

Numerical Analysis of Seepage Field in the Upper and Lower Reservoirs of Pumped Storage Power Station

Jiahuan He, Yue Zhang

State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi
Email: he-jiahuan@qq.com

Received: Sep. 6th, 2017; accepted: Sep. 22nd, 2017; published: Sep. 30th, 2017

Abstract

The theoretical basis of numerical analysis of seepage field is reviewed. Based on the geological and hydrogeological conditions of upper and lower reservoirs of a pumped storage power station, the three-dimensional numerical simulation model of dam was established by using ADINA finite element software. The distributions of seepage and seepage field of upper and lower reservoirs under various operating conditions were calculated and analyzed. Under the condition of changing the water level of the upper reservoir, the variation law of the seepage parameters in the reservoir water level is analyzed, and the change of the free surface of the dam is calculated. The water level decreases, such as the head line, the infiltration line and seepage flow. It is concluded that the seepage flow is decreasing but the infiltration line remains essentially unchanged during the descent of the water level.

Keywords

Pumped Storage Power Station, Seepage Field, Upper and Lower Reservoir, ADINA

抽水蓄能电站上下库渗流场数值分析

何佳欢, 张悦

西安理工大学, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安
Email: he-jiahuan@qq.com

收稿日期: 2017年9月6日; 录用日期: 2017年9月22日; 发布日期: 2017年9月30日

摘要

阐述了有关于渗流场数值分析的理论基础, 结合某抽水蓄能电站上下库的地质和水文地质条件, 使用ADINA有
作者简介: 何佳欢(1995-), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事水利工程渗流研究。

限元软件建立了坝体三维数值模拟模型, 计算分析了各种运行工况下的上库和下库的渗流量和渗流场的分布特征。然后在上水库水位不断变化下的情况下, 分析库水位下降过程中渗流参数变化对坝体自由面变化规律, 计算得出水位下降各个工况下的等水头线, 浸润线, 渗流量等渗流关键因素, 得到在水位下降过程中, 渗流量不断减小但是浸润线基本保持不变。

关键词

抽水蓄能电站, 渗流场, 上下库, ADINA

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

抽水蓄能电站作为我国新开发的一种水电站, 在我国可以说是起步较晚, 在上个世纪的六十年代的后期才开始研究有关于抽水蓄能电站的开发和利用, 但是抽水蓄能电站在国外已经有了上百年的历史了。我国在抽水蓄能电站的建设发展较晚, 但是随着技术的发展, 已经有了不少的成就了, 在已建成的几座抽水蓄能电站技术已经处于世界的领先地位了, 其中广东的一、二期抽水蓄能电站是世界上最大的抽水蓄能电站, 它的总装机容量为 2400 MW [1]; 天荒坪与广州抽水蓄能电站机组单机容量 300 MW, 额定转速 500 r/min, 额定水头分别为 526 m 和 500 m, 已达到单级可逆式水泵水轮机世界先进水平; 西龙池抽水蓄能电站单级可逆式水泵水轮机最大扬程 704 m [2]。

在对抽水蓄能电站的渗流研究中, 国内外许多专家和学者做过了许多关于这方面的研究, 任涵璐等[3]在水库渗漏问题以及库区的防渗处理一直为抽水蓄能电站库盆渗控研究的重点为方向, 对洪屏抽水蓄能电站复杂地质条件下的库盆进行了三维有限元模拟; 吴海亮等[4]将回龙抽水蓄能电站上库裂隙岩体分为主干裂隙系统和其间的裂隙岩块系统, 建立双重裂隙系统三维渗流数值模型进行渗流计算。李平等[5]根据蒲石河抽水蓄能电站上库地质及水文地质条件, 建立了裂隙-岩体的三维渗流场数值模拟的模型, 计算分析了水库-岩体系统地下水运动规律及各种工况下的上库渗流量和渗流场的分布特征。孙立昌[6]对位于福建仙游的仙游抽水蓄能电站的上水库和下水库的大坝的在蓄水期的时候下的运行状况进行了分析, 不仅为大坝安全进行了初步评价, 而且也为大坝后期安全运行提供了有力保障, 同时可以供同类工程参考借鉴。刘昌军等[7]采用了有限元软件 GWSS (Groundwater Simulation System) 软件, 即地下室模拟系统, 从而对文登抽水蓄能电站枢纽区以及工程区域的及其复杂的渗流场进行了数值模拟分析, 其中, 重点研究了抽水蓄能电站在正常运行后期工程区域复杂渗流场特性, 以及引水系统管道的外水压力和上水库防渗效果。

抽水蓄能电站一般的组成部分为由上下库系统, 引水系统, 地下厂房系统和尾水系统组成。本文主要的介绍部分是关于抽水蓄能电站上下库系统中上下水库枢纽区的渗流场分析, 对于抽水蓄能电站, 其还包含了数量很多的地下隧洞、密集的排水孔幕、引水尾水管道等等, 还包括了上下库中的防渗系统, 从而形成了抽水蓄能电站复杂的防渗排水系统, 导致其电站工程区渗流场的分布及其复杂。我们在求解抽水蓄能电站渗流场的分布中, 存在着这几个难点: (1) 排水措施的地下厂房洞室群、高压隧洞、排水洞和排水孔等渗流措施控制着渗流场的渗流水头分布, 这方面的建立模型需要及其的仔细, 本文研究内容未涉及这方面的内容, 所以没有建立模型。(2) 地下的高压隧洞和排水洞和高压隧洞以及交通洞的设计尺寸一般较小, 再加上衬砌的分布对渗流场的影响比较明显, 但是在实际建模过程中, 这方面往往很难精确, 并且在网格划分后, 需要采用局部加密的方法来进行

计算,但庞大的数据又给计算带来了许多不方便和难度。

在本论文中,结合该工程实例,研究的基本技术路线为:立足于辽宁某抽水蓄能电站上下库所处的枢纽区的工程地质条件、水文地质条件、坝体及坝基防渗体系的详细分析,深入研究坝体与地基软弱风化层等渗流的合理有效模拟方法,建立合理反映地质结构和防渗体系的三维有限元计算模型,进行各工况条件的渗流计算;评价坝基渗流的合理性,论证分析坝基产生较大渗流量的原因。三维渗流场分析使用的方法是有限元法,采用的是 ADINA 有限元软件中 ADINA Thermal 模块进行建立模型,该软件为大型通用有限元软件。已经运用于多个实例工程的渗流分析。并且取得了很好的模拟成果。

2. 渗流的基本方程

我们通过根据水流的连续性方程,可以得到渗流场中的稳定渗流的基本微分方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial H}{\partial z}\right) + \omega = 0 \quad (1)$$

对于稳定渗流,在其渗流的基本微分方程的定解条件仅含有边界条件,最常见的边界条件为:

第一类边界条件(狄利克雷条件, Dirichlet Condition): 其边界条件可以表述为:

$$H(x, y, z)|_{S1} = \phi(x, y, z) \quad (x, y, z) \in S1 \quad (2)$$

第二类边界条件(诺伊曼条件, Neumann Condition): 其边界条件可以表述为:

$$k \frac{\partial H}{\partial n}|_{S2} = q(x, y, z) \quad (x, y, z) \in S2 \quad (3)$$

自由面边界和溢出面边界条件: 无压渗流自由面的边界条件可以表述为:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial n} = 0 \\ H(x, y, z)|_{S3} = Z(x, y) \end{cases} \quad (x, y, z) \in S3 \quad (4)$$

溢出面的边界条件为:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial n} < 0 \\ H(x, y, z)|_{S4} = Z(x, y) \end{cases} \quad (x, y, z) \in S4 \quad (5)$$

3. 工程概况

某抽水蓄能电站上水库位于摩离红沟沟首,下水库位于河流转弯段下游 350 m 处,上水库采用混凝土面板堆石坝拦沟成库,库盆采用局部防渗方案(帷幕灌浆),正常蓄水位 725 m,死水位 695 m,调节库容 1214 万 m³。根据工程地质及水文地质条件,上水库库岸帷幕深度按伸入 3 Lu 线以下 5 m 控制,同时河床部位趾板帷幕灌浆深度按 1/2 最大坝高控制,两岸坝肩趾板帷幕深度综合考虑地下水位和岩体透水率为 3 Lu 线两个因素,如地下水位高于岩体透水率 3 Lu 线的部位,以岩体透水率 3 Lu 线以下 5 m 作为防渗下限,如地下水位低于岩体透水率 3 Lu 线的部位,则深入以地下水位线以下 5 m 作为防渗下限。该电站的主要参数如表 1 所示。

4. 算例分析

4.1. 计算模型与材料参数

上水库运行期渗流场三维有限元模型以顺河流方向为 Y 轴,向下游为正;以竖向为 Z 轴,向上为正;以横

河流方向为 X 轴，左岸指向右岸为正。下水库的模型是以顺河流方向为 X 轴，向下游为正；以竖向为 Z 轴，向上为正；以横河流方向为 Y 轴，左岸指向右岸为正。建立了清原抽水蓄能电站上水库和下水库的三维立体有限元模型。有限元的模型计算范围如下：

(1) 左侧、右侧、上游及下游边界：根据长期观测资料，反演算计算天然渗流场，边界上水位选为天然地下水位。

(2) 模型的底部，上水库模型底面高程为 250 m，下水库模型底面高程为 150 m，即至坝基开挖面下约为三倍坝高，上水库顶部地表最高高程为 762.76 m，下水库顶部地表最高高程为 369.04 m，都位于较深的基岩内，因此，该边界面上取为隔水边界。

(3) 上水库库内：取为自由逸出边界；下水库库内：施工期取为自由逸出边界。

(4) 对于水库其他主要建筑物，比如压力管道、尾水隧洞、排水廊道及排水孔、电站厂房等在模型建立中概化处理。

(5) 坝体以及坝基各个材料渗透系数如表 2 所示，将表中的材料各个参数添加到渗流模型中进行渗流场计算。所得到的上水库和下水库模型分别如图 1 所示。

Table 1. Main engineering characteristics of a pumped storage power station

表 1. 某抽水蓄能电站主要工程特性表

	项目	单位	指标
	装机规模(MW)		1800
上水库	正常蓄水位	m	725
	死水位	m	695
	正常蓄水位对应库容	万 m ³	1424
	调节库容	万 m ³	1414
	死库容	万 m ³	210
	设计洪水最大 24 h 设计洪量(0.5%)	万 m ³	46.7
	校核洪水最大 24 h 设计洪量(0.05%)	万 m ³	66.1
下水库	正常蓄水位	m	315
	死水位	m	295

Table 2. Permeability coefficient of each partition material

表 2. 模型各分区材料渗透系数

	分区	渗透系数(m/s)
	强风化层	5.6×10^{-6}
	弱风化层	1.1×10^{-6}
	基岩	7.3×10^{-7}
面板堆石区	混凝土面板	5.0×10^{-9}
	垫层区(2A 区)	3.2×10^{-4}
	过渡区(3A 区)	1.1×10^{-3}
	上游堆石区(3B 区)	2.5×10^{-3}
	下游堆石区(3C 区)	2.9×10^{-3}
	护坡	3.0×10^{-3}

4.2. 正常蓄水位下的渗流场分析

当上水库正常运行时,即水库上游为正常蓄水位 725 m,下游为死水位 695 m 时,在标准工况下,上水库面板堆石坝的面板,防渗墙都发挥到正常的防渗作用,所定义的渗透系数均属于标准工况范围。分别得到上水库大坝和下水库大坝的最大剖面处的渗流场分布如图 2 所示,其中上水库最大剖面为当 $x = 400$ m 处,下水库最大剖面为 $y = 350$ m 处,最后可以得到在该工况下的渗流量为 $4303 \text{ m}^3/\text{d}$,下水库渗流量为 $1210 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

4.3. 库水位下降的渗流场分析

在水库水位不断下降的过程中,模拟上游水位分别下降 5 m, 10 m, 15 m 和 20 m 后上下库大坝的浸润线,以及等水头线的变化,分别得到上水库和下水库上游水位在不断变化过程中的最大剖面等水头线如图 3 和图 4 所示。

在库水位下降的过程中,对于面板和防渗墙的防渗作用,坝后浸润线基本保持不变,随着水位的下降,坝体与基岩处的枢纽区域的渗流场的变化也随时变化。上水库和下水库在各个水位下的渗流量分别如图 5 所示。

5. 结语

本文利用了 ADINA 有限元软件的 ADINA Thermal 模块成功数值模拟出来了上下库大坝枢纽区的渗流场,并结合某抽水蓄能电站的相关资料,研究了关于该上水库和下水库在不同的水位情况下的坝体的渗流的变化,可以得到下面结论:

- (1) 通过结合某抽水蓄能电站上下库枢纽区工程资料设定坝体各个材料的渗透系数均在实际工程范围内,具

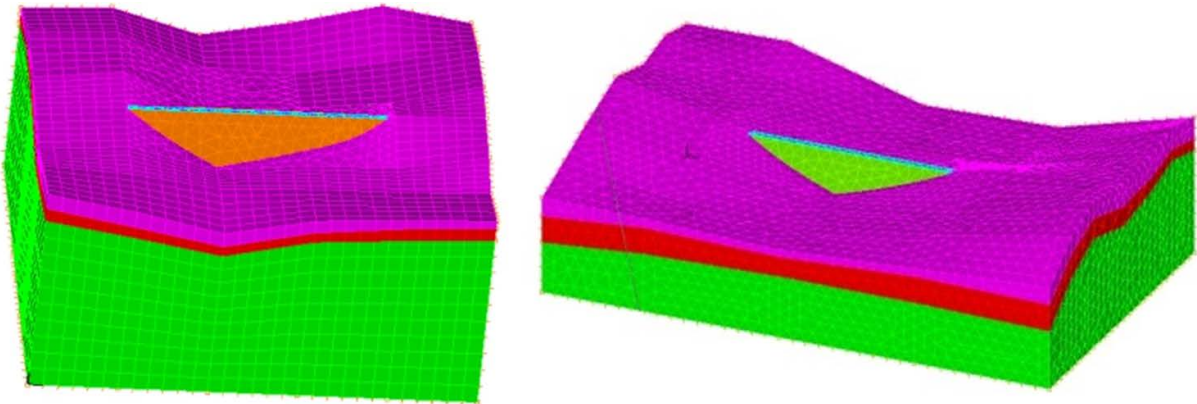


Figure 1. Upper and lower reservoir models

图 1. 上下水库模型

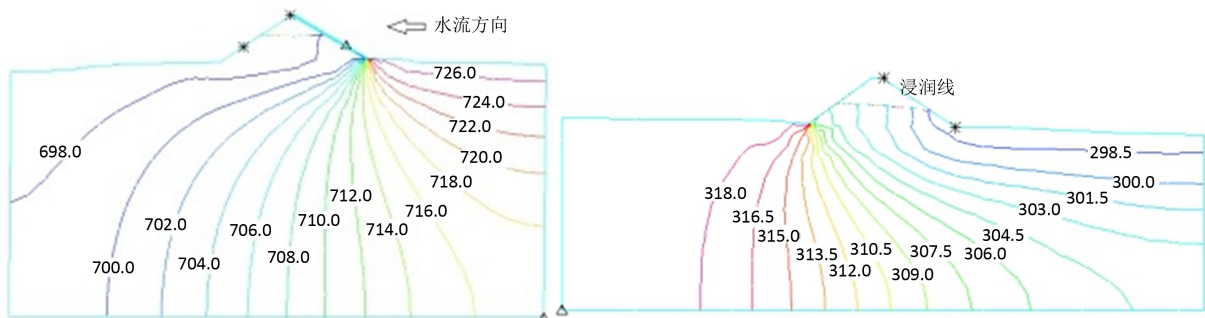


Figure 2. Contour map of the total head of the largest section of the upper and lower reservoir dam

图 2. 上水库和下水库大坝最大剖面总水头等值线图

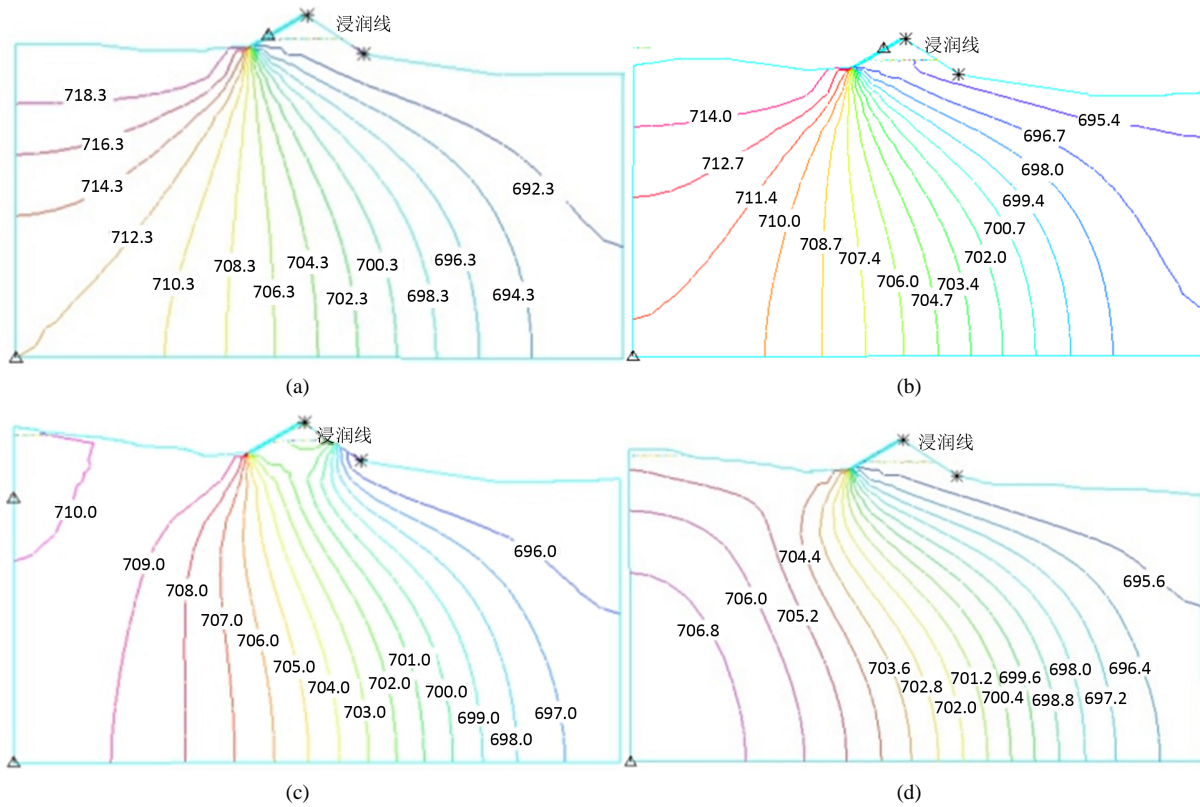


Figure 3. Total head contour map of the largest section when upper reservoir water level drops: (a) Water level drop 5 m total head contour map; (b) Water level drop 10 m total head contour map; (c) Water level drop 15 m total head contour map; (d) Water level drop 20 m total head contour map

图 3. 上水库大坝水位下降时各个水位最大剖面总水头等值线图: (a) 水库水位下降 5 m 总水头等值线图; (b) 水库水位下降 10 m 总水头等值线图; (c) 水库水位下降 15 m 总水头等值线图; (d) 水库水位下降 20 m 总水头等值线图

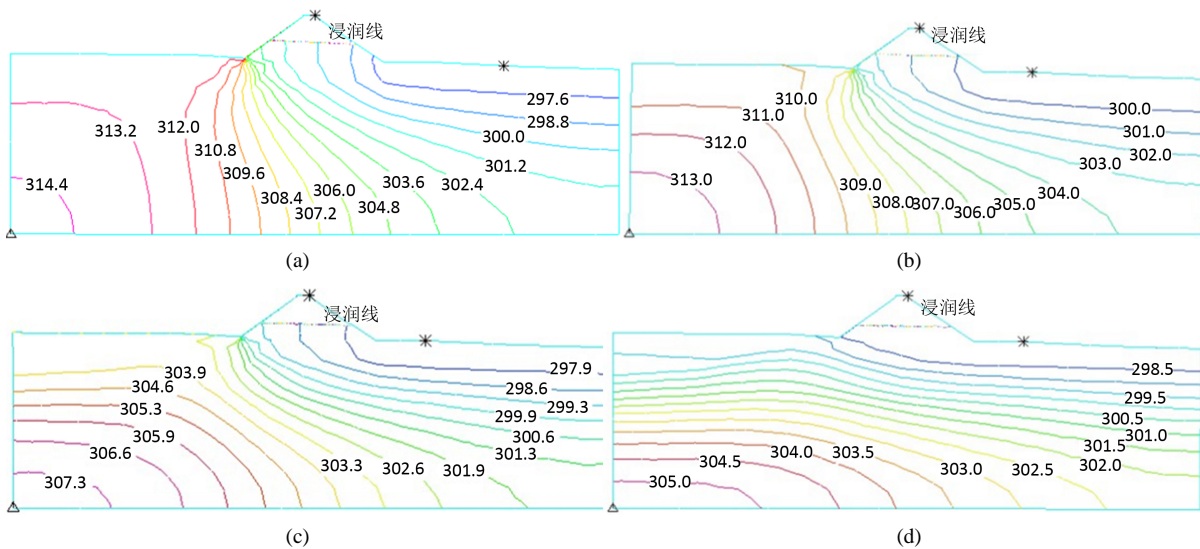


Figure 4. Total head contour map of the largest section when down reservoir water level drops: (a) Water level drop 5 m total head contour map; (b) Water level drop 10 m total head contour; (c) Water level drop 15 m total head contour map; (d) Water level drop 20 m total head contour map

图 4. 下水库大坝水位下降时各个水位最大剖面总水头等值线图: (a) 水库水位下降 5 m 总水头等值线图; (b) 水库水位下降 10 m 总水头等值线图; (c) 水库水位下降 15 m 总水头等值线图; (d) 水库水位下降 20 m 总水头等值线图

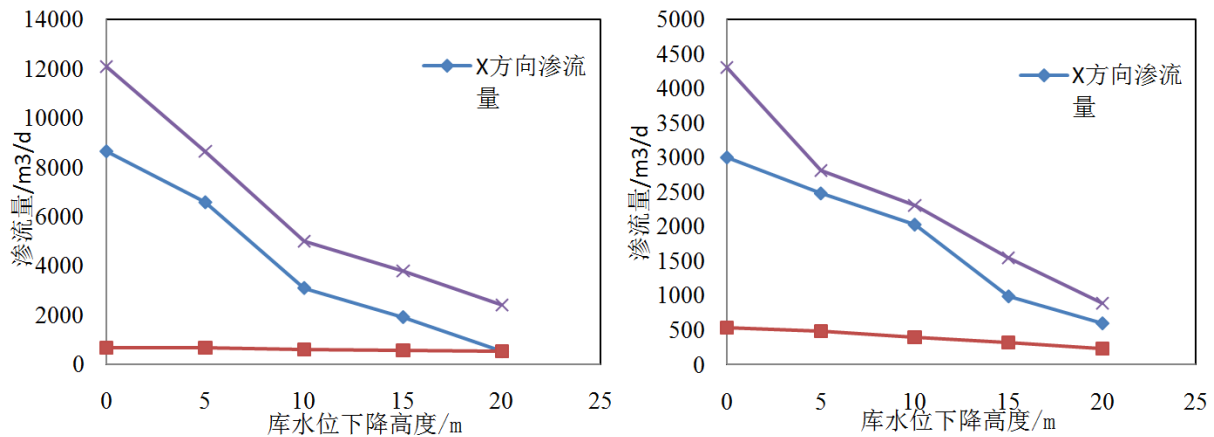


Figure 5. Upper and lower reservoir dam water level drop seepage flow
图 5. 上水库和下水库大坝水位下降渗流量

有一定的真实性，在水位不断下降的过程中的不同工况下的坝体运行都是稳定安全的。

(2) 在上水库和下水库水位不断下降的情况下，库水位的变化基本不会引起坝体内部浸润线的变化，但是渗流量会随之减小，基本呈现线性关系。

(3) ADINA 有限元软件很好的来表达三维立体的坝体模型渗流场的真实渗流情况，相对于 Darcy 定律的二维情况更加真实，清晰明了，可以考虑计算多种工况，计算结果更加真实可靠。

参考文献 (References)

- [1] 冯硕谋. 我国最大的抽水蓄能电站在建设——广州抽水蓄能电站简介[J]. 水电站设计, 1990(4): 91-92.
FENG Shumou. A brief introduction of the Guangzhou pumped storage power station in the construction of the largest pumped storage power station in China. Hydropower Station Design, 1990(4): 91-92. (in Chinese)
- [2] 张娜, 董化宏, 何学铭. 我国抽水蓄能电站建设情况[J]. 中国三峡科技版, 2010(11): 12-15.
ZHANG Na, DONG Huahong and HE Xuemin. Construction situation of pumped storage power stations in China. China Three Gorges Science and Technology Edition, 2010(11): 12-15. (in Chinese)
- [3] 任涵璐, 刘斯宏, 姜忠见, 等. 洪屏抽水蓄能电站上水库库盆三维复杂渗流场分析[J]. 水力发电, 2012, 38(12): 19-21.
REN Hanlu, LIU Sihong, JIANG Zhongjian, et al. 3-D Seepage field analysis for upper reservoir basin of Hongping pumped-storage station. Water Power, 2012, 38(12): 19-21. (in Chinese)
- [4] 吴海亮, 牛贺道, 张有山. 回龙抽水蓄能电站上库渗流模拟计算与防渗新工艺[J]. 水利水电科技进展, 2006(1): 54-56+69.
WU Hailiang, NIU Daohe, ZHANG Youshan. Simulation calculation and new technique for upper layer of Huilong pumped storage power station. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006(1): 54-56+69. (in Chinese)
- [5] 李平, 卢文喜, 李俊, 杨威. 蒲石河抽水蓄能电站上库三维渗流数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(2): 95-98.
LI Ping, LU Wenxi, LI Jun, YANG Wei. Numerical simulation of three-dimensional seepage flow in upper reservoir of Pushihe pumped storage power station. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(2): 95-98. (in Chinese)
- [6] 孙立昌. 仙游抽水蓄能电站上下库大坝蓄水期运行状况分析[J]. 中国水能及电气化, 2015(2): 36-39.
SUN Lichang. Analysis on operation condition of reservoir dam of Xianyou pumped storage power station. China Water Power & Electrification, 2015(2): 36-39. (in Chinese)
- [7] 刘昌军, 王小卫, 徐甲存, 等. 文登抽水蓄能电站地下洞室群复杂渗流场的数值模拟分析[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 73-78.
LIU Changjun, WANG Xiaowei, XU Jiacun, et al. Numerical simulation analysis of complex seepage field in underground chamber group of Wendeng pumped storage power station. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(4): 73-78. (in Chinese)