

地下厂房防渗排水系统渗流特性的有限元分析

岑威钧¹ 朱岳明¹ 林宝尧² 范祥伦²

(1.河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098 ; 2.成都勘测设计研究院 ,四川 成都 610072)

摘要 :在求解无压渗流场结点虚流量法的基础上 ,结合可精细模拟密集排水孔复杂渗流水力行为的改进排水子结构技术 ,对某地下厂房厂区洞室群围岩区三维渗流场进行了有限元求解分析 ,着重研究了防渗排水系统中的帷幕和排水幕的渗流特性 .研究表明 ,排水幕在排水通畅的前提下具有强大的排水能力 ,其排水孔间距在一定范围内变化对渗流场水头分布影响不明显 .因此 ,可适当加大排水孔间距 ,以减少工程投资 .

关键词 地下厂房 渗流场 排水孔 渗流水力行为 排水子结构

中图分类号 :TV223.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2007)03-0267-04

地下厂房一般深埋于山体内 ,各主要洞室的顶拱高程常位于地下水位或库水位以下 .地下厂房在设计渗控措施时 ,多采用外圈帷幕和內圈排水幕相结合的“外堵内排”的渗控思想 ,以使主副厂房等主要洞室自身排水失效 ,处于干态环境下工作 .渗控系统由数量众多的排水孔密集排列而成 ,这些排水孔通常具有孔径和孔距小、孔深大、层数多、工作状态与渗流场自由面相对位置高程关系密切等特点 .由于每个排水孔都可能成为渗流场中的渗流逸出面或溢出面 ,在各自局部范围内可能会形成有渗流自由面的全形状或半形状的渗透“漏斗” ,因此排水孔对渗流场水头分布影响很大 .另外 ,布置于地下厂房洞室群四周的排水廊道或其他小洞室 ,也成为渗流场中的可能排水逸出面 .地下厂房在上述排水孔洞的联合作用下 ,会大大增加渗流场求解时边界条件处理的复杂程度 .除此之外 ,一些地下厂房的围岩还可能呈现出强非均质性和强各向异性等渗流特性 .若要精细地求解如此复杂的三维渗流场问题 ,必须寻找一种理论上精确严密的基于不变单元网格的迭代求解数值算法 ,使之能够具体准确地刻画防渗排水系统的渗流特性 .本文利用改进排水子结构技术和求解有自由面渗流问题的不变网格结点虚流量法 ,对某水电站地下厂房厂区三维渗流场进行了有限元求解 ,研究了地下厂房中防渗帷幕和排水幕的防渗排水渗流特性 .

1 排水孔的渗流水力行为及其边界条件处理

图 1 给出了地下厂房工程中常见的渗控措施布置方式 .在洞室群四周及顶部均布置有防渗帷幕和(或)排水幕 ,形成厂区外围立体防排渗控系统 .构成排水幕的众多密集的排水孔 ,根据不同的排水降压工作原理 ,可以分为 2 类 :一类排水孔是从最底层廊道向下钻孔而成 ,有底端面 ,上端面敞开 ,为排水口 ,当孔内水位升至孔顶高程时 ,渗透水流依靠渗透压力从排水孔上端口溢流至排水廊道等设施 ,此时孔内注满了水 ,称这类排水孔为溢流型排水孔 ;另一类排水孔是从排水廊道向上倒打钻孔形成的 ,或排水孔是从顶层廊道向下钻孔并穿透其下层廊道而形成的 ,排水孔没有底端面 ,顶端面可能敞开或不敞开 ,都不是排水孔的排水口 .渗透水流从孔壁逸出 ,靠重力沿孔壁向下流淌 ,从孔底端口排出 .这类排水孔的特点是孔内一般无积水 ,整个孔壁面为可能渗流逸出面 ,称这类排水孔为逸流型排水孔 .前类排水孔渗流特性简单明确 ,后类排水孔由于穿越了自由面 ,使排水孔孔壁渗流特性复杂了许多 ,有以下 3 种可能的渗流水力行为 ,见图 2 .

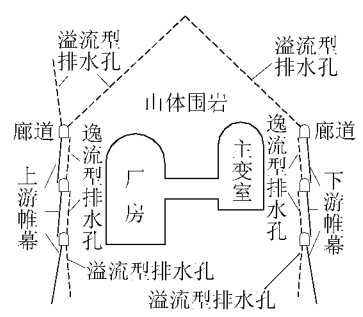
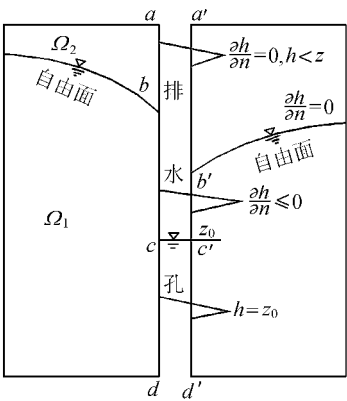


图 1 地下厂房典型渗控措施布置方案
Fig.1 Typical layout for seepage control of underground powerhouse

a. 在渗流自由面以上的排水孔 ab 或 $a'b'$ 段 ,由于位于渗流虚域内 ,实际为不排水边界面 ,其渗流行为



满足式(1)的要求.

$$\left[\frac{\partial h}{\partial x} \quad \frac{\partial h}{\partial y} \quad \frac{\partial h}{\partial z} \right] k \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \end{bmatrix}^T = 0 \text{ 且 } h < z \quad (1)$$

式中: h ——渗流水头; k ——传导矩阵; n_x, n_y, n_z ——排水孔边界面外法线方向余弦.

b. bc 或 $b'c'$ 段为渗流逸出面, 其渗流行为可用式(2)来描述:

$$\left[\frac{\partial h}{\partial x} \quad \frac{\partial h}{\partial y} \quad \frac{\partial h}{\partial z} \right] k \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \end{bmatrix}^T \leq 0 \text{ 且 } h = z \quad (2)$$

c. 位于排水孔内水位 z_0 以下的 cd 或 $c'd'$ 段为已知水头边界面, 其渗流行为为

$$h = z_0 \quad (3)$$

需要指出的是, 对地下厂房中其他排水洞及排水廊道等排水设施, 其渗流行为的处理在渗流理论和算法上与上述排水孔渗流行为的处理方法是完全相同的.

图 2 渗流场中排水孔的渗流行为
Fig.2 Seepage behavior of drainage hole in seepage field

2 改进排水子结构技术

从理论上讲, 在对排水孔进行常规网格剖分后, 计算程序可按上述不同的边界条件对排水孔进行逐一甄别模拟. 实际上, 排水孔数量众多, 其单元个数通常占据整个网格的一半左右, 逐个处理会导致许多重复的工作量. 如果将相邻一定数量的排水孔合并在一起, 形成排水子结构^[1]超单元进行一并处理, 可大大降低排水孔的处理规模. 文献[2]在此概念上改进和提出了在数学理论和算法上都严密的改进排水子结构技术.

排水子结构内部单元的划分形式可以是多种多样的, 相当灵活, 一般均能适应地下厂房渗流问题中的各种情况. 常见的排水子结构通常含有 1~7 个排水孔. 图 3 列举了含 3 个和 5 个排水孔时的排水子结构超单元的剖分形式. 排水子结构在深度方向的单元层数则视工程中各处排水幕的深度、排水廊道的位置及网格中单元层数的划分情况而定.

对于溢流型排水孔排水子结构, 程序处理时可在排水孔顶部设置虚拟的排水孔开关器^[3-8]. 当开关器打开时, 渗透水流从孔顶端口溢出, 此时计算程序将整个排水孔内壁面处理为一个等势面. 当该类排水孔被自由面穿过时, 孔顶端口不排水, 排水孔处于失效状态. 程序中将开关器关闭. 由于事先无法确定这些排水孔各自真实的工作状态, 计算程序中先可任意假定各个开关器是关闭的或打开的, 并给予相应的渗流计算条件, 由迭代计算的中间解得到各个开关器顶端口结点的水头或流量, 再按这些结点头头或流量的原本物理意义, 就可以正确判断和调整各个开关器在下一步计算中的开闭状态.

对于逸流型排水孔排水子结构, 视子结构为一超单元, 先计算出各子结构超单元的出口传导矩阵和右端项, 再有机地组装到渗流支配方程中去, 进而进行迭代求解. 在每个迭代步中, 要对穿过自由面的排水子结构的出口传导矩阵和右端项进行修正, 重新组装支配方程或一并纳入结点虚流量列阵项中. 一般情况下, 迭代求解过程中, 开始可先假定各个子结构全部位于渗流自由面以下进行子结构静凝聚, 在得到每个中间解后, 如同对单元进行判别那样, 对各个排水子结构按子结构出口结点水头的大小来进行辨别, 子结构是否是全位于渗流虚域或实域内, 或穿过自由面. 若子结构不与自由面相交, 在下一步的迭代计算中该子结构的出口传导矩阵和右端项不变或者不参加支配方程的组装; 若子结构穿过自由面, 需先计算出子结构内部结点的水头值, 然后重新算出该子结构的出口传导矩阵和右端项进行再次迭代计算.

3 工程应用

3.1 工程概况

某引水式水电站地下厂房位于溪落渡拱坝水库库区内, 厂枢纽主要建筑物由主厂房、副厂房、安装间、主变室和 GIS 室及尾水洞等洞室群组成. 厂区四周布置有如图 1 所示的主防渗排水系统, 另外主厂房等各主

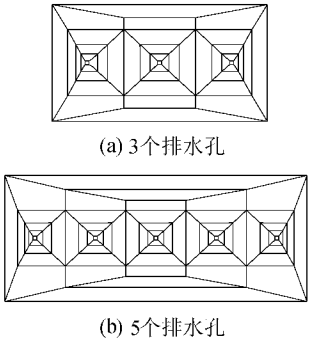


图 3 常见排水子结构单元剖分形式
Fig.3 FE meshes of drainage substructure

要洞室上半部四周还布置有第二道辅助排水幕,厂区岩体呈成层分布,具有明显的非均质渗流特性,其中从上游至下游斜穿厂区各主要洞室的灰岩层还呈现强渗透各向异性。

3.2 有限元建模和计算工况的确定

图 4 为计算域有限元计算网格图,不考虑排水孔子结构的网格初次剖分后单元数为 35 206 个,结点数 36 346 个,经过二次剖分形成排水子结构后单元数增至 55 729 个,结点数增至 66 810 个,当排水孔间距为 3 m 时,排水孔单元有 678 个,其中逸流型和溢流型排水孔分别为 506 个和 172 个。

根据引水压力隧洞水位、下游水位、各种防渗排水措施的性能(如不同的排水孔间距和失效程度)及岩体的各向异性情况等条件加以合理假设组合,建立多组计算工况,以全面掌握地下厂房的渗流特性,限于篇幅,本文仅讨论 3 个典型工况,工况特性描述见表 1。

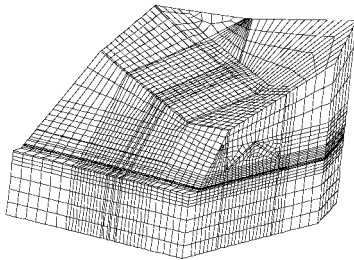


图 4 有限元计算网格
Fig.4 FE meshes

表 1 计算工况
Table 1 Cases for FE calculation

工况	引水隧洞 压力水位/m	下游水位/ m	工况特性
工况 1	913.00	600.00	现有设计防排措施,排水孔间距 3 m,岩体各向同性
工况 2	913.00	607.94	岩体各向异性比为 5,其余同工况 1
工况 3	913.00	607.94	排水管隔孔失效,即间距变为 6 m,其余同工况 2

3.3 计算成果分析

图 5(a)为工况 1 沿厂房 2 号机组(共 3 台机组)中心线剖面的等水头线分布,由图 5 可见,整个渗流场的水头分布规律合理,等值线形态、走向和密集程度都正确地反映了相应位置处的渗控措施特点、岩体渗流特性和边界条件。在上下游封闭防渗帷幕和排水幕的联合作用下,上下游来水都得到了有效控制,上游自由面在靠近主厂房上游的第 4 层(按由下至上计数)排水幕处(该处没有帷幕)骤降,说明排水孔起到了很好的排水降压作用,上游上部渗透水流几乎都进入到该层排水幕的排水孔内,没有渗透水流再进入厂区,主副厂房、主变室等主要地下洞室上部均处于渗流疏干区。厂房底部的浸水主要是由于厂区底部岩体的绕渗所引起的,在上游帷幕的中下部,等水头线密集,水头削减明显,说明帷幕在排水幕导渗排水降压作用的协助下,起到了很好的防渗作用。下游相应部位也有体现,只不过下游处水头差较小,这种现象明显变弱。另外,由于上游来水被上游第 4 层排水幕拦截且下游水位较低,使得厂房顶部两排相向的“屋顶型”斜交排水幕和下游上面两道防渗和排水幕在现有条件下都处于渗流疏干区,此时排水孔不起任何排水降压作用,只起安全储备作用。

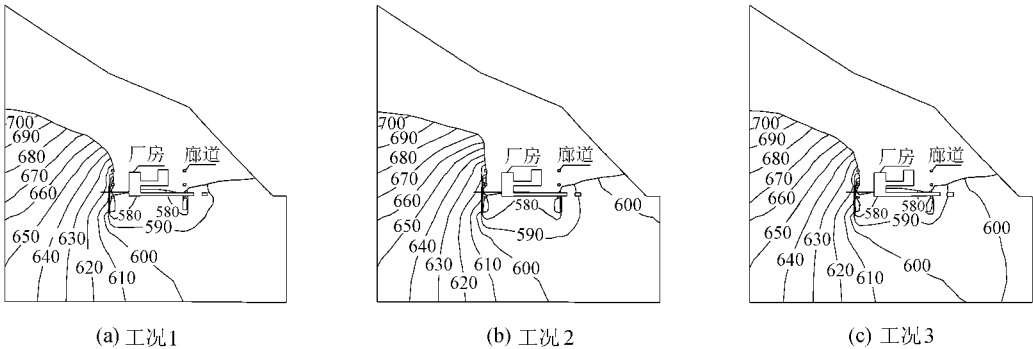


图 5 不同工况下沿厂房 2 号机组中心线剖面的等水头线分布(单位:m)

Fig.5 Water head isolines for cross-section along the center line of unit 2 in different cases

图 5(b)为工况 2 的等水头线分布,此时假设斜穿厂房区域的灰岩层渗透异性比(岩层结构面的法向与切向的主渗透系数之比)为 1:5,下游水位升至 607.94 m,其余同工况 1。渗流场水头分布除下游局部区域外(因计算中下游水位抬高了)总体上与工况 1 相似。进一步增大该岩层的各向异性比,即岩层切向渗透能力增大(岩层切向是指向厂房),计算结果和岩体渗透各向同性的工况 1 相比,厂房上游侧的等水头线分布并没有因此而有过大的变化,仅是在上游顶部排水孔处有轻微不同,自由面随渗透异性比增大向厂房区域有所推进,但最终还是被现有排水幕的强大排水能力截住,渗透水流未能进入厂区,说明现有渗控措施能够满足不利情况下的防排要求。另外,厂房底部进水区域随着该层岩体渗透各向异性比的增加反而逐渐减小。这种看似“反常”现象是在现有特殊的岩层特性和渗控措施下发生的,其原因是:尽管岩体渗透各向异性比增大,即

指向厂房的岩层切向透水能力增强,但该方向的渗透水流仍被帷幕和排水幕完全截住.计算结果表明,此时排水孔的排水量随着各向异性比的增加而明显增加,说明排水孔的排水降压能力得到了进一步发挥.与此同时,该岩层法向透水能力随着渗透各向异性比的增加反而减小(尽管此时的法向渗透系数未变),大部分渗透水流向容易渗透的水力阻力小的切向运动,通过法向进入下一岩层的渗透流量明显减小,绕向厂房底部的渗透水流反而得到更好的控制,因此厂房底部绕渗进水的区域反而有所减小.应当强调的是,这种“反常”的渗流现象是在切向渗透流量小于排水孔的排水能力且排水孔排水畅通的前提下出现的.如果切向渗透供水流量大于排水孔的排水能力,那么此时渗透水流就会朝着厂区长驱直入,进入厂房区域.

图5(c)为工况3的等水头线分布,此工况是在工况2的基础上假定排水孔隔孔失效,即排水孔的间距增大至6m.与工况1相比,渗流场特性仍然相差无几,并没有因为排水孔间距的增大而明显改变,说明整个防渗措施的防渗排水能力仍然大于上游来水的入渗能力.由于排水孔间距相对较大,厂房底部扬压力较工况1有所增大,特别是主变室下面的尾水管外水压力有所增大.

4 结 论

a. 在下游河床高尾水位和岩体强各向异性等多种不利情况下,现拟渗控措施能够有效地将上下游渗透来水防排在外,防排系统之内的厂区大部分岩体区域都处于渗流疏干区.

b. 上游帷幕和排水幕在整个渗流场中起到了控制性的防渗排水作用,而下游的防渗帷幕和排水幕由于下游来水水位较低,现拟帷幕和排水幕没有完全发挥其功效,因此在设计和施工时应强调对上游帷幕和排水幕的要求,可适当降低对下游帷幕和排水幕的要求.

c. 排水幕的排水降压作用很大.在排水孔排水畅通的前提下,排水孔间距在可能范围内变化对渗流场的影响不是很大,基本都能满足排渗降压的渗控要求.因此,从经济和偏于工程安全的角度出发,现有排水孔的间距还是可以适当扩大一些的,建议上游排水幕中的排水孔间距扩大至4~5m,下游侧排水幕中排水孔间距可以放宽到5~6m,但要确保排水孔在工程将来的长期运行中排水畅通.

参考文献:

- [1] 王镭,刘中,张有天.有排水幕的渗流场分析[J].水利学报,1992(4):15-20.
- [2] 朱岳明,陈振雷,陈晴,等.改进排水子结构法求解地下厂房洞室群的复杂渗流场[J].水利学报,1996(9):79-85.
- [3] ZHU Yue-ming, WANG Ru-yun, XU Hong-bo. Some techniques for solution to free surface seepage flow through arch dam abutments [C]//Proceedings of the Intern Symposium on Arch Dams. Nanjing [s. n.], 1992.
- [4] 陈建余.非稳定饱和-非饱和渗流场数值计算关键技术及其应用研究[D].南京:河海大学,2003.
- [5] 朱岳明,陈建余,龚道勇,等.拱坝坝基渗流场的有限单元法精细求解[J].岩土工程学报,2003(3):326-330.
- [6] 朱岳明,张燎军.渗流场求解的改进排水子结构法[J].岩土工程学报,1992(2):69-76.
- [7] 朱岳明,王锋,蔡昌光,等.三板溪地下厂房洞群围岩渗流场分析[J].水电能源科学,2002(2):1-3.
- [8] 岑威钧,朱岳明,汪安南,等.姜唐湖闸基渗流特性和优选渗控方案研究[J].水电能源科学,2005(1):83-85.

Finite element analysis of seepage property of anti-seepage and drainage system of underground powerhouses

CEN Wei-jun¹, ZHU Yue-ming¹, LIN Bao-yao², FAN Xiang-lun²

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

2. Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute of China Hydropower Consulting Group, Chengdu 610072, China)

Abstract: The finite element analysis of 3D seepage field for surrounding rock mass of cavern groups of underground powerhouses was performed based on the nodal virtual flux method for solving the non-pressure seepage field and the improved drainage substructure technique for accurately simulating the complex seepage behaviors of densely distributed drainage holes, with emphasis placed on the seepage properties of the anti-seepage concrete curtain and drainage curtain in the anti-seepage and drainage system. The result shows that the drainage curtain is of high drainability under smooth drainage condition, and that the variation of the spacing between drainage holes within a certain range is of little influence on the water head distribution of the seepage field. Therefore, the spacing between drainage holes could be increased properly, so that the investment in the project could be reduced.

Key words: underground powerhouse; seepage field; drainage hole; seepage behavior; drainage substructure