电站坝肩岩体裂隙网络渗流的三维网络与无网格法耦合模型研究 [D]. 长春 : 吉林大学 ,2005.
- [33] 沈振中 ,陈小虎 ,孙粤琳 . 用罚函数无单元法分析有自由面的稳定渗流场 [J]. 西安石油大学学报 : 自然科学版 ,2007 22(2) 92-95.

(收稿日期 2008-03-17 编辑 : 高建群)

(上接第 158 页)

f. 报表打印模块。该模块可实现 3 种报表打印 ①打印每次测流时各测点的流速、总流量和水深 ②打印每天的流速、流量、水深统计表 ③打印每月的放水天数、流速、流量及水深统计表。

g. 通讯模块。该模块接收数据传输电台传来的 PLC 实时采集的数据 ,并将运行方式的设定信息发至 PLC ,完成铅鱼手动和自动控制 ,同时负责指令的校验工作 ,确保接收指令的正确性。

4 结 语

该系统现已在吴堡水文站投入使用 ,使用情况

表明 :系统性能良好、运行稳定、操作简便、实用性强、测验精度符合水文规范要求 ,具有较高的社会效益和经济效益 ,对水文测验设备的控制具有普遍的使用价值和广阔的应用前景。

参考文献 :

- [1] 廖常初 . PLC 编程及应用 [M]. 北京 : 机械工业出版社 ,2006.
- [2] SIEMENS AG . SIMATIC S7-200 可编程序控制器系统手册 [R]. 北京 : 西门子中国公司 ,2002.
- [3] SIEMENS 公司 . MICROMASTER420 通用型变频器使用大全 [R]. 北京 : 西门子中国公司 ,2003.

(收稿日期 2008-04-01 编辑 : 方宇彤)