

FEPG 软件在渗流分析中的应用

娄一青^{1,2}, 陈 睿^{1,2}, 金永强^{1,2}

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要 :应用 FEPG 软件自动生成渗流计算程序,并将该程序应用于三维渗流场分析中.在稳定渗流计算时,采用死活节点法迭代求解自由面,并对该方法进行了改进;在饱和-非饱和渗流计算时,对计算参数加以适当的处理,采用合适的时间差分格式求解方程.算例表明,将 FEPG 应用于渗流分析是可行的.

关键词 :FEPG 软件;稳定渗流;死活节点法;自由面;饱和-非饱和渗流

中图分类号 :TV697.3 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2008)02-0203-06

许多水利工程都存在着渗流的问题,该问题直接影响着水利工程的安全,因此,对工程区渗流场的模拟和分析至关重要.目前,工程界广泛采用有限元法对渗流场进行模拟分析.

FEPG(finite element program generator)是一款国产有限元程序自动生成系统,其主要设计思想是采用元件化的程序设计方法和有限元语言,根据有限元方法的数学原理及其内在规律,以类似于数学公式推理的方式,由有限元问题的微分方程表达式及其求解算法自动产生有限元程序.用户只需输入有限元方法所需的各种表达式和公式,即可自动产生所需的全部有限元程序,免去了大量、繁琐的有限元编程劳动,并保证了程序的正确性和统一性.本文结合 FEPG 软件生成了渗流有限元分析相应的计算程序,并进行了算例分析.

1 渗流计算原理

1.1 稳定渗流问题

1.1.1 稳定渗流数学模型

根据质量守恒原理以及广义达西定律,各向异性多孔介质中稳定渗流的控制方程和定解条件为^[1]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + Q = 0 & (x_i \in \Omega) \\ h = h_0 & (x_i \in \Gamma_1) \\ -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i = q_0 & (x_i \in \Gamma_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: Ω ——渗流计算域; h ——总水头函数; Γ_1 ——已知水头边界; h_0 ——已知水头; Γ_2 ——已知流量边界; q_0 ——已知流量; k_{ij} ——介质渗透张量; Q ——源汇项; n_i ——边界外法线方向余弦; x_i ——直角坐标.

1.1.2 稳定渗流有限元法格式

将式(1)写成积分形式为

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + Q \right] \delta h d\Omega = 0 \quad (2)$$

由分部积分公式^[2]并结合定解条件,将式(2)化为虚功方程弱形式,可得

$$\int_{\Omega} k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \frac{\partial \delta h}{\partial x_i} d\Omega = \int_{\Omega} Q \delta h d\Omega + \int_{\Gamma_2} q_0 \delta h d\Gamma_2 \quad (3)$$

收稿日期:2007-05-11

基金项目:国家科技支撑计划课题(2006BAC14B03);国家自然科学基金雅砻江水电开发联合研究基金重点项目(50539110);国家自然科学基金(50539030-1-3);国家重点基础研究发展计划“973”计划(2002CB412707)

作者简介:娄一青(1981—),男,浙江仙居人,博士研究生,主要从事水工结构安全方面的研究.

式中 δh 为水头的虚位移.

对渗流研究区域进行单元离散,单元内总水头插值函数取为

$$h = N_m h_m \quad (4)$$

式中 m ——单元节点数; h_m ——单元节点 m 的总水头; N_m ——单元节点 m 的形函数.

由 Galerkin 加权余量法可得求解渗流场的有限元法矩阵方程为

$$Kh = F \quad (5)$$

其中

$$K = \sum_{e=1}^n \int_{\Omega_e} k_{ij} \frac{\partial N_m}{\partial x_j} \frac{\partial N_n}{\partial x_i} d\Omega \quad F = - \sum_{e=1}^n \int_{\Gamma_2^e} q_0 N_n d\Gamma$$

1.2 饱和-非饱和渗流问题

1.2.1 饱和-非饱和渗流数学模型

多孔介质饱和-非饱和渗流控制方程为^[1]

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} k(h_p) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + Q = (\alpha(h_p) + \beta S_s) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

其中

$$h = h_p + z$$

式中 $k(h_p)$ ——介质相对渗透率,在饱和区为 1,非饱和区介于 0~1 之间; h ——总水头; h_p ——压力水头; z ——位置水头; $\alpha(h_p)$ ——容水度,在饱和区为 0,非饱和区为 $\partial \theta / \partial h_p$ (θ 为体积含水量); β ——选项系数,在饱和区为 1,非饱和区为 0; S_s ——饱和土体单位贮水率,在饱和区为一常数,非饱和区为 0; t ——时间变量.

以上方程的定解条件如下^[3].

$$\text{初始条件:} \quad h(x_i, t_0) = h_0(x_i, t_0) \quad (7)$$

$$\text{边界条件:} \quad h(x_i, t)|_{\Gamma_1} = h_1(x_i, t) \quad (8)$$

$$- \left[k_{ij} k(h_p) \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i \right] |_{\Gamma_2} = q_0 \quad (9)$$

$$- \left[k_{ij} k(h_p) \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i \right] |_{\Gamma_3} \geq 0 \quad \text{且} \quad h|_{\Gamma_3} = z \quad (10)$$

$$- \left[k_{ij} k(h_p) \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i \right] |_{\Gamma_4} = q_0 \quad \text{且} \quad h|_{\Gamma_4} < z \quad (11)$$

式中 t_0 ——初始时刻; Γ_3 ——饱和逸出面边界; Γ_4 ——非饱和逸出面边界; q_0, q_0 ——边界面法向流量,向外为正.

1.2.2 饱和-非饱和渗流有限元法格式

将式(6)写成积分形式为

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} k(h_p) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + Q - (\alpha(h_p) + \beta S_s) \frac{\partial h}{\partial t} \right] \delta h d\Omega = 0 \quad (12)$$

由分部积分公式,结合方程定解条件,将式(12)化为虚功方程弱形式,可得

$$\int_{\Omega} \left[(\alpha(h_p) + \beta S_s) \frac{\partial h}{\partial t} \delta h + k_{ij} k(h_p) \frac{\partial h}{\partial x_j} \frac{\partial \delta h}{\partial x_i} \right] d\Omega = \int_{\Omega} Q \delta h d\Omega + \int_{\Gamma_2} q_0 \delta h d\Gamma \quad (13)$$

对渗流研究区域进行单元离散,单元内总水头插值函数取为

$$h = N_m h_m \quad (14)$$

由 Galerkin 加权余量法可得求解渗流场的有限元法矩阵方程为

$$Kh + M \frac{\partial h}{\partial t} = F \quad (15)$$

$$K = \sum_{e=1}^n \int_{\Omega_e} k_{ij} k(h_p) \frac{\partial N_m}{\partial x_j} \frac{\partial N_n}{\partial x_i} d\Omega \quad M = \sum_{e=1}^n \int_{\Omega_e} (\alpha(h_p) + \beta S_s) N_m N_n d\Omega \quad F = - \sum_{e=1}^n \int_{\Gamma_2^e} q_0 N_n d\Gamma - \sum_{e=1}^n \int_{\Gamma_4^e} q_0 N_n d\Gamma$$

1.2.3 非稳定时间差分格式

式(15)为抛物线形方程,当用有限元法求解时,存在稳定性的问题.而全隐式向后差分格式在减小解的振荡方面较好,因此采用该差分格式来求解饱和-非饱和渗流问题.

式(15)关于时间 t 的常微分方程积分为

$$\int_t^{t+\Delta t} \mathbf{K} \mathbf{h} dt + \int_t^{t+\Delta t} \mathbf{M} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} dt = \int_t^{t+\Delta t} \mathbf{F} dt$$

(16)

由此可得有限元全隐式向后差分格式为

$$\left(\mathbf{K} + \frac{\mathbf{M}}{\Delta t} \right) \mathbf{h}_{t+\Delta t} = \frac{\mathbf{M}}{\Delta t} \mathbf{h}_t + \mathbf{F}$$

(17)

迭代求解式 (17). 迭代过程中 , 渗透张量按单元基质吸力进行调整 , 调整后的渗透张量再用于计算新的节点水头 , 重复上述步骤 , 直至每个单元相邻 2 个迭代步的水头差值小于允许误差为止 .

2 软件应用方法及计算中关键问题的处理

2.1 软件应用流程

FEPG 采用元件化技术来实现有限元计算程序的自动生成 , 其中对程序的初始化、计算边值条件和求解代数方程组由系统直接给出 , 而对于单元的计算和结果的后处理则由用户书写的表达式文件来生成 . 通常用户需要根据待求问题的虚功方程弱形式 , 书写以下文件^[4] (a) 根据待求解方程的性质 , 确定算法文件 NFE ; (b) 书写用以生成单元计算程序的 PDE (VDE , FBC) 文件 (c) 书写 GCN 文件 , 给出计算场与算法文件之间的对应关系、不同场之间的耦合关系 , 以及计算的求解流程 (d) 书写 GIO 文件 , 给出计算场与 PDE (VDE) 文件之间的对应关系以及采用的单元类型、单元积分方式和总体坐标系统 .

准备好以上文件之后 , 经 FEPG 系统命令 GIO 编译 , 可生成若干文件和 Fortran 源程序 . 针对不同的问题 , 需要适当地修改编译 Fortran 程序以及前处理 PRE 文件 . 通过 FEPG 系统对这些文件和 Fortran 程序的组合 , 即可生成有限元计算程序 , 用以对具体的问题进行计算分析 . 分析中前后处理均在 GIO 中完成 . FEPG 应用流程见图 1 .

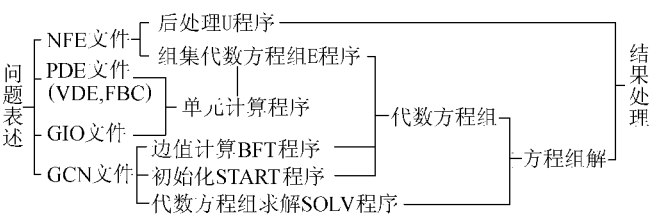


图 1 FEPG 应用流程

Fig.1 Application flowchart of FEPG

2.2 稳定渗流自由面的确定

在实际工程中 , 大多数情况都存在着无压渗流问题 , 在该类问题中 , 渗流自由面是未知的 , 属于非线性边界问题 , 需要在计算中通过反复迭代来逼近实际渗流自由面 . 目前在使用有限元法求解该类问题时常用的方法有两大类 : 固定网格法和变网格法 , 其中变网格法通过调整有限元网格来逼近实际渗流域 . 但该方法容易使网格产生畸形 , 且不易处理渗流介质分层情况 ; 在考虑渗流与应力耦合时 , 无法用同一套网格来计算应力和渗流 . 为了解决这些问题 , 许多学者致力于用固定网格法来进行渗流分析 . 自从 Neuman 于 1973 年提出求解自由面的 Galerkin 法以后 , 国内外许多学者陆续提出了多种固定网格算法^[4-10] , 如剩余流量法、初流量法、虚单元法、单元渗透矩阵调整法、结点虚流量法、截止负压法等 .

文献 [11] 采用死活节点法来迭代求解渗流自由面 , 其基本原理是 : 迭代初始先假定计算网格的表面为浸润面 , 每步迭代重新组集刚度矩阵 , 利用上一步计算的节点水头 h 与坐标 z 的关系进行比较 . 如果 $h < z$, 取刚度接近于零 ; 如果 $h \geq z$, 则按实际的渗透参数计算刚度矩阵 , 整体求解 , 直至迭代收敛为止 , 计算误差与单元的剖分密切相关 .

本文采用死活节点法来求解自由面 , 并进行如下改进 : 自由面以下单元的节点作为“活”节点 , 按实际的刚度来计算 ; 自由面以上单元的节点作为“死”节点 , 令刚度接近于零 . 被自由面穿过的单元作为过渡单元 . 自由面以下部分按实际渗透参数计算 ; 自由面以上部分的渗透参数取 1 个小值 (一般取实际值的 1/1 000) 来进行计算 . 重组刚度矩阵 , 整体进行求解 , 经反复迭代后 , 即可求得自由面的位置 . 改进死活节点法对自由面上、下区域渗透参数的调整为

$$k'_{ij} = \begin{cases} \varepsilon_1 k_{ij} & h - z < - \varepsilon_2 \\ 0.001 k_{ij} & - \varepsilon_2 \leq h - z < 0 \\ k_{ij} & h - z \geq 0 \end{cases}$$

(18)

式中 : k'_{ij} ——调整后的渗透张量 , $i, j = 1 \sim 3$; k_{ij} ——真实渗透张量 ; ε_1 ——接近于零的正数 ; ε_2 ——小正数 ; h ——节点水头 ; z ——节点高程 .

由于自由面在开始计算时并不确定 , 因而逸出点也是未知的 , 这就决定了逸出面和自由面一样 , 需要在

计算过程中通过反复迭代来最终确定。目前常用的处理方法有2种(a)将整个逸出面视为已知水头边界,水头取为节点高程,求得中间解后通过判断逐步将已知水头边界条件转为不透水边界条件(b)先将所有可能逸出面上的节点视为不透水的流量边界条件,在迭代求出中间解之后,通过判断逐步将位于真实逸出面上的节点全部从不透水边界条件的假定中转化成透水边界条件。文中采用第1种方法,即假定在最高水位线以下的未知水头边界全部为饱和逸出面边界,通过迭代最终确定逸出面的位置。

采用以上方法来迭代求解无压稳定渗流场,计算域内节点水头应满足以下收敛条件

$$\max_i |h_i^{(k)} - h_i^{(k-1)}| \leq \varepsilon_3 \quad (i = 1, 2, \dots, np) \quad (19)$$

式中: h_i —— i 节点的水头; k ——迭代次数; ε_3 ——小正数; np ——计算网格节点总数。

2.3 饱和-非饱和渗流计算参数的处理

h_p - θ - k_r 三者的函数关系通常由有限的试验数据经过插值求得。然而在计算 $\partial\theta/\partial h_p$ 时,该方法易导致 $\partial\theta/\partial h_p$ 不连续而呈阶梯状,进而在计算中产生振荡现象。因此,在计算 $\partial\theta/\partial h_p$ 时,文献[12]作如下处理:

$$\frac{\partial\theta}{\partial h_p} = \frac{\theta(h_{p1}) - \theta(h_{p0})}{\xi(h_{p1})h_{p1} - \xi(h_{p0})h_{p0}} \quad (20)$$

当 h_{p1}, h_{p0} 均小于0时,或 h_{p1}, h_{p0} 中有1个小于0而另1个大于0时, $\partial\theta/\partial h_p$ 的值根据式(20)确定;当 h_{p1}, h_{p0} 均大于0时, $\partial\theta/\partial h_p = 0$;当 $h_p = 0$ 时, $\xi(h_p) = 1$,否则, $\xi(h_p) = 0$ 。 $\theta(h_p)$ 可根据插值确定。

3 计算实例

3.1 矩形坝体

某均质矩形坝体如图2所示。上游水深6m,下游水深1m。图中 OA 和 DE 分别为上下游已知水头边界; OE 为不透水边界; BD 为可能逸出边界。经反复迭代计算后最终确定 CD 为逸出面; AC 为自由面边界,在该边界上水头等于高程,流量为零。

由于求解稳定渗流场的有限元法矩阵方程(式(5))为椭圆形方程,因此采用FEPC算法库中提供的求解非线性椭圆形方程算法程序NELL.NFE来求解。在GCN文件中,设置成存单刚的方式“solvc”求解渗流场,求解器采用非对称的直接法。在GIO文件中,选择“c8g2”作为单元类型积分方式,即采用2阶高斯积分方法对8节点六面体单元进行积分。方程组中的刚度矩阵要通过单元计算组集得到,而单元计算刚度矩阵的表达式由PDE文件定义。PDE文件中描述单元刚度矩阵和单元荷载向量部分如下:

```
9  stif
10 $ c6 pk1x = pkx.....
16 $ c6 em = 0.0
17 $ c6 if((un-z).lt.( - ε2 )) then
18 $ c6 pk1x = 0.0 * pkx.....
24 $ c6 em = 1.0d - 8
25 $ c6 endif
26 $ c6 if((un-z).ge.( - ε2 ).and.(un-z).lt.0.0) then
27 $ c6 pk1x = (1.0d - 3) * pkx .....
33 $ c6 em = 0.0
34 $ c6 endif
35 dist = [ u/x ; u/x ] * pk1x + [ u/y ; u/x ] * pk1xy + [ u/z ; u/x ] * pk1zx + [ u/x ; u/y ] * pk1xy + [ u/y ; u/y ]
* pk1y
36 + [ u/z ; u/y ] * pk1yz + [ u/x ; u/z ] * pk1xz + [ u/y ; u/z ] * pk1yz + [ u/z ; u/z ] * pk1z + [ u ; u ] * em
37 ( 空一行 )
38 load = -[ u ] * eq
```

以上语句中,10~34为定义死活节点控制的Fortran语句,即根据式(18)对渗透参数进行调整,其中10~16定义单元渗透张量 $pkx, pky, pkz, pkxy, pkxz, pkzy$,17~25通过对节点水头与高程的比较来定义要“杀死”的节点,26~34通过节点水头、高程以及单元信息来定义过渡单元,将过渡单元中自由面以上部分节点“激

活”,并将其渗透参数定义为实际渗透参数的 $1/1000$ [35,36] 为单元刚度矩阵的计算表达式 [38] 为单元荷载向量计算表达式,其中 e_q 为源汇项。

准备好 NFE、PDE(FBC)、GCN 和 GIO 文件并提交后,自动生成若干相关 Fortran 程序。根据具体问题的需要对生成的程序进行适当的修改,比如在 bft.for 程序中增加以下内容:根据上一步迭代计算结果,确定该步的自由面和出渗点位置,进行收敛性判断,修改可能逸出边界条件,重新组集方程组。程序在一次次的迭代过程中,通过不断修正可能逸出面边界来迭代求解自由面和逸出面。稳定渗流计算程序生成后,对该问题进行有限元计算分析。

对计算区域进行有限元离散,离散后的网格如图 2 所示,共剖分 384 个单元,850 个节点。渗流分析结果见图 3。表 1 为本文计算的自由面位置和甘油模型试验值的比较。由图 3 和表 1 可见,采用 FEPG 软件的死活节点法处理自由面计算得到的渗流场总体上是令人满意的。在水平位置 3.0 m 以及逸出点处误差相对较大,可通过局部加密该部位的网格来减小这一误差。应用 FEPG 软件自动生成有限元计算程序来分析稳定渗流是可行的,既能减少编写有限元程序的工作量,又能保证一定的计算精度。

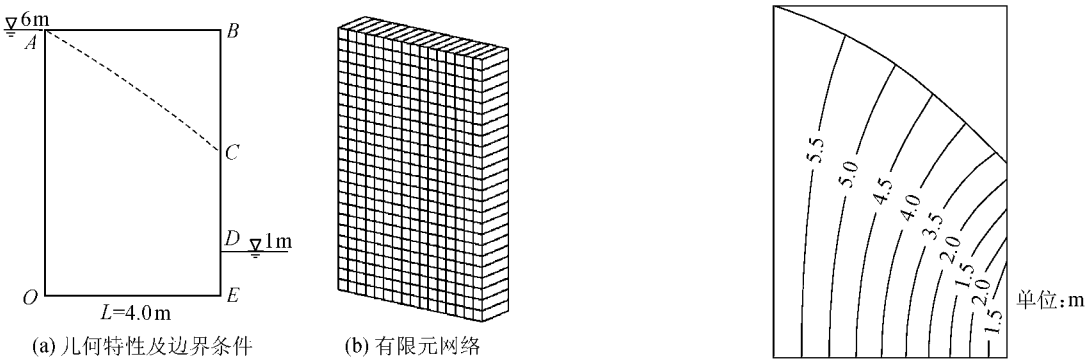


图 2 坝体模型几何特性、边界条件及有限元网格

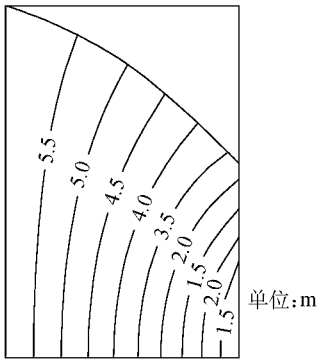


图 3 渗流场分布

Fig.2 Geometrical property , boundary condition and FEM mesh of the dam model Fig.3 Distribution of seepage field

3.2 砂槽模型

以文献 [13] 中介绍的赤井浩-砂槽模型为例验证饱和-非饱和渗流程序。砂槽模型长 315 cm,宽 23 cm,高 33 cm。模型材料为均匀砂,孔隙率为 0.44,饱和渗透系数为 0.33 cm/s。非饱和砂土的饱和度、负压和相对渗透系数关系见表 2。初始条件采用上下游水位均为 10 cm 的平衡态,在 0 s 时刻,上游水位骤升至 30 cm。对砂槽模型进行有限元离散,沿宽度方向剖分 5 层单元,共剖分 3200 个单元,4158 个节点,离散后的网格如图 4 所示。

表 1 矩形坝体自由面位置对比
Table 1 Comparison of the position of the free surface of the rectangular dam

水平位置/m	自由面位置/m		误差百分比/%
	甘油实验	本文计算	
0.0	6.00	6.00	0.00
0.5	5.82	5.83	0.17
1.0	5.63	5.61	0.36
1.5	5.37	5.36	0.19
2.0	5.10	5.07	0.59
2.5	4.74	4.69	1.05
3.0	4.38	4.27	2.51
3.5	3.82	3.81	0.26
4.0	3.25	3.31	1.85

表 2 砂土的非饱和水力参数
Table 2 Unsaturated hydraulic parameters of sand

饱和度	负压/kPa	相对渗透系数
1.00	0.000	1.00
0.82	0.325	0.97
0.64	0.650	0.94
0.50	0.940	0.20
0.45	1.000	0.13
0.18	10.000	0.01

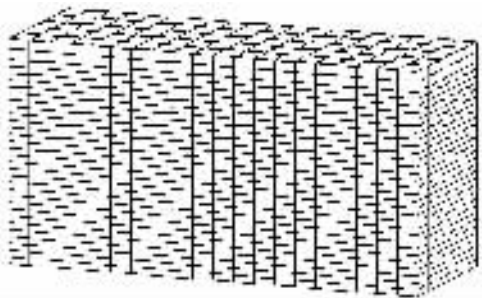


图 4 砂槽模型有限元网格

Fig.4 FEM mesh of the sand launder model

饱和-非饱和渗流的控制方程为抛物形方程,当采用有限元法求解时,存在稳定性的问题。本文采用全隐式向后差分格式对时间进行离散,调用 FEPG 算法库中的 NPARB、NFE 算法文件,在 GCN 文件中选择“solvsin”不存单刚的方式求解渗流场,求解器采用对称的直接法。在 GIO 文件中,选择采用 2 阶高斯积分方法对 8 节点六面体单元进行积分。根据虚功方程弱形式 [13] 在 PDE 文件中定义单元质量矩阵 M 、刚度矩阵 K 和荷载向量 F 的计算表达式。在 PDE 文件中添加 Fortran 子程序,由表 2 建立 $k_{ij}k_r \sim h_p$ 的函数关系,计算容水度 $\alpha(h_p)$ 。

准备好必要的文件后,由系统自动组合生成饱和-非饱和渗流计算程序,对该问题进行有限元计算分析.计算得到的各典型时刻自由水面数值解见图5.由图5可见,在计算初期结果略微有振荡,振荡现象发生在接近初始平衡水位处,10 cm高程向上2层单元范围之内.发生这种现象的原因可能是(a)饱和-非饱和渗流是一个高度非线性问题(b)计算中采用的材料函数由有限的几个离散点插值而成(c)上游水位由10 cm骤升至30 cm等.在计算中可以通过调整时间步长、加密相应部位有限元网格、以合适的土-水特性模型来代替简单的线性插值等方法来减小振荡.随着计算时间的延长,振荡现象逐渐消失,自由水面变得平滑.总体而言,本次饱和-非饱和渗流计算结果较为合理.

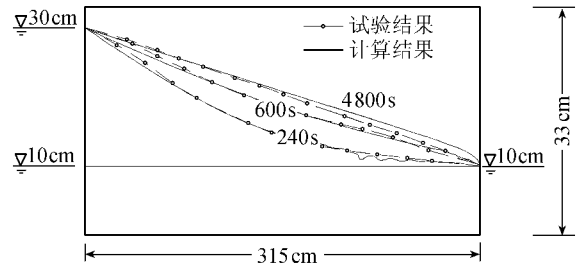


图5 砂槽模型自由水面数值解

Fig.5 Free surface solution of sand launder model

4 结 语

本文介绍了有限元程序自动生成系统 FEPG 的基本原理,并将该软件应用于渗流计算分析中.在计算稳定渗流时,采用死活节点法迭代求解自由面;在计算饱和-非饱和渗流时,对计算参数进行适当的处理,采用全隐式向后差分格式求解抛物形方程.对文中2个算例的计算结果表明,将 FEPG 应用于渗流计算分析是可行的,但在计算饱和-非饱和渗流时,如何模拟降雨入渗等问题还有待进一步研究. FEPG 软件具有高性能并行计算能力,计算效率高,将其应用于渗流分析中,通过加密模型网格的方法,可提高计算的精度.

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,1990.
- [2] 基于 FEPG 的有限元方法[R]. 北京:火箭软件有限公司,2003:3-4.
- [3] 朱岳明,龚道勇. 三维饱和非饱和渗流场求解及其逸出面边界条件处理[J]. 水科学进展,2003(1):67-71.
- [4] 有限元程序自动生成系统 FEPG 用户培训讲义[R]. 北京:火箭软件有限公司,2003:16-39.
- [5] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998:251-255.
- [6] 张有天,陈平,王镭. 自由面渗流分析的初流量法[J]. 水利学报,1988,29(8):18-26.
- [7] 吴梦喜,张学勤. 有自由面渗流数值分析的虚单元法[J]. 水利学报,1994(8):67-71.
- [8] 朱军,刘光延. 改进的单元渗透矩阵调整法求解无压渗流场[J]. 水利学报,2001(8):49-52.
- [9] 速宝玉,朱岳明. 不变网格确定渗流自由面的节点虚流量法[J]. 河海大学学报,1991,19(5):113-117.
- [10] 速宝玉,沈振中,赵坚. 基于变分不等式理论的截止负压法[J]. 水利学报,1997(3):22-29.
- [11] 周永发,贾峰,李金光,等. 索风营水电站地下厂房围岩稳定性三维有限元分析[C]//首届 FEPG 用户年会论文集. 北京:火箭软件有限公司,2003:103-115.
- [12] 荣冠,张伟,周创兵. 降雨入渗条件下边坡岩体饱和非饱和渗流计算[J]. 岩土力学,2005,26(10):1545-1550.
- [13] 高骥,雷光耀,张锁春. 堤坝饱和-非饱和渗流的数值分析[J]. 岩土工程学报,1988,10(6):28-37.

Application of FEPG in the seepage analysis

LOU Yi-qing^{1,2}, CHEN Rui^{1,2}, JIN Yong-qiang^{1,2}

(1. College of Water Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China)

Abstract: The seepage computation program, which is automatically generated by FEPG software, is used in 3D seepage field analysis. In steady seepage analysis, the free surface is obtained from integrative calculation of the improved live and dead node method. Based on the appropriate processing of parameters, the equation is solved by a suitable finite difference scheme for saturated-unsaturated seepage analysis. Some examples show that FEPG is applicable to seepage analysis.

Key words: FEPG software; steady seepage; live and dead node method; free surface; saturated-unsaturated seepage