

基于变分不等式的地下洞室渗流边界模拟

邓高阳, 肖 明, 陈俊涛

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘 要: Signorini 型变分不等式在求解有出渗点的渗流自由面问题时, 消除了出渗点的奇性, 克服了网格的依赖性。在迭代求解过程中多采用约束迭代法, 这种数学约束比较严格, 对于自由面穿过的单元计算不容易收敛, 会造成结果在两种解中震荡。笔者在变分不等式的基础上修改了迭代公式, 对数学约束进行了修改, 建立了变带宽的迭代方法。通过修改迭代算法提高了 Signorini 型变分不等式方法的数值稳定性, 同时减少了迭代时间。地下厂房开挖后地下水会从洞室的边墙渗出, 临界出渗点的确定对分析渗漏量和排水孔效果起到关键作用。通过对工程中开挖边界和排水孔边界的渗流计算模拟分析, 证明了改进迭代算法后的 Signorini 型变分不等式在复杂非线性强的三维渗流计算中收敛性较好。

关 键 词: 变分不等式; 变带宽迭代; 出渗; 边界条件

中图分类号: U 453.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 03-0762-07

Simulation of seepage boundary of underground cavern based on variational inequality

DENG Gao-yang, XIAO Ming, CHEN Jun-tao

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Signorini-type variational inequality has the advantage to eliminate the singularity of the infiltration point and to overcome the mesh dependency when solving the seepage free surface problem. Constraint iteration method is used in the iterative process, and the mathematical constraint is more stringent. For the free surface through the unit calculation, it is not easy to converge and even results in a shock between two kinds of solutions. On the basis of the variational inequality, the authors modify the iterative formula. The mathematical constraints are revised, and an iterative method with variable bandwidth is developed. Modifying the iterative algorithm improves the numerical stability of the variational inequality formulation of Signorini, and reduces the iteration time. After the excavation of underground powerhouse, the groundwater normally leaks from the side wall of the cavern, the determination of critical percolation point plays a key role in the analysis of leakage and the effect of drainage hole. The modified Signorini-type variational inequality is applied to simulate the seepage flow in the excavation boundary and the drainage hole of a typical project, which proves that the modified method has better convergence in the complex nonlinear three-dimensional seepage calculation.

Keywords: variational inequality; variable bandwidth iteration; outlet seepage; boundary condition

1 引 言

在地下厂房洞室的渗漏量计算和围岩稳定性分析中涉及到有自由面的渗流问题, 并且在洞室边墙和排水孔边界包含潜在的出渗边界, 从而使问题的非线性很强, 渗流自由面和出渗点的位置难以精确求解。随着地下洞室的开挖, 会在地下水中形成一个变化的内出渗边界, 地下水位会随着开挖地进行而改变^[1], 对于自由面和出渗点的求解将更加复杂,

收敛性问题更加突出。

在求解这类问题的有限单元法中有变网格法和固定网格法^[2], 其中固定网格法有着更广泛的应用, 这类方法包括了直觉化方法和变分不等式法^[3-4]。直觉化方法包括变单元渗透系数法^[5]、初流量法^[6]、剩余流量法^[7]、节点虚流量法^[8]、丢单元法^[9]、截止负压法^[10]等, 这些方法的迭代计算量大, 且对特殊的渗流结构不能够合理地模拟。由 Zheng 等^[11]提出的 Signorini 型变分不等式, 克服了计算对网格的依

赖性和出渗点的奇异性。但在约束迭代计算中约束较为严格, 对于大型地下洞室开挖渗流计算以及复杂渗流的模拟更容易造成结果震荡导致很难收敛。本文将 Zheng 等^[11]提出的 Signorini 型变分不等式应用于地下工程的开挖渗流边界模拟, 通过修改迭代公式, 运用物理意义-修改解的限制条件, 放松了求解要求, 使计算收敛更快, 同时省略了原来的修改刚度矩阵这一过程, 使其通过自适应带宽调整达到修正的目的, 精简了复杂的迭代过程, 易于编程, 计算精度高, 能够适应大型复杂地下工程的渗流计算。对于出渗边界节点较多的带有排水系统的大型地下洞室计算中, 在每次迭代中变一维带宽计算比按节点修改刚度矩阵要节省更多时间。

在地下洞室渗流系统中, 排水孔起到至关重要的作用, 因此合理、有效地模拟排水孔是数值计算中重要的工作。目前国内外对排水孔的模拟方法有很多, 主要有排水子结构法^[12]、以管带孔法^[13]、空气单元法、以缝代井法^[14]、等效杆单元法等。各种计算方法各有优缺点, 主要在计算精度和计算量间存在矛盾。本文对排水孔的模拟采用排水板替代法, 将其边界设为与开挖边界相同的出渗边界, 边界与自由面交线之上为疏干区, 边界与自由面交线以下为溢出区域。

2 变分不等式约束迭代法

对于变分不等式法中自由面的问题, 它是变分法中一个自然边界条件, 不需单独计算, 而是将自由面的不确定性转换为出渗点在潜在出渗边界的不确定性, 从而只需迭代出出渗点的位置即可解决自由面的计算^[15]。

对于 Zheng^[11]建立的 Signorini 型变分不等式: $a(\varphi, \psi - \varphi) \geq b_\varphi(\psi - \varphi)$, 在渗流方程中具体意义是寻找一个向量 $\varphi^{k+1} \in \Phi_{V_1}^h$, 对于 $\forall \psi \in \Phi_{V_1}^h$ 都满足:

$$(\psi - \varphi^{k+1})^T K \varphi^{k+1} \geq (\psi - \varphi^{k+1})^T q^k \quad (1)$$

式中: $K = \sum_e \iiint_{\Omega_e} B^T k B d\Omega$; φ 为节点总水头; $q^k = \sum_e \iiint_{\Omega_e} B^T v_0^k d\Omega = K_e \varphi^k$; $K_e = \sum_e \iiint_{\Omega_e} H_\lambda(\varphi^k - z) B^T k B d\Omega$; $\Phi_{V_1}^h = \{\varphi | \varphi \in R^n; i \in \Gamma_\varphi, \varphi_i = \bar{\varphi}_i; i \in \Gamma_s, \varphi_i \leq z_i\}$ 。

写成矩阵形式为

$$(\{\psi\} - \{\varphi\})^T [K] \{\varphi\} \geq (\{\psi\} - \{\varphi\})^T \{q\} \quad (2)$$

推导得出

$$(\{z\} - \{\varphi\})^T ([K] \{\varphi\} - \{q\}) = 0 \quad (3)$$

令 $[K] \{\varphi\} - \{q\} = \{f\}$, 式 (3) 变为

$$(\{z\} - \{\varphi\})^T \{f\} = 0 \quad (4)$$

式 (4) 的计算方法采用的是 Zheng 等^[16]的迭代方法。现推导如下:

对于出渗边界的节点 i , 式 (4) 有两种情况:

$$\varphi_i < z_i, f_i = 0 \quad \forall i \in I_a \quad (5)$$

$$\varphi_i = z_i, f_i \leq 0 \quad \forall i \in I_b \quad (6)$$

式中: I_a 为临界出渗点以上的节点集合; I_b 为临界出渗点及以下的节点集合。

因此, 存在一转置矩阵 $[P]$ 使得

$$[P] [\phi \quad q \quad f] = \begin{bmatrix} \left\{ \begin{smallmatrix} \phi_a \\ \phi_b \end{smallmatrix} \right\} & \left\{ \begin{smallmatrix} q_a \\ q_b \end{smallmatrix} \right\} & \left\{ \begin{smallmatrix} 0 \\ f_b \end{smallmatrix} \right\} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[P][K][P]^T = \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \quad (8)$$

将式 (7)、(8) 带入式 (4) 得

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_b \end{bmatrix} \quad (9)$$

从推导的过程可以看出, 方程的解是找到一个正确的集合 I 的分解, 以确保 $\{\varphi_i\} \leq \{z_i\}$ 和 $\{f_i\} \leq 0$ 同时成立。迭代的基本原则是对于 I 的一个分解式, 求的解不能满足 $\{\varphi_i\} \leq \{z_i\}$ 和 $\{f_i\} \leq 0$ 时, 则对 I 的这个分解修正, 修正的原则是对于 $\{\varphi_i\}$ 中大于位置高程的节点从 I_a 剔除划归到 I_b , 对于 $\{f_i\}$ 中大于 0 的节点从 I_b 剔除划归到 I_a 。

由于有限元法的刚度矩阵具有稀疏、带状和对称的特点, 所以一般采用一维数组存储法。为了不破坏刚度矩阵的特点, Zheng 等^[16]在迭代过程中通过对 $[K]$ 和 $\{f\}$ 进行约束, 形成 $[\tilde{K}]$ 和 $\{\tilde{f}\}$, 对应关系是: 当 $i, j \in I_a$ 时, $\tilde{k}_{ij} = k_{ij}$; 当 $i \in I_b$ 时, $\tilde{k}_{ii} = 1$; 其他 $k_{ij} = 0$; 当 $i \in I_a$ 时, $\tilde{f}_i = f_i$; 当 $i \in I_b$ 时, $\tilde{f}_i = 0$ 。

在 Zheng 等^[16]的迭代方法中, 每次迭代需要对边界节点所在的单元循环来修改刚度矩阵 $[K]$, 进而约束方程的解。通过新的刚度矩阵 $[\tilde{K}]$, 再求解水头 $\{\varphi\} = [\tilde{K}] \{\tilde{q}\}$ 和 $\{f\} = [K] \{\varphi\} - \{q\}$, 如此循环。

3 变分不等式变带宽迭代法

对于以上变分不等式迭代算法的解式 (5)、(6) 两种情况中, $\varphi_i - z_i$ 和 f_i 中必有一项为 0, 通过修改刚度矩阵 $[K]$ 和 $\{f\}$ 的相关项达到求解的目的。但在实际操作中这样的求解条件过于严格, 根据式 (9) 得到两个解集 $I_a = \{\varphi_a - z_a < 0, f_a = 0\}$,

$I_b = \{\varphi_b - z_b = 0, f_b \leq 0\}$, 当且仅当 $\{\varphi_i\} \leq \{z_i\}$ 和 $\{f_i\} \leq 0$ 同时成立且精度达到要求时迭代结束, 对于自由面附近的潜在出渗边界节点 i , 由于罚函数分配权重不精确和网格不规则, 可能出现以下情况: 若将 i 归为出渗节点, 但不满足 $\{f_i\} \leq 0$; 若将 i 归为非出渗节点, 则不满足 $\{\varphi_i\} \leq \{z_i\}$ 。所以在自由面附近的出渗边界节点容易在集合 I_a 和 I_b 之间摆动。表现在迭代步上就是两个迭代步之间来回跳跃。导致整体自由面迭代的精度达不到收敛要求。特别是当实际渗流问题的自由面跌落较为剧烈并且网格单元尺寸较大时, 上述迭代法不能完全消除网格依赖性和数值不稳定性, 因而, 难以得到强收敛标准的解。

为了克服上述问题, 采用自适应一维变带宽迭代计算, 并通过物理条件约束, 实现渗流自由面的准确定位。迭代公式变换如下:

$$[K_{aa}]\{\varphi_a\} - [K_{ab}]\{z_b\} - \{q_a\} = 0 \quad (10)$$

$$[K_{ba}]\{\varphi_a\} - [K_{bb}]\{z_b\} - \{q_b\} = \{f_b\} \quad (11)$$

将式 (10)、(11) 相加, 并将已知项移到方程右边, 得到

$$[K_{ia}]\{\varphi_a\} = [K_{ib}]\{z_b\} + \{q\} + \{f\} \quad (12)$$

式 (12) 与式 (4) 等价

其中 $[K_{ia}] = [K_{aa}] + [K_{ba}]$, $[K_{ib}] = [K_{ab}] + [K_{bb}]$

其基本思路是根据出渗点的物理特性 $\varphi_i \geq z_i$, 法向流量 $q_n < 0$ 来修改方程的解。出渗边界上的点凡是满足 $\varphi_i \geq z_i$ 且 $f_i \leq 0$ 条件的, 就认为是出渗点, 其压力水头为 0, 将其列为第 1 类已知水头边界中, 令 $\varphi_i = z_i$ 并从方程左边移到右边, 节点在下次迭代计算中不参与形成刚度矩阵; 凡是满足 $\varphi_i \leq z_i$ 的节点 i , 不再限制要求 $f_i = 0$, 只需在收敛精度上加以限制。节点 i 的总水头未知, 需要计算, 该节点在下次迭代计算中需要参与形成总刚度矩阵, 如上述改变一维刚度矩阵的带宽大小。该解法的实质是将潜在出渗边界的节点在第 1 类已知水头边界节点和未知水头节点之间通过判据进行转换, 通过确定出渗点将其从总带宽中剔除不参与计算, 这样计算节点不断减少, 带宽不断改变, 变带宽迭代只强制约束单边 (出渗节点), 将收敛的条件从数学约束中求得一组精确解转化为确定出渗点, 然后达到数值精度, 使得结果在两个相邻迭代步来回震荡的几率大大减小。最终通过收敛条件达到平衡, 从而确定自由面的位置。收敛条件

为 $\|\{\varphi^{k+1}\} - \{\varphi^k\}\|_1 \leq \varepsilon_1 \|\{\varphi^k\}\|_1$; $\varepsilon_1 = 10^{-5}$, $\|\{\varphi^{k+1}\} - \{\varphi^k\}\|_\infty \leq \varepsilon_2 \|\{\varphi^k\}\|_\infty$, $\varepsilon_2 = 10^{-4}$ 。计算程序框如图 1 所示。(HMLT (I) 为节点 I 前一次迭代水头计算结果, HM (I) 为节点 I 该次迭代水头计算结果, IDD 为迭代次数, q (I) 为式 (1) 中的 q^k)。

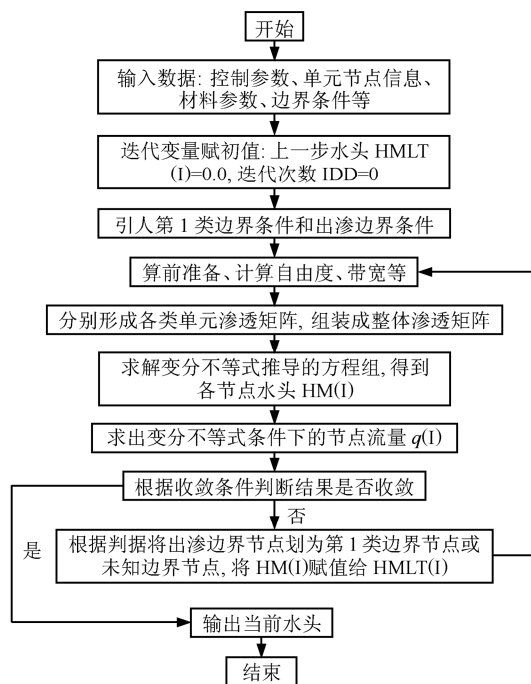


图 1 变带宽计算程序框图

Fig.1 Block diagram of variable bandwidth calculation program

边界迭代过程: 如图 2 所示, 假设洞室 $EABC$ 满足出渗点的条件, 则令其节点水头 $\varphi_i = z_i$, 按式 (12) 该项在方程右边, 不参与形成刚度矩阵, 而 EDC 边界节点参与形成刚度矩阵。如果不满足收敛条件, 将继续迭代, E 与 E' 之间的边界节点将不满足

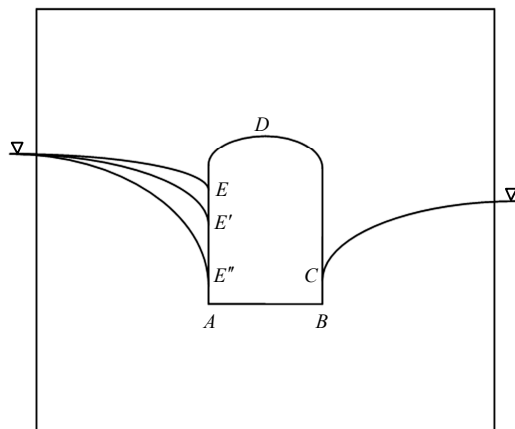


图 2 边界迭代过程图

Fig.2 Boundary iteration process diagram

$\varphi_i \geq z_i$ 且 $f_i \leq 0$ 条件, 会从式 (12) 右边移到左边, 参与形成刚度矩阵, 此时 $E'ABC$ 边界节点不参与形成总刚度矩阵。最终在 E'' 处误差精度满足要求, 结果收敛, 终止迭代, 此时 E'' 和 C 为临界溢出点。如果地下水位过高, 则洞室全部淹没在地下水中 (见图 3), 此时洞室边界 $EABC$ 变成了固定水头边界, 压力水头值为 0。

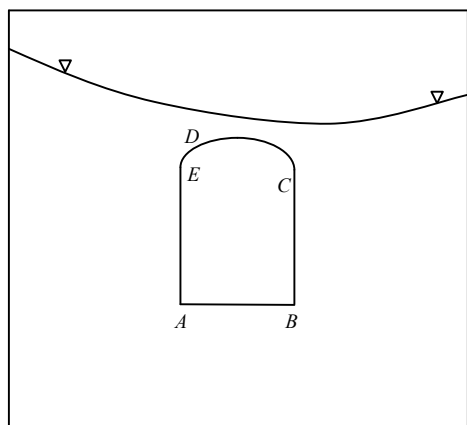


图3 边界被自由面淹没迭代
Fig.3 Iteration diagram of boundary flooded by a free surface

4 程序开发基础及实现

4.1 程序开发基础

本程序是在张巍等^[9]有自由面渗流分析单元改进法程序基础上引入了变分不等式解法, 同时增加了对渗流边界节点的处理。之前的程序在求解洞室开挖渗流时, 将出渗边界节点的压力水头直接设为 0, 不参与计算, 会出现一些问题, 当上游水位较高时, 自由面会出现回弯现象, 当上游水位较低时, 在边界处容易产生多条折线, 不能计算出自由面与洞室边界的交点, 故不能准确求解出出渗点。对于防渗帷幕的模拟则会出现相似的情形, 在洞室和帷幕两个出渗边界之间会有混乱的自由面线。因此, 之前的程序对于自由面的模拟不精确。

4.2 变分不等式变带宽计算程序的实现

在对每个节点赋自由度时, 若对节点 i 自由度赋为 0, 则该节点不参与形成刚度, 不会对带宽产生影响。初始让出渗边界所有节点参与计算, 即赋予出渗边界所有节点自由度, 在一次迭代步中, 通过已知水头边界求解各个节点水头 $[K]\{\varphi_{i+1}\} = \{q_{i+1}\}$, 再用上一次迭代的水头值 $\{\varphi_i\}$ 求出 $q^i = \sum_e \iiint_{\Omega_e} B^T v_0^i d\Omega = K_e \varphi^i$, 进而求出式 (4), 最后根据判别条件将潜在出渗节点分为出渗点 (自

由度为 0, 下次不参与计算) 和非出渗点 (自由度不为 0, 下次参与计算)。通过不断地迭代判断潜在出渗点的自由度, 将不断改变下次参与计算的节点总数, 故会不断改变计算中的一维带宽。这样在满足精度条件后, 出渗节点的个数会趋于稳定, 就可以求得精确的出渗点以及自由面了。

5 工程实例

5.1 某地下厂房工程概况

某抽水蓄能电站上库布置在河右岸的金盆沟内, 下库坝址位于河干流上。该抽水蓄能电站由上、下水库、输水系统、地下厂房及开关站组成。装机容量为 1 200 MW, 装机 4 台 300 MW 混流可逆式水泵水轮机。地下厂房洞室群位于输水系统的尾部, 主厂房顶拱开挖高程为 883.5 m, 主变洞顶拱开挖高程为 879.9 m。主厂房和主变洞顶拱上覆岩体厚度为 242~270 m。目前, 厂房长勘探洞 PD08 已掘进 348.5 m, 已过厂房轴线 6 m 左右, 底板高程为 918 m, 高出厂房顶拱 34.5 m。据 PD08 探明, 厂房围岩为印支期细粒状花岗闪长岩 ($\gamma\delta 1-c5$), 块状构造, 无大的断层通过, 仅出露一条小断层 f5, 产状为 NW75°/NE \angle 35°, 宽 2~5 cm, 破碎带由碎裂岩组成, 挤压紧密, 带内有地下水渗出, 沿断层下盘面平行发育一条石英脉, 宽 8~10 cm, 岩脉与断层接合紧密。

地下厂房渗控系统由排水廊道、排水孔幕和灌浆帷幕等组成。其中, 排水廊道分 3 层布置, 上层排水廊道位于厂房顶部围岩中, 其高程为 882.1 m, 中层排水廊道分布在厂房上、下游两侧, 高程为 850.4 m, 底层排水廊道分布在厂房四侧的围岩中, 高程为 824.0 m。排水孔幕沿排水廊道轴线方向布置, 分为竖向孔和斜向孔两大类。各层排水廊道通过排水孔幕连接, 形成排水系统。

5.2 有限元模型

模型采用自主编制的前处理程序建立的八节点等参单元, 计算程序是自主研发的三维渗流计算程序基础上改进后的程序。有限元网格如图 4 所示, 区域大小为 378.7 m \times 278.8 m \times 622.62 m ($x \times y \times z$), 共剖分 354 036 个单元和 366 873 个节点。模型范围参照地下洞室开挖稳定性有限元分析模型, 需满足洞周围岩厚度不少于 5 倍开挖跨度的要求, 这里厂房上游排水孔幕到上游边界的距离为 5 倍主厂房开挖跨度, 下游排水孔幕到下游边界的距离同样为 5 倍主厂房开挖跨度, 铅直向上取至地面高程, 铅直向下取至 697.45 m 高程处。排水孔幕采用等效排水板

模拟, 等效板厚度为 0.5 m (见图 5)。

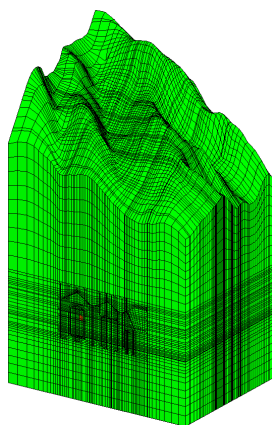


图 4 地下洞室渗流三维有限元计算模型

Fig.4 Three dimensional finite element model of seepage flow in an underground cavern

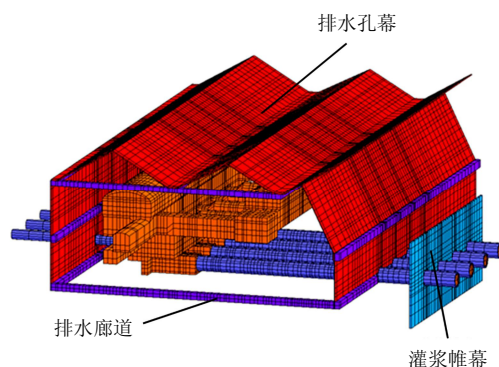


图 5 地下厂房渗控系统布置图

Fig.5 Layout of impervious system of the underground powerhouse

5.3 计算参数及边界条件

地下厂房岩体较完整, 成洞条件及洞室围岩稳定性较好, 围岩类别以 II 类为主, 渗透系数为 $k = 6.5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。防渗帷幕的渗透系数为 $k = 6.5 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$ 。

渗流分析的边界条件如下: 高程为 697.45 m 的水平底面和侧面为隔水边界; 上、下游垂直面均按第 1 类边界条件, 上游面总水头为 994.6 m, 下游面总水头为 896.7 m; 排水孔、排水廊道以及厂房洞室的边界均为潜在出渗边界。

渗流场的计算工况: (1) 无渗控措施下 (围岩在天然环境下开挖) 洞室的三维渗流计算分析; (2) 有渗控措施下 (具有有排水孔和防渗帷幕布置的渗控系统) 洞室的三维渗流计算分析。

计算后将结果导入后处理程序中, 两种计算工况下沿 1#机组中心线剖面等水头线和等势线分别如图 6~9 所示。等水头线分 11 级, 每级水头相差 25 m。等水头线是自由面和数值相等的压力水头的连线, 在渗流场中可以表征各点的压力水头的大小,

可以直观地看到洞室周围压力水头的大小, 通过对比有、无渗控措施的等水头线分布可以知道水头下降了多少。等势线是表示地下水势能相等的点的连线, 通过渗流场中等势线的疏密程度可以判断该处渗透坡降大, 从而渗透荷载很大, 对围岩的稳定性影响较大。

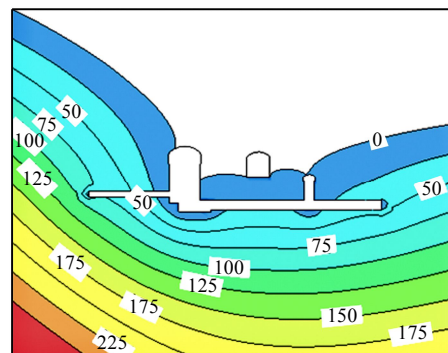


图 6 无渗控措施沿 1#机组剖面中心线等水头线分布图(单位: mm)

Fig.6 Distribution contour of seepage line along the #1 unit profile center line without seepage control measures (unit: m)

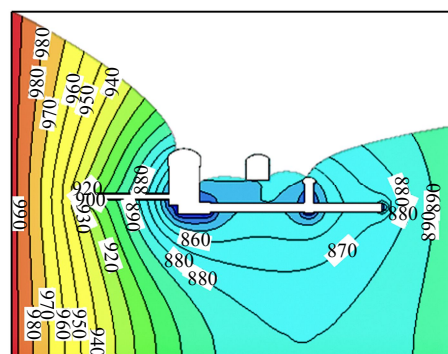


图 7 无渗控措施沿 1#机组剖面中心线等势线分布图(单位: m)

Fig.7 Distribution contour of isopotential line along the #1 unit profile center line without seepage control measures (unit: m)

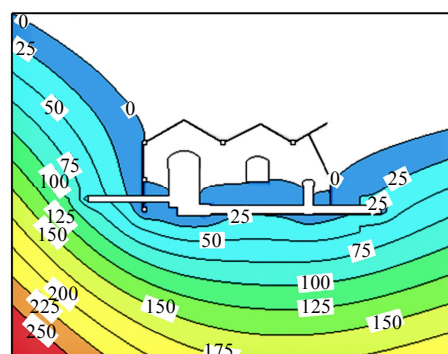


图 8 有渗控措施沿 1#机组剖面中心线等水头线分布图(单位: m)

Fig.8 Distribution contour of seepage line along the #1 unit profile center line with seepage control measures (unit: m)

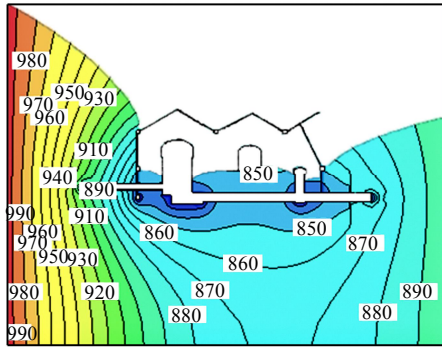


图9 有渗控措施沿1#机组剖面中心线等势线分布图(单位: m)

Fig.9 Distribution contour of isopotential line along the #1 unit profile center line with seepage control measures (unit: m)

5.4 计算结果分析

(1) 采用商业软件 ABAQUS 在计算大型地下洞室的开挖渗流场时往往迭代时间过长, 易产生不收敛, 得不到较好的结果。在该工程实例中, 通过与一般数学约束迭代的变分不等式进行迭代对比 (如图 10 所示, 变带宽程序以出渗节点数变化情况表征收敛, 数学约束程序以精确解中一个集合的元素个数变化情况表征收敛), 发现数学约束的迭代虽然精度高, 但容易造成局部震荡, 使得迭代效率大大减小, 变分不等式虽然有轻微震荡, 但收敛较快, 计算时间短, 迭代次数少 (迭代 8 次), 自由面也无明显回弯和不光滑。说明该变带宽的变分不等式迭代法收敛速度快, 同时精度高, 能够较好地模拟渗流场中地下洞室边界以及排水单元的边界。

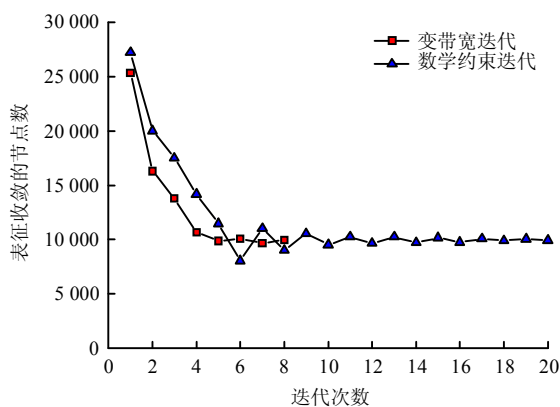


图10 有渗控措施下变分不等式变带宽迭代过程与一般变分不等式约束迭代过程

Fig.10 The variable bandwidth iterative process and the general variational inequality constraints iterative process for the variational inequality with seepage control measure

(2) 洞室在无渗控系统的情况下, 1#机组中心线剖面上渗流水头等值线图如图 6 所示, 渗流自由

面在洞室附近急剧下降, 最终在主厂房顶拱高程为 875.0 m 处溢出。下游自由面在尾调室附近急剧下降, 则刚刚淹没在自由面以下。三大洞室间水位在中间略高, 向两边边墙渗出时自由面均下降, 体现了洞室侧面未开挖部分水位较高对内部的影响, 从而体现了渗流场模拟的三维效果。

(3) 排水孔幕的模拟的效果表现如图 8 所示, 排水孔幕导致围岩渗流自由面和渗压明显降低, 尤其是排水系统附近岩体的渗压均降至 4 m 以内。在 1#机组中心线剖面上, 渗流自由面在厂房上游侧围岩中持续降低, 降低幅度相对平缓; 在排水孔幕附近渗流自由面急剧下降, 并于竖向排水孔相交, 然后沿着排水孔直线下降, 直至第 2 层排水廊道, 并从廊道的底部渗出, 降落幅度变缓, 最后从厂房上游边墙 840.0 m 高程附近溢出。厂房下游自由面在竖向排水孔处急剧下降, 在下游边墙为 838.3 m 高程附近溢出。

(4) 通过图 7 无渗控和图 9 有渗控下 1#机组中心剖面等势线分布图可以看出, 无渗控措施时, 等势线在上游洞前较密集, 说明此时渗透坡降较大, 边界渗水作用比较明显。有渗控措施下, 等势线在上游排水孔前密集, 而到洞周围后变得稀疏, 说明洞周的渗流作用不再明显, 证明了排水空的排水效果显著。

(5) 对于出渗边界的处理, 在无渗控系统的情况下, 洞室边界为出渗边界, 凡是满足判据 $\varphi_i \geq z_i$ 且 $f_i \leq 0$, 即认为该点是出渗点, 其压力水头设为 0。若水头过高, 洞室周围所有边界节点均满足上述条件, 则认为此时全部边界将变为固定水头边界。若水头相对较低, 则自由面会沿着边墙渗出 (见图 6), 出渗点以上其他边界节点其压力水头为负。

6 结 论

(1) 利用出渗点已知水头的特性将水头带入方程中, 在迭代过程中, 每次迭代都需要计算带宽, 因此, 改变带宽大小不会影响迭代时间, 省去了迭代中修改整体刚度矩阵数值的过程, 在减少了迭代时间的同时不影响结果精度。

(2) 用物理特征条件代替严格的数学约束来限制出渗点的位置, 使得迭代收敛速度快, 不会造成由网格过大引起自由面附近迭代结果来回震荡。

(3) 将边界条件运用在地下洞室以及排水孔幕的模拟, 计算收敛速度快, 精度高, 排水效果明显, 能够合理模拟洞室出渗边界和排水孔幕的边界。

参考文献

- [1] 刘巍. 岩溶富水区地下厂房洞室群渗流与稳定性计算分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
LIU Wei. Calculation and analysis of seepage and stability of underground powerhouse caverns in karst water-rich area[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [2] 宁博, 龙海燕, 柴军瑞, 等. 具有自由面渗流问题的数值方法研究简述[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(1): 85—89.
NING Bo, LONG Hai-yan, CHAI Jun-rui, et al. Brief description of numerical method research of free surface seepage[J]. **Advances in Science and Technology of Water Resources**, 2009, 29(1): 85—89.
- [3] 郑宏, 陈益峰, 周创兵. 含复杂渗控结构渗流问题数值模拟的 SVA 方法[J]. 水力发电学报, 2009, (2): 89—95.
ZHENG Hong, CHENG Yi-feng, ZHOU Chuang-bing. A SVA method for seepage problems with complex control measures[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2009, (2): 89—95.
- [4] 陈益峰, 卢礼顺, 周创兵, 等. Signorini 型变分不等式方法在实际工程渗流问题中的应用[J]. 岩土力学, 2007, 28: 178—182.
CHENG Yi-feng, LU Li-shun, ZHOU Chuang-bing, et al. Application of the variational inequality approach of Signorini type to an engineering seepage problem[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28: 178—182.
- [5] 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.
DANG Fa-ning, WANG Xiao-zhang, ZHENG Zhong-an, et al. Variable element seepage coefficient method for seepage numerical analysis with free surface[J]. **Journal of Northwest Hydroelectric Power**, 2004, 20(1): 1—3.
- [6] 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.
ZHANG You-tian, CHEN Ping, WANG Lei. Initial flow method for seepage analysis with free surface[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1988, (8): 18—26.
- [7] DESAI C S, LI G C. A residual flow procedure and application for free surface in porous media[J]. **Advances in Water Resources**, 1983, 6(1): 27—35.
- [8] 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.
SU Bao-yu, ZHU Yue-ming. The method of virtual flow method for determining the free surface of seepage flow with constant mesh[J]. **Journal of Hohai University**, 1991, 19(5): 113—117.
- [9] 张巍, 肖明. 有自由面渗流分析的丢单元法的改进及其在地下工程中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2005, 3(1): 32—36.
ZHANG Wei, XIAO Ming. Study on optimizing abandoning element method for numerical analysis of seepage with free surface and its application in underground engineering[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2005, 3(1): 32—36.
- [10] 速宝玉, 沈振中, 赵坚. 用变分不等式理论求解渗流问题的截止负压法[J]. 水利学报, 1996, 16(3): 22—29.
SU Bao-yu, SHEN Zhen-zhong, ZHAO Jian. The cut-off negative pressure method for solving filtration problems based on the theory of variational inequalities[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1996, 16(3): 22—29.
- [11] ZHENG H, LIU D F, LEE C. a new formulation of Signorini's type for seepage problems with free surface[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2005, 64: 1—16.
- [12] 王镭, 刘中, 张有天. 有排水孔幕的渗流场分析[J]. 水利学报, 1992, 12(4): 15—20.
WANG Lei, LIU Zhong, ZHANG You-tian. Analysis of seepage filed near a drainage-holes curtain[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1992, 12(4): 15—20.
- [13] 王恩志, 王洪涛, 邓旭东. “以管代孔”排水孔模拟方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 346—349.
WANG En-zhi, WANG Hong-tao, DENG Xu-dong. "Pipe to represent hole"—Numerical method for simulating single drainage hole in rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(3): 346—349.
- [14] 王恩志, 王洪涛, 王慧明. “以缝代井列”——排水孔幕模拟方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 98—101.
WANG En-zhi, WANG Hong-tao, WANG Hui-ming. "Fissure to represent line of holes"—Numerical method for simulating single drainage hole in rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(1): 98—101.
- [15] 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.
ZHENG Hong, DAI Hui-chao, LIU De-fu. Improved Bathe's algorithm for seepage problems with free surface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 505—512.
- [16] ZHENG T S, LI L, XU Q Y. An iterative method for the discrete problems of a class of elliptical variational inequalities[J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 1995, 16(4): 351—358.