

地下厂房洞室群渗流场及渗控措施效果数值分析

王 晓¹, 柴军瑞^{1,2}, 温立峰¹, 许增光¹, 孙超伟¹

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 采用三维渗流场有限元方法, 模拟地下厂房洞室群稳定渗流场。建立三维渗流场有限元分析模型, 精确模拟排水孔的位置。通过多工况的计算, 详细分析地下厂房洞室群渗流特性以及其中帷幕及排水幕的渗流控制效果, 同时探讨坝基及消力戽排水孔间距对渗流场的影响。计算结果表明: 地下厂房洞室群天然水位较高, 渗流控制措施对厂房洞室群渗流场可起到很好的控制作用, 排水孔的排水减压作用明显, 防渗帷幕能够有效降低扬压力以及水力坡降的分布, 有利于围岩稳定。另外, 坝基及消力戽排水孔间距对渗流场影响并不明显。

关键词: 渗流场; 数值分析; 渗流控制; 地下厂房

中图分类号: TV139.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)02-0123-05

Numerical analysis on seepage field and anti-seepage effect for underground powerhouse cavern

WANG Xiao¹, CHAI Junrui^{1,2}, WEN Lifeng¹, XU Zengguang¹, SUN Chaowei¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Northwest Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: By using finite element method of 3D seepage field, the paper simulated the steady seepage field in chamber group of underground powerhouse. The seepage calculation model was established and the drainage holes position was accurately simulated. It analyzed the seepage field characteristics of the underground powerhouse caverns and the seepage control effect of curtain and drainage. In addition, the effect of the drain holes space for the dam foundation and stilling bucket on the seepage field were analyzed. The results show that seepage control measures can obtain good seepage control effect because of the natural high water level. The role of drainage and decreasing pressure of drainage holes is obvious. The curtain can effectively reduce uplift pressure and distribution of hydraulic gradient, which is conducive to the stability of surrounding rock. The effect of dam foundation and space of bucket drainage hole on seepage field is not obvious.

Key words: seepage field; numerical analysis; seepage control; underground power station

在现代水电站建设中, 地下厂房洞室群规模日趋宏大, 地下洞室埋置于地下或山体中的深度由几十米至数百米, 这些实际工程的建设给岩土工作者提出了大量难题。主要有地下厂房的防渗、洞室群围岩稳定性和锚固支护方案分析等问题^[1-4]。由于地下厂房多位于降雨形成的天然水位线以下, 渗漏成为主要问题, 它带来的不仅是影响厂房的正常运行和经济损失, 更重要的是它可能会对厂房的安全造成极大的影响。目前对地下厂房的防渗主要采取

外侧帷幕, 内侧排水幕相结合的方法, 厂房包裹在帷幕及排水孔的内部^[5-6]。对地下厂房防渗排水系统的布置和设计以及渗流控制效果的分析 and 评价是一个至关重要的问题。由于排水幕由大量孔径小、数量多、间距密的排水孔组成, 这大大增加地下厂房渗流场分析的难度。目前对排水孔的模拟方法主要有排水子结构法、空气单元法、以管代孔法、以缝代井法、等效杆单元法等^[7-8]。排水子结构法理论较严密, 计算精度较高, 可以比较全面地解决排水孔模拟

收稿日期: 2013-11-23; 修回日期: 2013-12-27

基金项目: 陕西省重点科技创新团队 (2013KCT-015); 陕西省自然科学基金 (2013JQ7010); 中国博士后科学基金 (2013M540765)

作者简介: 王 晓 (1989-), 女, 陕西蒲城人, 硕士研究生, 主要从事水工渗流力学与数值仿真方面的研究。

通讯作者: 柴军瑞 (1968-), 男, 陕西眉县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构, 岩土体水力学方面的研究工作。

的问题,但是用于众多密集排水孔时,其子结构的形成和前期处理工作巨大,计算复杂,显得不够灵活。各种排水孔的模拟方法各有其优缺点,主要体现在计算量和计算精度之间的矛盾。一些方法侧重于计算精度而使计算量大大增加^[9-10],另一些方法侧重于通过简化模型来减少计算量而使计算精度偏低^[11]。本文采用真实模拟排水孔的位置而忽略其尺寸效应的方法来模拟排水孔的工作。采用裂隙岩体等效连续介质模型,运用有限元方法分析地下厂房洞室群渗流场特性,在此基础上分析地下厂房洞室群防排排水系统中防渗帷幕的渗流控制效果和排水幕的排水减压效果,同时探讨坝基及消力戽排水孔间距对渗流场的影响。

1 排水孔的模拟方法

在地下厂房洞室群周围以及坝基廊道底部或顶部通常布置有密集的排水孔。排水孔孔径一般只有 10 cm 左右,间距也只有 2~6 m,但其空间分布却达数百米。排水孔在渗流场中直接将地下水排至渗流域以外,对水头分布的影响极大,往往能对工程的渗流特性及渗控设计起到关键作用。排水孔的内部边界在渗流场中是可能逸出面,排水孔的渗流行为在算法上可分为两种情况来分析,一种是排水孔穿过渗流自由面,另一种是排水孔不与自由面相交。当穿过自由面时,排水孔内边界面渗流自由面以上的孔段为不透水边界,渗流自由面以下排水孔内水位以上的边界面为逸出面,位于孔内水位以下的边界面为已知水头边界。当排水孔不与自由面相交位于自由面以上时为不透水边界,位于自由面以下时为已知水头边界。本文采用真实模拟排水孔位置而忽略其尺寸效应的方法模拟排水孔的作用,将排水孔作为有限元网格位于一条线上给定水头的若干节点处理,通过多次迭代计算确定最终需要施加给定水头的节点。具体实现方法为:首先假设所有排水孔上的节点均透水,在各节点施加其相应的位置水头,即相应位置无孔压,进行稳定渗流场试算,然后将计算获得的浸润线位置与排水孔节点位置相比较,浸润线以上的节点不再施加位置水头,浸润线以下节点继续施加位置水头进行第二次试算,重复上述步骤,直到前后两次浸润线位置基本不变,这时所获得的节点即为需要施加相应位置水头的节点。这种方法使网格剖分和排水孔边界处理过于复杂的问题得以解决,在处理数量巨大密集的排水孔时是一种较简单和方便的方法。这种方法虽然忽略了孔径大小

的影响,但在孔径与单元网格间距相比较小时可以取得精确的结果^[11]。

2 计算模型及计算参数

2.1 工程概况

某水电站采用碾压混凝土重力坝,坝身泄洪,右岸地下厂房布置。大坝为碾压混凝土重力坝,最大坝高 137.5 m。大坝坝顶长度 245.00 m,坝顶宽度 10.0 m。右岸坝肩高程 1900 m 以下为陡壁,基岩裸露,无强卸荷岩体。地下厂房采用中部布置,主厂房、副厂房和安装间呈“一”字形布置。安装间及进厂交通洞布置在主厂房右侧,副厂房位于左侧。采用上、下游双排防渗帷幕及排水幕,坝内设排水廊道。坝基设两道帷幕,上游一侧帷幕深度进入相对不透水层 5 m。帷幕深度多在 50~115 m 之间。下游侧单排帷幕深度约为 30 m。厂房区防排排水设计采用止水帷幕结合排水布置,厂房上游侧帷幕灌浆廊道与厂房排水廊道共用,共 3 层,洞内上游侧为帷幕灌浆孔,下游侧为排水孔,厂顶 1836.5 m 高程布置“目”形排水洞,排水洞布置辐射排水孔,覆盖了厂房、主变洞、尾调室,形成封闭排水幕。厂房周边的排水洞及洞内布置的排水孔形成外围排水帷幕,在各洞室边墙、顶拱均设有系统排水孔。地下洞室及防排系统见图 1。

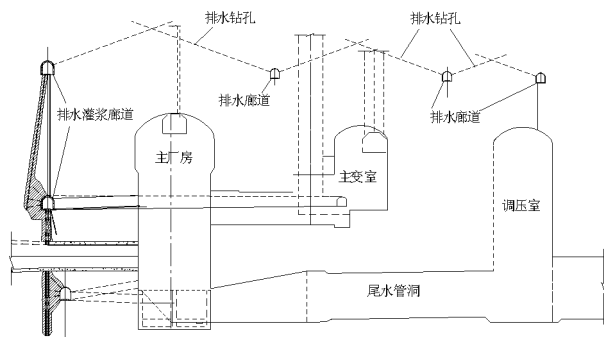


图 1 地下洞室及防排系统布置示意图

2.2 计算模型

为了全面模拟枢纽区的渗流场,同时精细模拟厂房区渗流场。根据工程资料,模型选取范围为:沿坝踵向上游取 3 倍坝高、坝趾向下游取 4.5 倍坝高,坝基取 2.3 倍坝高,两岸坝肩向左右岸分别取 3 倍坝高。整体模型整体尺寸为 1006 m × 900 m × 694 m。计算模型主要包含河床冲击层、风化层、卸荷层以及完整基岩。模型真实模拟枢纽区防渗帷幕的布置,厂房区主要由前后两道帷幕共同防渗,见图 2(a)。模拟排水孔的实际位置和规模,对排水孔部位进行重点

剖分,模型共剖分单元总数 384349,节点总数 91296,计算模型见图 2(b)。本文采用 ADINA 软件模拟稳定渗流场,只进行运行期工况的计算。

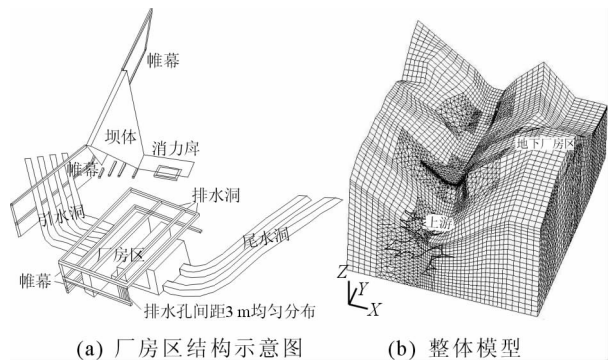


图2 三维有限元计算模型

模型上游水库施加已知水深 96 m,下游水位施加已知水深 5 m。模型坝基底面、上下游侧面按不透水边界考虑,左右岸侧面按已知水头施加,施加相

应的地下水位线,对于兼有灌浆的廊道按不透水边界考虑,其余廊道按透水边界考虑。对于排水孔的模拟,通过多次试算,在浸润线以下的排水孔节点施加其相应的位置水头,模拟透水边界。本文根据实际情况,调压室下游边壁假设为透水边界。

2.3 计算参数

在进行运行期渗流计算之前,先对枢纽区天然渗流场进行了参数反演分析,运行期渗流计算参数均通过参数反演获得。各区材料参数见表 1。

2.4 计算工况

为进行地下厂房洞室群渗流场特性分析,分析评价防渗帷幕以及排水幕的渗流控制效果。本文进行运行期多工况的渗流计算,计算工况表如表 2 所示。其中工况 1 为防渗排水系统正常运行工况,工况 2 用于分析排水幕的排水降压效果,工况 3 用于分析防渗帷幕的渗流控制效果,工况 4 和 5 用于分析坝基及消力戽排水孔间距对渗流场的影响。

表 1 各区材料渗透系数							m/s
分区	河床 冲积层	风化层	卸荷层	左岸 基岩	右岸 基岩	帷幕	大坝
渗透系数	5×10^{-3}	2×10^{-4}	8×10^{-6}	3×10^{-7}	1×10^{-7}	1×10^{-8}	1×10^{-10}

表 2 计算工况表			
工况编号	工况条件	工况编号	工况条件
1	防渗排水系统正常运行,排水孔间距 3 m	4	防渗排水系统正常运行,坝基及消力戽排水孔间距 2 m
2	枢纽区帷幕正常,排水孔全失效	5	防渗排水系统正常运行,坝基及消力戽排水孔间距 4 m
3	枢纽区排水措施正常,帷幕全失效		

3 计算结果和分析

3.1 防渗排水系统正常运行工况渗流场分析

根据本文所取相关条件,防渗排水系统正常运行工况(工况 1)下,厂房 1 840 m 高程平切面以及厂房典型横向断面和纵向断面的水头等值线图见图 3、图 4。所有计算工况下枢纽区各区域所排出渗流量见表 3。

表 3 各工况不同部位渗流量					m ³ /h
工况	厂房区排 出流量	坝基排 出流量	坝体排 出流量	消力戽 排出流量	
1	22.725	36.546	22.146	23.979	
2	9.09	0	0	0	
3	79.776	86.238	75.796	23.911	
4	22.784	37.722	23.465	24.973	
5	22.700	36.010	21.871	22.984	

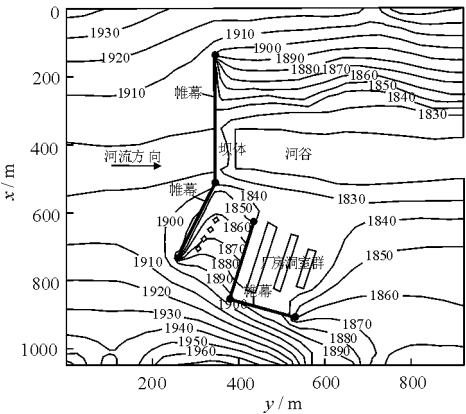


图3 1840 m 高程平切面水头等值线(单位:m)

该工程枢纽区采用双层帷幕,坝基及左右岸设置第一道帷幕,厂房前侧及右侧设第二道帷幕。两层帷幕联合进行枢纽区的渗流控制,特别是厂房洞室群的渗流控制。由图 3 可知,由于防渗帷幕及排

水孔的存在,上下游渗流场均得到有效控制,枢纽区出现明显的绕渗现象,厂房洞室群区域水头线明显降低。厂前帷幕的防渗作用以及帷幕后排水幕的排水作用使厂前水位降低近 60 m,厂房区域大部分在浸润线以上。由图 4 可知,在两道防渗帷幕及排水幕处,浸润线均有明显骤降,厂房右侧由于防渗墙和排水幕的存在,浸润线也产生骤降,说明防渗排水系

统能够取到明显的渗流控制效果。防渗帷幕可以延长渗径,有效降低扬压力,排水幕可以有效排走绕过帷幕进入厂房洞室群的水。厂房区域排出流量主要来自厂房底部的绕渗流量,如表 3 所示,其值基本上控制在集水井的排水流量以内。厂房顶部的排水洞及排水孔主要位于疏干区,其作为一种安全储备,可以用于排出降雨时的过大入渗量。

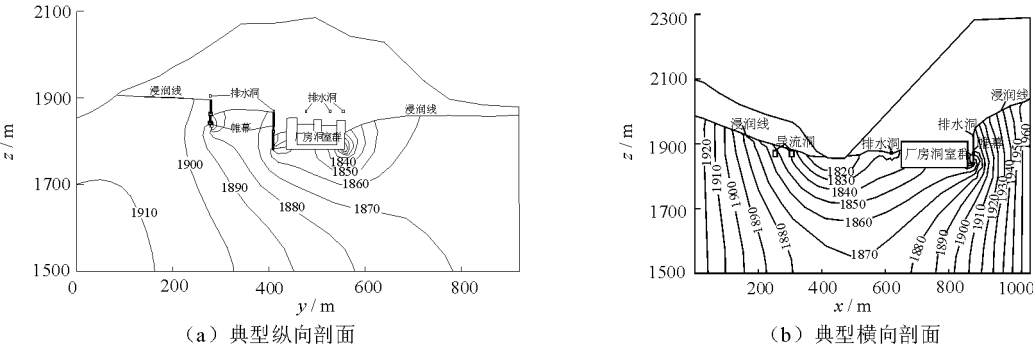


图 4 工况 1 厂房典型剖面水头等值线图(单位:m)

3.2 排水幕渗流控制效果分析

图 5 为所有排水措施失效而防渗帷幕正常工作工况下(工况 2)厂房洞室群典型横纵断面水头等值线分布图。

由图 5 与图 4 相比较可知,在排水措施失效情况下,由于防渗帷幕位于浸润线之下,所以即使帷幕正常工作,厂房区域水头线明显偏高,厂房洞室群基本处于浸润线之下,说明厂房区排水孔及排水洞具有明显有效的排水作用,对降低浸润线的效果也非

常明显。排水措施失效将造成浸润线过高,防渗帷幕失去应有的作用,厂房区域也将承受较大水力坡降,对围岩稳定不利。地下厂房洞室群防渗排水系统中的排水系统,排水作用显著,一定要保证畅通有效,防止堵塞。

3.3 防渗帷幕渗流控制效果分析

图 6 为所有防渗帷幕失效而排水措施正常运行工况下厂(工况 3)房洞室群典型横纵断面水头等值线分布图。

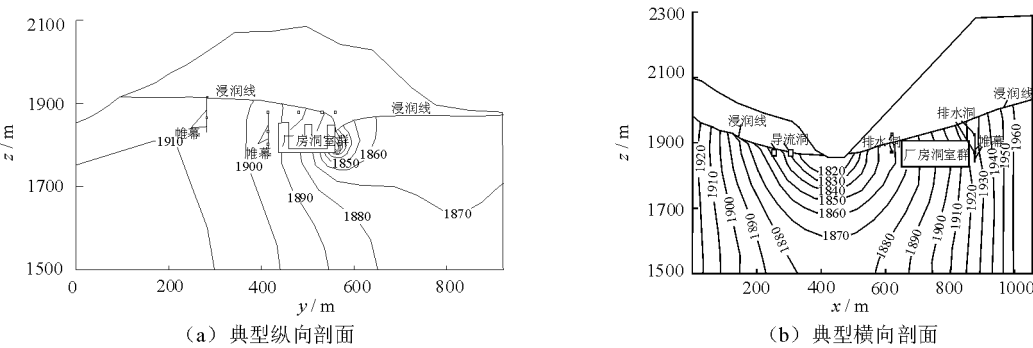


图 5 工况 2 厂房典型剖面水头等值线图(单位:m)

由图 6 与图 4 比较可知,在防渗帷幕失效的情况下,由于帷幕失去挡水作用,同时排水幕及排水洞正常运行,大量水由排水措施排出,厂房区排出水量和坝基排出水量分别为帷幕正常运行时的 3.51 倍和 2.36 倍,厂房洞室群区域浸润线相对于天然渗流场也明显降低,进一步说明排水措施对厂房区域渗流场作用明显。

帷幕失效后,厂房区域高水头只在排水措施周围岩体消散,渗径被大大缩小,这样很容易引起排水幕及排水孔四周岩体的水力坡降过大,最大水力坡降达 18,对周围岩体的稳定极为不利。所以虽然帷幕失效后厂房区渗流可以较好地被控制,但容易引起其它稳定问题,应保证帷幕的正常运行。

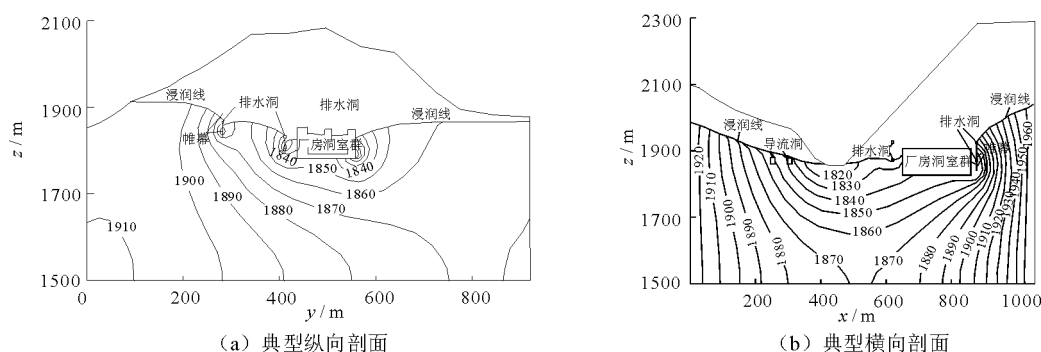


图6 工况3厂房典型剖面水头等值线图(单位:m)

3.4 坝基及消力戽排水孔间距对渗流场的影响

本文对整个枢纽区进行渗流计算,重点讨论地下厂房洞室群的渗流场分布特性。在此基础上也对坝基及消力戽渗流场进行分析,探讨坝基及消力戽排水孔间距对渗流场的影响(工况4、工况5)。在分析不同排水孔间距工况计算结果发现,不同排水孔间距情况下,枢纽区渗流场水头线分布并无多大差别,只在坝基及消力戽部位产生细微差别。不同排水孔间距下,各部位排出流量有一点差别,主要体现在坝基及消力戽排出流量上。但流量差别均较小,2 m排水孔间距相对于3 m,坝基及消力戽排出水量只分别增加了3.2%和4.1%,相对于4 m也只分布增加了4.7%和8.6%。说明坝基及消力戽排水孔间距对渗流场影响不明显。

4 结 语

本文通过适当的处理和分析得到大型地下厂房洞室群合理的渗流计算结果,探讨了地下厂房洞室群防渗排水系统的可行性,分析排水幕及防渗帷幕的渗流控制效果,同时探讨坝基及消力戽排水孔间距对渗流场的影响,得出以下几点结论:

(1) 地下厂房洞室群天然水位较高,合理的防渗排水措施可以使地下厂房洞室群在适宜的环境下工作,保证其安全稳定。

(2) 地下厂房的排水幕及排水洞排水降压以及降低浸润线的作用明显,可以起到有效的渗控作用,一定要保证其正常运行。

(3) 厂房区域防渗帷幕帷幕可以大大延长渗径,对保证排水及厂房周围的围岩稳定至关重要。

(4) 坝基及消力戽排水孔间距对渗流场的影响

并不明显,间距可适当加大。

参考文献:

- [1] 徐国宾,乔海娟,王海军,等. 水电站地下式厂房边界条件的识别及动力特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2012,23(4):7-10.
- [2] 陈益峰,周创兵,毛新莹,等. 水布垭地下厂房围岩渗流效应数值模拟与评价[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(2):308-318.
- [3] 王珊,姜忠见,任涵璐,等. 洪屏抽水蓄能电站地下厂房洞室群渗控措施效果评价[J]. 水电能源科学,2013,31(1):111-114.
- [4] 张路路,徐国宾,王海军. 基于遗传算法的地下厂房荷载参数反演识别[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):26-29.
- [5] 朱国胜,崔皓东,张家发,等. 乌东德水电站坝基及右岸地下厂房区渗控措施研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(9):1722-1727.
- [6] 郑明燕,杨世浩. 糯扎渡水电站地下厂房区渗流场分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2009,42(1):60-64.
- [7] 班宏泰,刘昌军,丁留谦,等. 深埋地下管道及地下洞室群三维渗流场的有限元精细模拟[J]. 水利水电技术,2012,43(9):33-38.
- [8] 倪绍虎,肖明. 地下工程渗流排水孔数值模拟的隐式复合单元法[J]. 岩土力学,2008,29(6):1659-1664.
- [9] 岑威钧,朱岳明,林宝尧,等. 地下厂房防渗排水系统渗流特性的有限元分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(3):267-270.
- [10] 王建新,朱岳明,吴世勇. 深圳抽水蓄能电站地下厂房渗流特性研究[J]. 水电能源科学,2008,26(1):71-74.
- [11] 林伟斌. 裂隙岩体排水孔和排水盲沟渗流模拟方法及其应用研究[D]. 南京:河海大学,2008.