

Marc 软件在分析渗流场和渗流力中的应用

黄耀英, 沈振中, 吴中如

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 基于固定网格法, 采用 Marc 软件中的死活单元技术和折减过渡单元的虚区高斯点渗透系数的方法对渗流场进行研究, 用得到的结点水头值分析渗流力. 对比水荷载分别作为面荷载和体荷载(渗流力)的工况, 可以看出, 虽然水荷载作为面荷载时, 其在水平方向上的合力与水荷载作为体荷载时的水平向渗流力近似相等, 但由于结构是变形体, 合力大小相等的作用力如果分布形式不同, 其最后的结果仍然有的较大差异.

关键词 Marc 软件 渗流场 渗流力 水荷载 面荷载
中图分类号 TV139.14 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2006)05-0509-04

无压渗流问题在许多水利工程中存在, 其问题的关键在于确定自由面和渗出面. 由于自由面和下游坝面渗出点的位置都是事先未知的, 所以需要采用迭代的方法来求解, 其中有限元法常采用变网格法和固定网格法等进行分析. 由于变网格法容易产生单元畸变, 使解失真, 近年来国内外许多学者致力于固定网格法的研究. 根据迭代方法的不同, 固定网格法^[1-5]又分为单元传导矩阵修改法、剩余流量法、初流速(量)法、结点虚流量法和截止负压法等. 目前, Marc, Ansys 等商业软件已逐渐应用于水利土木工程中, 但有关这些软件在渗流分析中的运用报道较少. 文献[6]采用 Marc 软件中的死活单元技术和自适应网格技术对混凝土坝的渗透系数进行了遗传算法反演分析. 虽然采用自适应网格技术能获得更光滑、更精确的自由面, 但是计算得到的结点水头不能直接用来分析作用在结构上的渗流力. 为此, 本文基于固定网格法, 采用死活单元技术和折减过渡单元虚区高斯点渗透系数的方案对渗流场进行研究, 对比分析了将水荷载分别作为面荷载和体荷载(渗流力)对结构的影响, 结合 Marc 软件开发了相应的计算程序.

1 基本原理

1.1 渗流场分析理论

忽略毛细现象、非饱和部分和蒸发的影响, 稳定渗流场的控制方程为

$$\begin{aligned} \nabla [k \cdot \nabla H] &= 0 \\ H &= p/(\rho_w g) + z \end{aligned} \tag{1}$$

式中: ∇ —— Hamilton 算子; k —— 渗透张量; H —— 水头函数; p —— 渗流场压力分布函数; ρ_w —— 水的密度; z —— 铅直坐标.

常见的渗流场边界条件有如下几类. (a) 第一类边界: 即 Dirichlet 条件为 $H|_{\Gamma_1} = H(x, y, z)$. 该边界(Γ_1)的水头已知. (b) 第二类边界: 即 Neumann 条件为 $k \frac{\partial H}{\partial n}|_{\Gamma_2} = q(x, y, z)$. 该边界(Γ_2)的流量已知. (c) 自由面及溢出面边界.

自由面 Γ_3 :
$$H|_{\Gamma_3} = z(x, y) \quad k \frac{\partial H}{\partial n}|_{\Gamma_3} = 0$$

渗出面 Γ_4 :
$$H|_{\Gamma_4} = z(x, y) \quad k \frac{\partial H}{\partial n}|_{\Gamma_4} \leq 0$$

式中: $q(x, y, z)$ —— 流量强度; n —— 外法线方向.

1.2 渗流力分析理论

设通过上述渗流场分析得到各结点的水头值,则单元水头函数 $H(x,y,z)$ 已知. 此时单元内任意点的渗透压力为

$$p(x,y,z) = \rho_w g [H(x,y,z) - z] \tag{2}$$

得到单元单位体积的渗流力 f_x, f_y 和 f_z 为

$$f_x = - \frac{\partial p(x,y,z)}{\partial x} \quad f_y = - \frac{\partial p(x,y,z)}{\partial y} \quad f_z = - \frac{\partial p(x,y,z)}{\partial z} \tag{3}$$

将式(3)代入式(2),并对单元体积进行积分,得到单元总渗流力 P_x, P_y 和 P_z 为

$$P_x = - \rho_w g \int_V \frac{\partial H(x,y,z)}{\partial x} dV \quad P_y = - \rho_w g \int_V \frac{\partial H(x,y,z)}{\partial y} dV \quad P_z = - \rho_w g \int_V \frac{\partial H(x,y,z)}{\partial z} dV + \rho_w g V \tag{4}$$

式中: V ——单元的体积; $\rho_w g V$ ——单元的浮力项.

2 渗流场分析

在 Marc 软件中,可将孔隙流体的方程与热传导的方程类比,按照处理热传导问题的数值方法求解渗流方程,即通过计算温度场的热传导模块来分析渗流场. 计算温度场和渗流场的不同之处在于后者需要确定自由面,此时可采用 Marc 软件提供的死活单元技术(子程序接口^[7-8] UACTIVE),比较单元高斯点的水头 H (或温度 T) 与高斯点的位置坐标 z . 如果单元所有的 $H(T)$ 均小于相应的 z ,那么将该单元‘杀死’(设置为虚区). 对于部分高斯点在虚区、部分高斯点在实区的过渡单元,则利用各向异性热传导矩阵的子程序接口^[7] ANKOND,通过折减在虚区高斯点的热传导系数(渗透系数)来获得较精确的计算值. 即对于过渡单元,采用 Bathe 提出的单元传导矩阵修正法^[1,4]: 当高斯点水头 $H \geq z$ 时, $k' = k$; 当高斯点水头 $H < z$ 时, $k' = k/1\,000$.

按照上述方案,对一典型算例进行分析,如图 1 所示. 可透水矩形坝体为 $4\text{ m} \times 1\text{ m} \times 6\text{ m}$,上游水深 6 m ,下游水深 1 m . 剖分的有限元网格大小为 $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z = 0.25 \times 1.0 \times 0.25$,渗透系数 $k_x = k_y = k_z$. 渗流分析结果见图 2,表 1 为本文计算的自由面位置和甘油模型实验值比较. 图 2 中水头值单位为 m .

由图 1,2 和表 1 可见,采用 Marc 死活单元技术和折减过渡单元虚区高斯点渗透系数相结合的方案,得到的渗流场是满意的. 本文还对过渡单元虚区高斯点渗透系数的不同折减程度(当 $H < z$ 时, $k' = k/10$ 或 $k' = k/100$ 或 $k' = k/1\,000$ 或 $k' = k/10\,000$)进行了试算. 试算发现,对过渡单元虚区高斯点渗透系数采用不同的折减系数时,高斯点计算水头值有波动的现象. 如高斯点 5(图 3)的 z 坐标为 3.697 m . 当 $k' = k/10$ 时,高斯点 5 对应的水头为 3.729 m ; 当 $k' = k/100$ 时,为 3.733 m ; 当 $k' = k/1\,000$ 时,为 3.728 m ; 当 $k' = k/10\,000$ 时,为 3.728 m . 虽然计算的水头值有一定的波动,但随着折减系数的加强,计算水头值渐趋稳定.

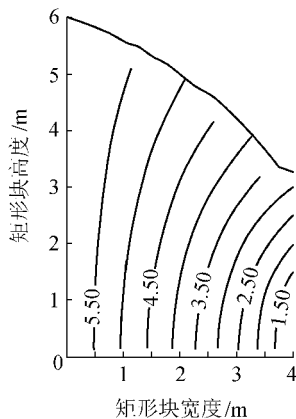


图2 渗流场等势线
Fig.2 Equipotential line
of seepage field

表 1 均质矩形坝体自由面位置对比

Table 1 Comparison of free surfaces of
homogeneous rectangular dam body m

x	甘油模型 实验值 ^[2]	本文 计算值
0	6.000	6.000
1.0	5.630	5.636
2.0	5.100	5.084
3.0	4.380	4.322
4.0	3.250	3.250

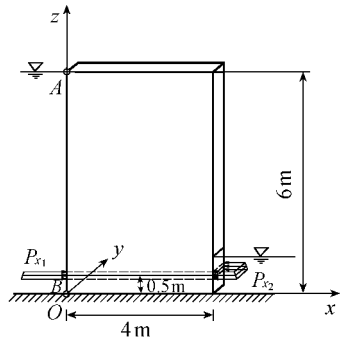


图1 算例示意图
Fig.1 Example of calculation

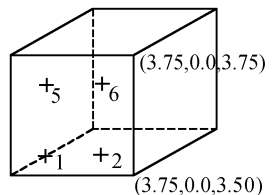


图3 单元高斯点示意图(单位: m)
Fig.3 Gauss points in element

3 渗流力分析

利用上述计算得到的结点渗流水头值,按 1.2 所述的理论编制相应的程序来获得渗流力引起单元结点的等效力,然后将该结点的等效力通过 Marc 软件提供的子程序接口^[7] FORCDT 施加在单元相应的结点上分析渗流力.

仍以上述算例为例.设矩形坝体的弹性模量为 10 GPa,泊松比为 0.2.结构分析有限元网格仍采用分析渗流场时的有限元网格.分 3 组工况进行比较.工况 1 冰荷载作为面荷载作用在 $x = 0$ 和 $x = 4\text{ m}$ 的表面上;工况 2 冰荷载作为体力(此时为渗流力)作用在结构上,仅考虑 x 向的渗流力, z 向渗流力为 0;工况 3 冰荷载作为体力(此时为渗流力)作用在结构上,考虑 x 向和 z 向的渗流力,不考虑自重和浮力.图 4 为 $x = 0, y = 0$ 的铅垂线上的位移和应力比较,表 2 为 $z = 0.5\text{ m}$ 处(图 1)由水平向渗流力转化的结点等效力和相应面荷载的比较.表 3 和表 4 为不同工况典型位置的位移和应力比较.应力以拉为正,压为负;位移和作用力的正负为坐标的正负.

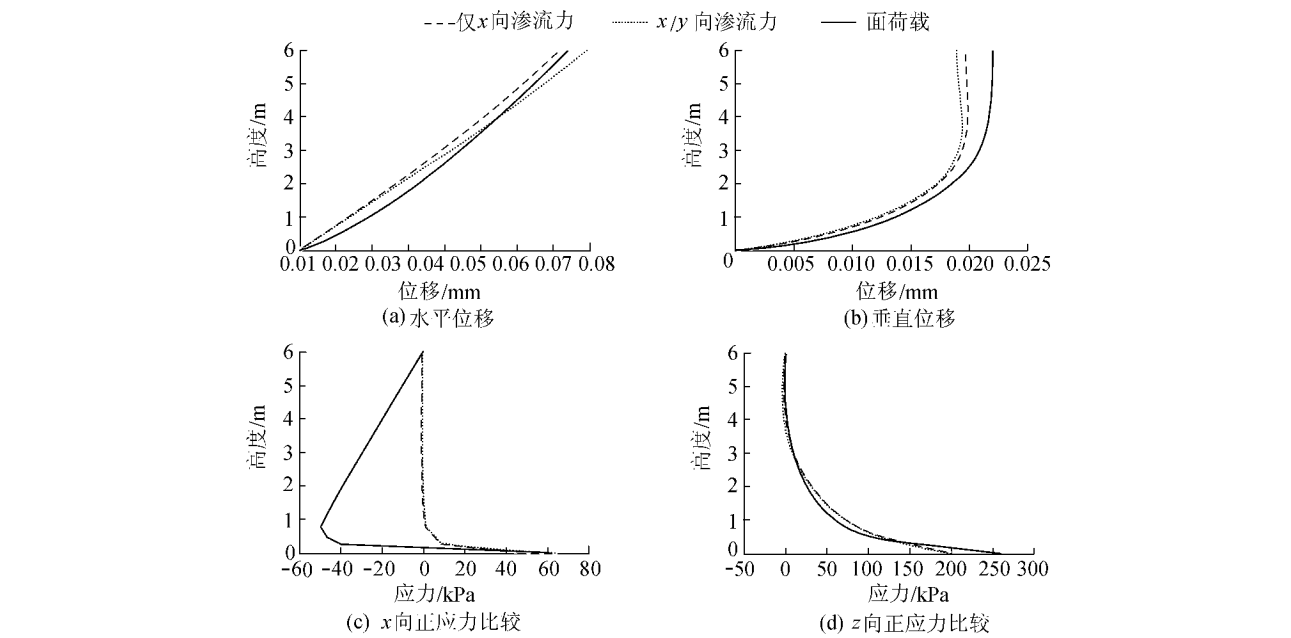


图 4 上游面不同计算工况比较
Fig.4 Comparison of different load-cases for upstream surface

a. 由图 1 和表 2~4 可见, $z = 0.5\text{ m}$ 处上游面上的水压力(此时为面力)为 13 475.0 N(取 1 个单元的高度 0.25 m 进行水压力计算),下游面上的水压力为 1 225.0 N,水压力差为 12 250.0 N,而 $z = 0.5\text{ m}$ 水平 1 排结点上的水平向等效结点合力为 6 125.0 N,2 排结点的水平向等效结点合力为 12 250.0 N.即冰荷载作为面荷载和渗流力在任一高度的水平向合力是近似相等的.但由于结构是变形体,虽然合力大小相等,如果力的分布形式不同,其最后的结果仍然有较大的差异.如,工况 1 和工况 2 的水平位移最大相对误差为 -48.81% (上游面 $z = 0.25\text{ m}$ 处),垂直位移最大相对误差为 -22.51% (上游面 $z = 0.25\text{ m}$ 处), x 向正应力最大相对误差为 -121.43% (上游面 $z = 0.25\text{ m}$ 处), z 向正应力最大相对误差为 303.99% (上游面 $z = 5.75\text{ m}$ 处).在顶部 A 处的水平位移和垂直位移的相对误差分别为 -3.39% 和 -10.36% , x 向和 z 向正应力的相对误差分别为 45.66% 和 -196.31% .

表 2 $z = 0.5\text{ m}$ 水平面上渗流力转化得到的水平向等效结点力
Table 2 Equivalent nodal force in horizontal direction obtained from seepage force in horizontal surface at $z = 0.5\text{ m}$

x/m	等效结点力/N	x/m	等效结点力/N
0	154.615	2.25	372.819
0.25	309.935	2.5	390.173
0.5	312.048	2.75	410.549
0.75	315.560	3	434.314
1	320.521	3.25	461.856
1.25	327.157	3.5	492.338
1.5	335.517	3.75	518.849
1.75	345.777	4	264.825
2	358.149		

表 3 不同工况上游面位移比较
Table 3 Comparison of upstream surface displacement under different load-cases

工况	水平位移/mm		垂直位移/mm	
	最大差值处	顶部 A 处	最大差值处	顶部 A 处
1	0.025 98	0.074 08	0.022 01	0.022 01
2	0.019 88	0.071 57	0.019 73	0.019 73

表 4 不同工况上游面应力比较
Table 4 Comparison of upstream surface stress under different load-cases

工况	x 向正应力/kPa			z 向正应力/kPa		
	最大差值处	顶部 A 处	底部 B 处	最大差值处	顶部 A 处	底部 B 处
1	-49.9	-0.219	65.8	264	0.244	264
2	1.01	-0.319	51.0	204	-0.235	204

注：最大差值处指 2 种工况差值的绝对值最大。

b. 水荷载作为面力或渗流力考虑,其引起结构 x,z 向变形的总体数值和规律较接近。

c. 水荷载作为面力或渗流力考虑,其引起结构 x 向正应力的差异很大.而当水荷载作为渗流力考虑时,其引起上游面“坝踵”处的拉应力有一定程度的减小.如水荷载作为面荷载时,“坝踵”处 x 向正应力为 65.8 kPa, z 向正应力为 264 kPa,而水荷载作为渗流力时,“坝踵”处 x 向正应力减为 51.0 kPa, z 向正应力减为 204 kPa.

4 结 语

- a. 基于固定网格法,采用 Marc 软件中的死活单元技术和折减过渡单元虚区高斯点渗透系数的方案对渗流场进行了研究,认为基于 Marc 软件进行渗流场分析是可行的。
- b. 利用渗流场分析得到的结点水头进行渗流力分析.对比分析了水荷载分别作为面荷载和体荷载对结构位移和应力的影响.认为虽然水荷载作为面荷载时,其在水平方向上的合力与水荷载作为体荷载时的水平向渗流力近似相等,但由于结构是变形体,合力大小相等的作用力,如果分布形式不同,其最后的结果仍然有较大的差异,这种差异对位移的影响小于对应力的影响。
- c. 基于 Marc 软件进行混凝土坝体和坝基排水孔效果的模拟还有待进一步研究。

参考文献：

[1] 朱伯芳.有限单元法原理与运用[M].北京:中国水利水电出版社,1998:251-255.

[2] 毛昶熙,段祥宝,李祖贻,等.渗流数值计算与程序应用[M].南京:河海大学出版社,1998:59-60.

[3] 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.

[4] 朱军,刘光廷.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.

[5] 沈振中,赵坚,吴玲莉.渗透参数的可变量差法[J].水电能源科学,1999,17(1):5-8.

[6] 傅志敏,向衍,周志芳.基于 Marc 的混凝土坝与坝基渗透系数反演[J].水利水运工程学报,2005(1):23-27.

[7] 陈火红.Marc 有限元实例分析教程[M].北京:机械工业出版社,2002:341-345.

[8] 陈火红,尹伟奇,薛小香.MSC Marc 二次开发指南[M].北京:科学出版社,2004:288-289.

Application of Marc software to analysis of seepage field and seepage force

HUANG Yao-ying, SHEN Zhen-zhong, WU Zhong-ru

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The seepage field is analyzed by use of the active and inactive element technique and the technique of adjusting permeability coefficient at Gauss points in transitional elements, and the seepage force is analyzed with the water head at each node of the seepage field. Then, the water load is taken as the surface load and the volume load, respectively, and the comparison of the two load-cases shows that, when the water load is taken as the surface load, its resultant force in direction x is close to the seepage force in the same direction when it is taken as the volume load. However, there are still great differences when the resultant of the action forces is the same, but the distributed forms are different due to the fact that the structure is a deformed body.

Key words Marc software; seepage field; seepage force; water load; surface load