

DOI:10.3969/j.issn.1004-4701.2017.02.06

某水电站洞室群开挖扰动区渗透特性演化及对渗流场影响

唐少龙, 刘颖, 林太清, 万小强, 熊威

(江西省水利科学研究院, 江西 南昌 330029)

摘要: 本文以某水电站左岸地下厂房洞室群工程开挖为依托, 采用应变敏感渗透张量模型结合有限元分析方法对其左岸地下厂房洞室群开挖扰动区渗透特性演化规律进行了研究, 并进行了考虑工程开挖扰动效应与否的情况下左岸厂房区域的渗流场分析研究。研究表明: 厂房洞室群围岩由于开挖卸载导致的渗透系数变化率可达2~3个数量级, 并且渗透系数开挖影响范围与开挖空间尺寸有一定的关系; 地下厂房洞室群附近渗流场受开挖扰动效应影响较为显著, 洞室群周围自由面有一定的下降; 考虑开挖后, 厂区渗漏总量有一定的增加、最大渗透坡降略有减小。研究成果可为水电站厂区渗流控制系统的优化设计提供相关的理论依据, 同时也可为其类似开挖工程提供参考。

关键词: 水电站; 开挖扰动; 渗流分析; 数值模拟

中图分类号: TV139.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-4701(2017)02-0103-05

0 引言

随着我国水电能源的开发、水电站的建设, 必然伴随着地下厂房的建设, 其中洞室群开挖必不可少^[1]。通常水电站坝址区裂隙岩体一般富含节理裂隙、孔隙等非连续结构面, 这些缺陷对裂隙岩体渗流特性起着控制作用。在水电站厂房地下洞室群开挖卸载过程中会导致围岩裂隙网络及裂隙开度的变化、应力重分布, 其中应力重分布在垂直升空面方向表现为卸载、平行临空面表现为加载^[2], 而岩体应力及裂隙开度的改变又将致使裂隙岩体洞室周围一定范围(开挖扰动区)的渗透特性产生明显变化, 进而改变相应区域渗流场的分布^[3,4], 其中开挖引起的渗透特性扰动区(EDZ)范围大小由开挖方式、应力场分布及厂区地质结构等因素共同决定。工程扰动区内裂隙岩体参数是评估开挖扰动对工程影响的重要指标^[5]。因此研究厂房工程开挖扰动区内岩体渗透系数的演化规律, 对厂区渗控措施优化、安全运行及安全性评价具有重要意义^[6]。

本文利用应变敏感渗透张量模型(具体步骤参见文献[7]、[8]), 结合 ANSYS 三维有限元数值分析软件, 研究了地下厂房洞室群在开挖扰动作用下厂区洞室围岩渗透系数的演化规律, 然后采用 SVA^[9](排水孔子

结构、变分不等式和自适应罚函数)对厂区渗流场进行了计算, 并将该结果与不考虑扰动时结果进行对比, 阐述开挖扰动对厂房渗流特性的影响。

1 渗流分析理论

根据 Darcy 定律和水流连续性方程, 稳定渗流微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}) = 0 \quad (1)$$

式中: h ——水头(m);

k_{ij} ——二阶渗透张量(m/s)。

式(1)应满足如下边界条件:

$$\begin{cases} h = \bar{h} & (\text{on } \Gamma_h) \\ q_n = -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_i} n_j & (\text{on } \Gamma_q) \\ q_n = -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_i} n_j = 0 \text{ 及 } h = z & (\text{on } \Gamma_f) \\ q_n = k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_i} n_j < 0 \text{ 及 } h = z & (\text{on } \Gamma_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中: \bar{h} ——已知水头函数;

Γ_h ——第一类渗流边界;

Γ_q ——第二类渗流边界;

收稿日期: 2017-01-12

作者简介: 唐少龙(1990-), 男, 硕士, 助理工程师。

Γ_f ——渗流自由面;
 Γ_s ——Signorini 型互补边界;
 q_n ——法向流量,流出为负(m^3/s)。

2 工程应用

2.1 工程概述

某水电站挡水建筑物为混凝土双曲拱坝,正常蓄水位为 2 254.00 m,调节库容 0.585 亿 m^3 ,最大坝高为 201.00 m,总装机 240 万 kW;地下厂房洞室群位于左岸,由主副厂房、主变室、尾水调压室等构成,水平埋深 300.00 ~ 500.00 m,垂直埋深 200.00 ~ 350.00 m。洞室群尺寸(长×宽×高)分别为 229.40 m×27.40 m×79.31 m(主副厂房)、229.40 m×27.40 m×79.31 m

(主变室)、145.00 m×22.00 m×50.00 m(尾水调压室)。地下洞室跨度大、边墙高,周围岩体受开挖影响大,渗流分析中有必要充分考虑开挖扰动的作用。

坝址区左岸厂围岩岩性较为单一,主要为中粒花岗岩闪长岩,左岸山体在地表附近表现为强风化,总体上呈现弱风化,其中左岸山体共发育 3 组陡倾角优势裂隙,对工程区域渗流起主要控制作用,该 3 组裂隙的几何及力学参数见表 1 所示。根据工程区域内水压致裂法应力测试成果显示,左岸地下厂房岩体最大主应力随深度增加而增加,未见明显的应力集中部位,最大水平主应力约为 11.0 ~ 17.0 MPa,最小水平主应力 6.5 ~ 11.0 MPa,最大水平主应力方向为 N23 ~ 32°E,优势方位为 N30°E,厂区岩体属中等地应力。

表 1 优势裂隙几何及力学参数

裂隙组号	b_0/mm	s/m	$K_n/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	$K_s/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	c_f/MPa	$\phi_f/^\circ$	倾向/倾角
1	1.0	0.75	20.0	10.3	0.42	35.6	NE20° / 75°
2	0.5	0.65	19.8	9.5	0.37	32.8	NW25° / 70°
3	0.9	0.90	21.0	11.2	0.45	36.0	NE110° / 80°

2.2 工程有限元模型

根据水电站厂区工程枢纽布置、地质地形条件、防渗帷幕布置以及排水孔幕和排水廊道布置情况等,建立了左岸地下厂房三维整体有限元模型如图 1 所示。

模型计算范围顺河向以坝基帷幕为基准分别向上游延伸 400.00 m,向下游侧延伸 1 000.00 m;横河向以河道中心线为右侧边界向左岸延伸 1 000.00 m;最低高程取正常蓄水位 2 254.00 m 以下 454.00 m 处高程即 1 800.00 m。整个计算域采用六面体等参单元结合部分退化的四面体单元进行剖分,共划分单元 2 336 203 个,节点 768 541 个。

模型对地层、主要地质构造以及引水、输水系统、厂房、廊道、排水孔等工程结构和防渗排水系统进行了模拟(帷幕采用实体单元模拟),并且对厂区排水廊道、排水孔幕以及防渗帷幕进行了精细模拟。如图 2 所示沿厂房及主变室洞周布置 3 层主排水孔幕 3 层排水廊道,其中排水廊道高程分别为 2 064.50 m、2 093.10 m、2 125.50 m,在其顶拱上部设置“人”字形排水幕;厂区防渗帷幕呈“L”形,从 2 041.00 m 高程布置至 2 259.00 m 高程,帷幕后同时布置 4 层副排水孔幕 3 层排水廊道,其中排水廊道高程分别为 2 111.00 m、2 154.00 m、2 206.00 m。

2.3 计算参数及边界条件

不考虑洞室开挖扰动时,厂区各地层的渗透系数取值如表 2 所示。考虑开挖扰动时,扰动区岩体渗透系数通过应变敏感渗透张量模型求得。

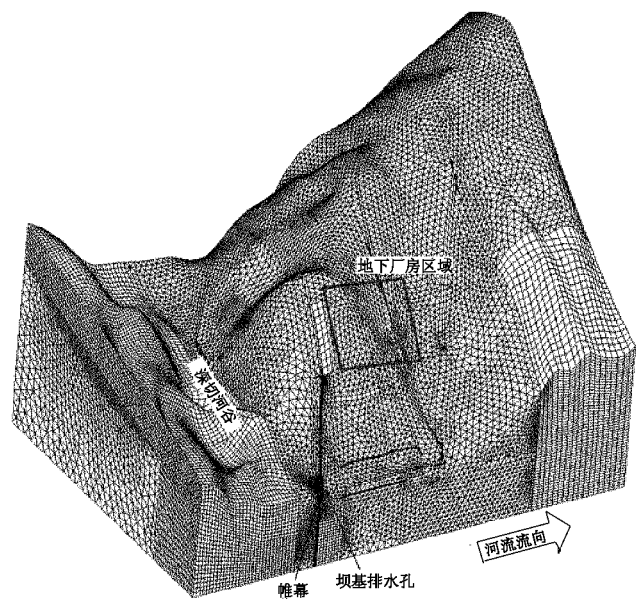


图 1 厂区三维整体有限元模型

渗流分析的边界条件如下:大坝上游库水淹没区及引水隧洞部分取定水头边界,水头值为 2 254.00 m;坝后下游设计水位以下河道表面及尾水管视为定水头,其值为下游设计水位 2 110.00 m;模型底部以及上、下游侧面视为不透水;底层俯孔视为定水头边界,大小取为其上部廊道底板高程;山体中的其它排水孔幕与廊道、3 大洞室及山体表面非淹没区取为溢出边界。

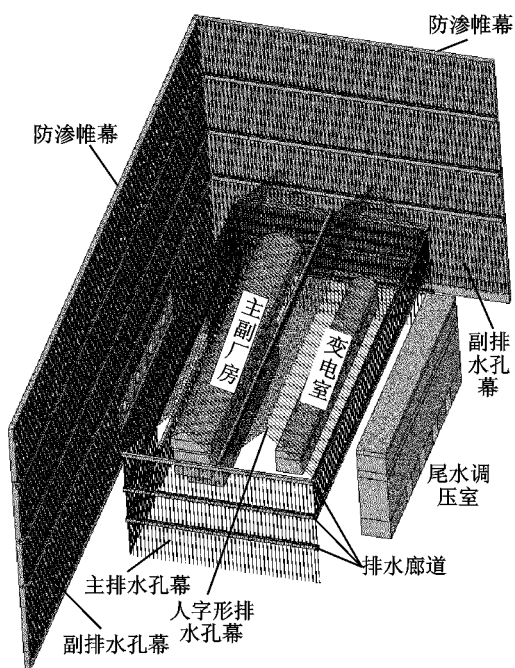


图 2 地下厂房防渗排水系统及洞室布置示意图

表 2 材料渗透系数 cm/s

序号	材料性质	渗透系数
1	强透水岩体	1.0×10^{-2}
2	中等透水岩体	4.0×10^{-4}
3	弱偏上透水岩体	5.0×10^{-5}
4	弱偏下透水岩体	2.5×10^{-5}

3 计算结果分析

3.1 开挖扰动对围岩渗透特性的影响

本研究假设地下洞室群同时开挖,忽略了洞室群开挖顺序及衬砌支护的影响。在进行开挖计算时假设岩体为理想弹塑性体,岩块变形机制采用 D - P 屈服准则,节理裂隙则采用 M - C 屈服准则,两者均采用非关联流动法则。由于洞室群岩体的开挖卸载,应力的强释放,围岩应力重分布将产生近场变形,卸荷裂隙将张开,

采用应变敏感渗透张量模型得出了开挖后水电站厂房围岩 EDZ 区域的渗透系数,再将其值与开挖前的值相除得到渗透系数的变化率 K/K_0 (即开挖后渗透系数 K 与开挖前 K_0 的比值),如图 3 所示。

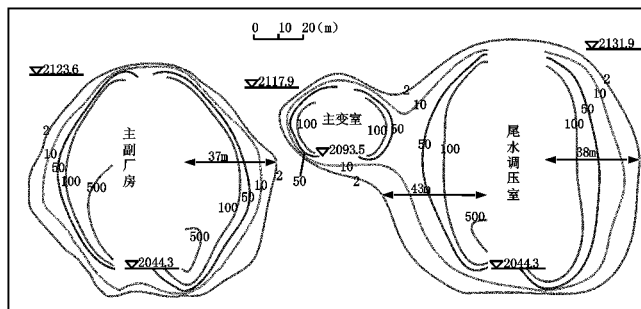


图 3 地下洞室群开挖后渗透系数变化等值线 (K/K_0)

由图 3 中可以看出,地下厂区围岩渗透特性变化区域大小与开挖空间尺寸有关^[10],其中渗透特性变化程度最大发生在主副厂房边墙下部,渗透特性影响范围最大可达 40 ~ 50 m,变化率达 2 ~ 3 个数量级,由于主副厂房开挖空间较大,对围岩中裂隙的开度扰动影响最明显。随着与洞室边墙距离的增大,受工程开挖扰动影响愈小,围岩裂隙开度变化减小,所以渗透特性变化率减少。而渗透特性又是厂房渗流分析与渗控效应评价的基础,因此进行渗流场分析时有必要充分考虑开挖扰动的影响。

3.2 开挖对渗流特性的影响

正常运行工况下,考虑工程开挖扰动后,利用变化后的渗透系数对厂区进行渗流场分析,选取 2 个典型剖面进行对比分析。2 个典型剖面分别为主副厂房中心横剖面 and 主副厂房中心纵剖面。

考虑开挖扰动效应和不考虑开挖扰动效应各剖面的自由面及水头等值线如图 4、5 所示(图中实线为不考虑开挖的影响,虚线为考虑开挖的影响)。由图 4、5 中等值线线形态分布可知,等值线正确的表征了相应渗控结构的特点,渗流自由面在厂区围岩处形成了较明显的降落漏斗。考虑工程开挖扰动效应的影响时,厂房洞室群围岩渗透性增大较为显著,在厂区排水系统的强排水作用下,致使自由面下降较不考虑开挖扰动更为明显,离洞室较远距离对渗流自由面及水头分布影响较小。考虑开挖后自由面从主副厂房底部穿过,主副厂房及主变室均处于干燥的运行环境下。无论考不考虑开挖扰动的影响,厂房顶部“人”字形排水孔幕对地下水作用都无影响,其作用主要疏导排干上层滞水及降雨,

可适当增大该区域排水孔幕的孔间距。

针对不考虑开挖扰动效应和考虑开挖扰动效应的两种计算情况下主副厂房中心横剖面渗透坡降如图6、图7中所示。

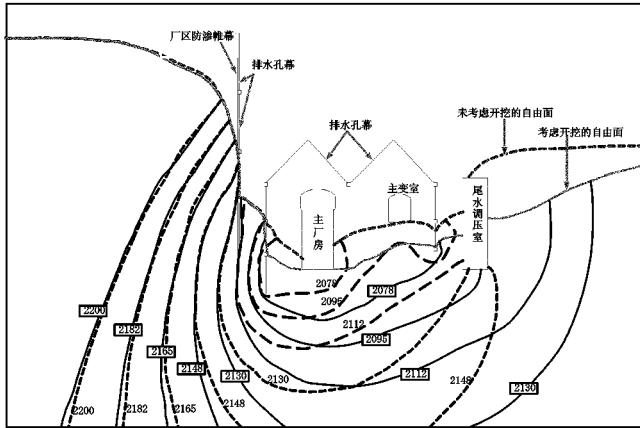


图4 主副厂房中心横剖面自由面及水头等值线图(单位:m)

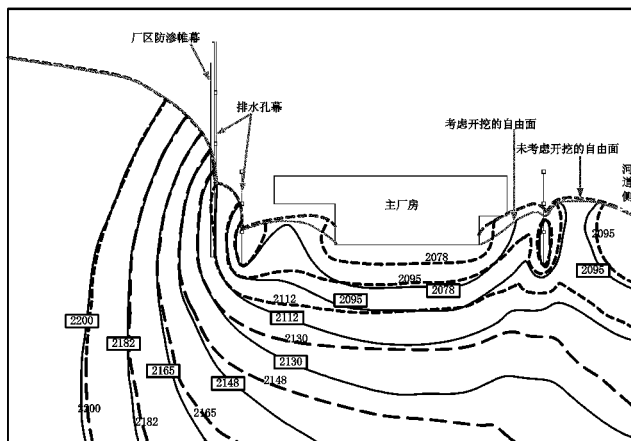


图5 主副厂房中心纵剖面自由面及水头等值线图(单位:m)

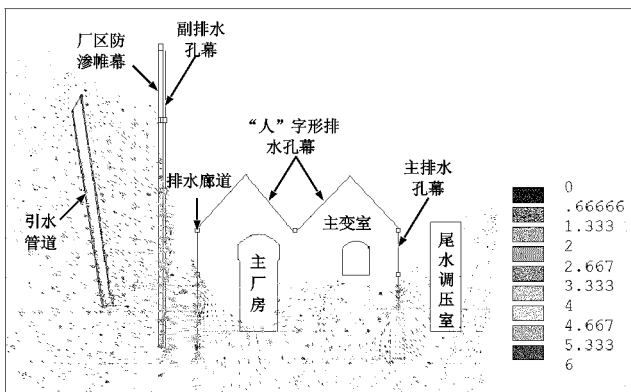


图6 主副厂房中心横剖面渗透坡降(不考虑开挖扰动)

由图6、图7可知,当不考虑开挖扰动影响时,最大渗透坡降出现在厂房上游主排水孔幕底部,值约为6;考虑开挖扰动影响时,最大渗透坡降出现在厂房上游主排水孔幕底部及帷幕中下部,值约为5,相对于不考虑开挖扰动影响最大渗透坡降略有降低,但最大渗透坡降发生区域相同,这是因为围岩渗透系数较大,渗流自由面降低,相同位置压力水头有所变小所致。考虑地下洞室群的开挖扰动时,围岩渗透稳定性较考虑开挖情况更加偏安全,对工程安全稳定运行更为有利。

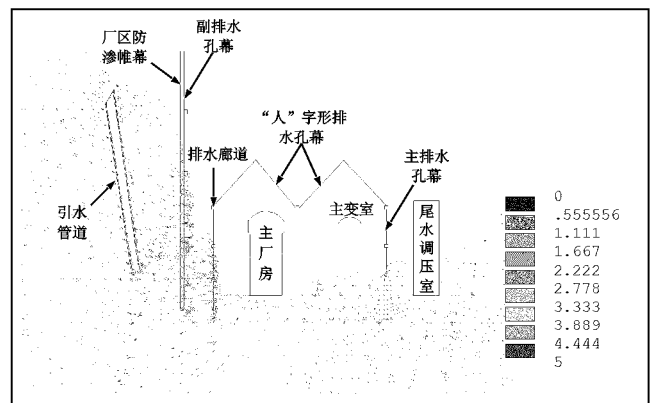


图7 主副厂房中心横剖面渗透坡降(考虑开挖扰动)

3.3 开挖对渗漏量的影响

针对考虑工程开挖扰动与否两种方案,流入厂区各排水廊道及洞室的渗漏量如表3所示。由表3明显可见考虑开挖扰动效应时厂区渗漏总量较不考虑开挖扰动效应时有所偏大,这是由于靠近厂房洞室的岩体应力强烈释放,产生近场变形、裂隙开度变大,岩体渗透系数有所增大所致。从表中还可以看出高高程排水廊道流量由于开挖扰动效应有所减少,这是因为裂隙岩体渗透系数增大致使自由面降低,排水孔集水面积减少所致;而低高程排水廊道渗漏则由于工程扰动流量有所增加,则是因为裂隙岩体裂隙渗透系数增大,排水孔幕区域流速变大造成的。在后期坝工抽排系统的设计时需尽可能的考虑开挖对厂区渗漏量的影响,以充分保证水电站厂区发电系统的安全稳定运行。

4 结论

本文采用应变敏感渗透张量模型得出了洞室开挖后的围岩裂隙渗透影响范围及渗透特性的演化规律,并对考虑开挖扰动效应与否对厂房区域进行了渗流场对比,得到了如下结论:

表3 流入厂区各排水廊道及洞室的渗漏量 L/s

位置	不考虑开挖扰动	考虑开挖扰动
厂房2 111.0 m 高程廊道	5.75	5.13
厂房2 154.0 m 高程廊道	0.46	0.46
厂房2 206.0 m 高程廊道	0.00	0.00
厂房2 064.5 m 高程廊道	14.83	17.09
厂房2 093.1 m 高程廊道	0.31	0.11
厂房2 125.5 m 高程廊道	0.00	0.00
主副厂房	2.74	4.26
主变室	0.10	0.00
总计	24.19	27.05

(1)考虑开挖扰动效应后,洞室围岩一定范围内渗透系数增大较明显,扰动区内增大倍数达2~3个数量级,越靠近临空面变化越大。

(2)考虑开挖扰动效应后,洞室周围渗流场变化显著,自由面下降明显,三大洞室均处于干区状态,更有利于厂房洞室的安全稳定运行。

(3)考虑开挖时最大渗透坡降及渗漏总量较不考虑开挖均有一定程度的影响,具体表现为最大渗透坡降减少、总渗漏量略有增加。

参考文献:

- [1] 杨海清. 裂隙岩体动态损伤局部化机理的理论及应用[D]. 重庆大学, 2010.
- [2] 李睿冉, 张国玉, 赵洪利. 裂隙岩体洞室开挖力学特性研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2010, 41(03): 400~405.
- [3] 周创兵, 熊文林. 地应力对裂隙岩体渗透特性的影响[J]. 地震学报, 1997, 19(2): 154~163.
- [4] 陈红江. 裂隙岩体应力—损伤—渗流耦合理论、试验及工程应用研究[D]. 中南大学, 2010.
- [5] 李扬帆, 盛谦, 张勇慧, 等. 地下开挖扰动区研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(S2): 2083~2092.
- [6] Chen Y F, Zheng H K, Wang M, et al. Excavation - induced relaxation effects and hydraulic conductivity variations in the surrounding rocks of a large - scale underground powerhouse cavern system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, (49): 253~267.
- [7] 陈益峰, 周创兵, 盛永清. 应变敏感的裂隙及裂隙岩体水力传导特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2441~2452.
- [8] Zhou C B, Chen Y F, Sheng Y Q. A generalized cubic law for rock joints considering post - peak mechanical effects[A]. In: Proceedings of Geo-Proc2006[C]. Nanjing: Hohai University Press, 2006. 188~197.
- [9] 陈益峰, 周创兵, 郑宏. 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, 28(2): 89~95.
- [10] 刘会波, 肖明, 陈俊涛. 复杂地下洞室围岩开挖扰动空间效应参数化研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(3): 47~54.

编辑: 张绍付

Excavation - induced permeability variation and its influence in seepage field on caverns of a hydropower station

TANG Shaolong, LIU Ying, LIN Taiqing, WAN Xiaoqiang, XIONG Wei
(Jiangxi Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

Abstract: In this paper, based on the excavation disturbed problems and then analyzed the seepage field when the excavation effects were taken into account or not of the caverns of underground powerhouse in the left bank of hydropower station, which using the strain - dependent permeability tensor model combine with finite element method. Researches show that: the change ratio of permeability of the rock around powerhouses up to 2~3 magnitudes and the size of influenced area related to excavation spatial dimensions; the excavation have a great impact on the seepage field especially near caverns, and free surface have been reduced; when consider the effect of excavation, the leakage of powerhouse be increased and maximum hydraulic gradient decreased slightly. Research achievements can provide relevant theoretical basis for optimization of seepage control system of powerhouse, and also provide references for other similar excavation.

Key words: Hydropower station; Excavation; Seepage analysis; Numerical simulation

翻译: 唐少龙