DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2014.04.031

地下厂区渗流场参数反演分析及帷幕布置方案研究

王 晓[1], 柴军瑞[1,2], 温立峰[1]
(1. 西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 西安 710048;
2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 现代水电站建设中,地下厂区规模日趋宏大。由于地下厂区多位于降雨形成的天然水位线以下,渗漏成为主要问题。针对某工程复杂的地质条件和防渗措施,建立厂房区及坝区的三维整体模型,采用三维有限元法对稳定渗流场进行计算。运用反问题正算的方法反演枢纽区天然渗流场,在此基础上,对两种不同帷幕布置方案下厂区渗流场、渗流量以及坡降等水力要素进行对比分析。分析表明:枢纽区天然水位较高,防渗帷幕和排水孔幕组成的渗控系统对厂房区地下水位具有较好的控制作用;厂前封闭式帷幕相对于开敞式帷幕的渗控效果更加明显,结合渗流控制效果和工程造价的角度,优先推荐采用封闭式帷幕进行厂区渗流控制。

关键词: 渗流场; 反演分析; 渗流控制; 帷幕布置; 地下厂区
中图分类号:TV 139.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2014)04-0152-04

Study on inversion analysis of permeability coefficient and layout scheme of curtain in area of underground plant

WANG Xiao[1], **CHAI Junrui**[1,2], **WEN Lifeng**[1]
(1. *State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Shaanxi*, *Xi'an University of Technology*, *Xi'an* 710048, *China*;
2. *College of Hydraulic and Environmental Engineering*, *China Three Gorges University*, *Yichang* 443002, *China*)

Abstract: In construction of modern hydropower station, the scale of underground powerhouse is increasingly expanding. Because the area is mostly located below the natural water level which is formed by rainfall, so the area faces with the problem of leakage. Aimd at the complex geological condition and seepage control measures, the paper established 3D finite element model in the areas of powerhouse and dam, and took 3D finite element method to calculate the stable seepage field. The permeability coefficients are determined by the back analysis of finite element model based on boring date. Based on the back analysis, the seepage field characteristics of the underground powerhouse cavers are analyzed and the seepage control effects of two kinds of seepage control schemes are compared. The results show that the hub area with high natural water level and the seepage control measures can obtain good seepage control effect. The closed curtain can obtain better seepage control effect compared with opened curtain. The closed curtain would be the priority to control the powerhouse seepage field from the perspective of seepage control effect and project cost effectiveness.

Key words: seepage field; inversion analysis; seepage control; layout scheme of curtain; underground power station

随着水电站建设的发展,地下厂房的规模越来越大。大型地下厂房多建于几十米至数百米山体以下,往往低于天然水位线,因此渗漏是其面临的主要问题[1-2]。目前地下厂房多采用外侧帷幕和内侧排水幕相结合的方法进行防渗,厂房包裹在帷幕及排水幕的内部[3-4]。坝区的防渗排水系统和厂房区的防渗排水系统组成枢纽的整体防排系统。坝区帷幕和厂区帷幕主要有两种布置方式,一是坝基帷幕向

收稿日期:2014-02-25; **修回日期**:2014-04-08
基金项目:陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-015);陕西省自然科学基金项目(2013JQ7010);中国博士后科学基金项目(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。

厂房侧岸边延伸一定距离,厂房位于该帷幕下游侧,该帷幕成为厂房区的主帷幕,同时在厂房区前侧再设置一道帷幕,两个帷幕并不相连,是开敞式的;二是将坝基帷幕和厂房前帷幕相连,组成一个封闭的帷幕系统。现代地下厂房的设计和建设中,对枢纽区天然渗流场进行反演分析,同时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和评价是一个至关重要的问题[5-7]。为了深入分析大型地下厂区渗流场分布特征,全面分析渗流控制措施效果以及合理设计布置地下厂区渗流控制措施,在系统分析地质和水文地质的基础上,根据工程资料建立枢纽区三维模型,采用有限元方法对渗流场进行计算分析。在对枢纽区进行天然渗流场参数反演分析的基础上,重点分析正常蓄水位下,防渗排水系统正常工作时厂房区渗流场分布规律,对比分析两种帷幕布置方案下的渗流控制效果,探讨合理的渗控措施,为渗流控制设计提供依据。

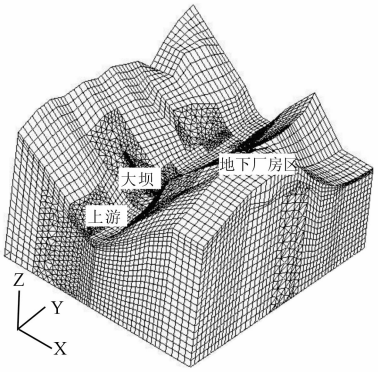
1　工程概况

某水电站位于云南澜沧江上游干流上,水电站以发电为主,水库正常蓄水位 1 906 m,相应库容 2.65亿 m^3,电站装机容量 1 280 MW。枢纽由碾压混凝土重力坝、坝身泄洪建筑物以及右岸引水发电系统组成。地下厂房采用中部布置,主要由主厂房、副厂房和安装间组成,呈“一”字形布置。其中安装间及进厂交通洞布置在主厂房右侧,副厂房位于左侧。主厂房内安装 4 台单机额定容量 320 MW 的立轴混流式水轮发电机组,采用一机一缝的布置方式,厂房总长度为 167.0 m,主厂房下游侧布置交通通道,厂房净跨度 25.0 m,厂房最大开挖高度 72.6 m。坝基布置两道帷幕,上游侧帷幕深度多在 50 ~ 115 m 之间,为坝基的主帷幕,其往右岸延伸或与厂前帷幕相结合成为厂房区帷幕布置的两个比选方案。厂房区防排系统由阻水帷幕和排水幕相结合组成。厂房上游侧设置阻水帷幕,同时在帷幕下游侧设置相应的排水孔幕。厂房区布置三层廊道,其中顶层廊道呈布置“目”形布置,在廊道中设置相应的辐射排水孔,覆盖主厂房、主变室、调压室等主要厂房结构。

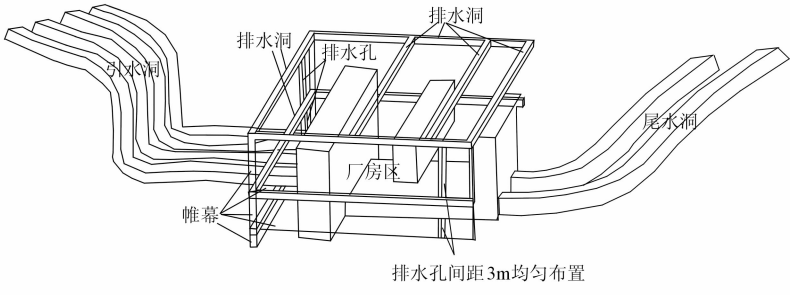
2　渗流场有限元模型

2.1　有限元模型

按渗流场反演分析以及运行期稳定渗流计算需要,分别建立厂区加坝区的大范围整体计算模型。运行期枢纽区计算整体模型如图 1(a)所示,厂房区几何模型如图 1(b)所示,模型详细考虑枢纽布置、排水廊道、排水孔幕和不同帷幕布置方案等情况。根据工程资料,沿坝踵向上游取 410 m,坝趾向下游取 620 m,模型低边界取为 1500 m 高程处,两岸坝肩向左右岸分别取 410 m。本模型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。主要采用六面体八节点等参单元对模型进行剖分,少数部位采用四面体二阶单元。帷幕封闭式方案下模型共剖分单元总数 382 429,节点总数 91 021。模型边界条件取为:模型上下游面以及左右岸侧面按第一类(已知水头)边界考虑,其中上下游面施加相应的已知水深,左右岸侧面施加相应的地下水位线。模型底面、上下游侧面按第二类(已知流量)边界考虑,通过这些面的流量假设为零。本文以稳定渗流方程为控制方程,进行相应的稳定渗流计算。模型渗透分区主要包括河床冲击层、风化层、卸荷层以及完整基岩,主要对以上分区进行渗透系数反演分析。帷幕和坝体的渗透系数根据试验资料分别取为 1×10^{-8} m/s 和 1×10^{-10} m/s。本文采用真实模拟排水孔位置而忽略其尺寸效应方法模拟排水孔的作用[8]。



(a) 有限元计算整体模型

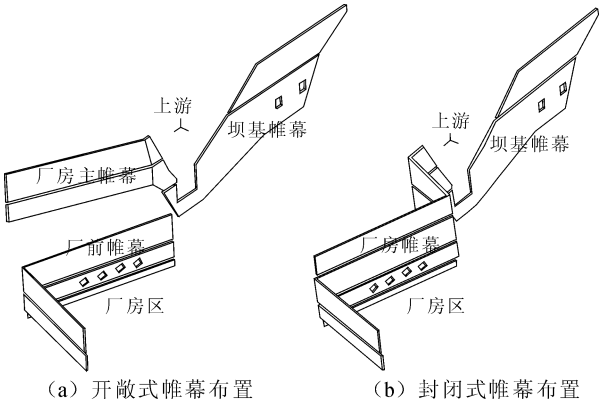


(b) 厂房区几何模型

图 1　计算模型

2.2 计算方案

在对该水电站进行渗流控制措施设计时,设计方把两种帷幕布置形式作为比选方案,以期综合比较获得较优的方案,两种帷幕布置方案见图 2,即坝基帷幕和厂前帷幕不相接的开敞式帷幕布置方案和两帷幕相接的封闭式帷幕布置方案,帷幕下游侧均设置相应的排水孔幕。本文在反演获得各分区渗透系数的基础上,对两种帷幕布置方案计算进行比较分析,并与不设厂前帷幕时进行比较,同时分析帷幕范围对渗流控制效果的影响。本文计算的详细方案见表 1。



(a) 开敞式帷幕布置 (b) 封闭式帷幕布置

图 2 帷幕布置方案

表 1 计算方案

方案	方案说明	方案	方案说明
1	采用开敞式帷幕布置,防渗排水系统正常运行	2	采用封闭式帷幕布置,防渗排水系统正常运行
3	厂前不设任何防渗排水系统	4	采用开敞式帷幕布置情况下,主帷幕向右岸延伸 10 m

3 天然渗流场反演分析

天然渗流场的反演主要是对各分区渗透系数的反演,包括:河床冲击层、风化层、卸荷层以及完整基岩。参数反演主要考虑渗流各向同性模型,以实际钻孔资料为依据。参数反演分析采用“反问题正算法”,即通过不同渗流参数的试算,以最小二乘法拟合和实测浸润面误差最小的最佳反演模型渗流参数[9]。具体的数值计算方法采用三维有限元法,借助大型通用软件 ADINA 进行计算。运用所建立的反演模型,所得参数反演结果如表 2 所示。反演渗透系数下坝轴线剖面水头等值线以及反演所得浸润线位置与钻孔资料拟合的浸润线位置对比见图 3。

表 2 渗透系数反演结果 m/s

分区	参数建议范围值	参数反演值	分区	参数建议范围值	参数反演值
河床沉积层	$1.0\times10^{-4}\sim1.0\times10^{-2}$	5.0×10^{-3}	左岸基岩	$1.0\times10^{-8}\sim1.0\times10^{-5}$	3.0×10^{-7}
风化层	$1.0\times10^{-6}\sim1.0\times10^{-3}$	2.0×10^{-4}	右岸基岩	$1.0\times10^{-8}\sim1.0\times10^{-6}$	1.0×10^{-7}
卸荷层	$1.0\times10^{-7}\sim1.0\times10^{-4}$	8.0×10^{-6}			

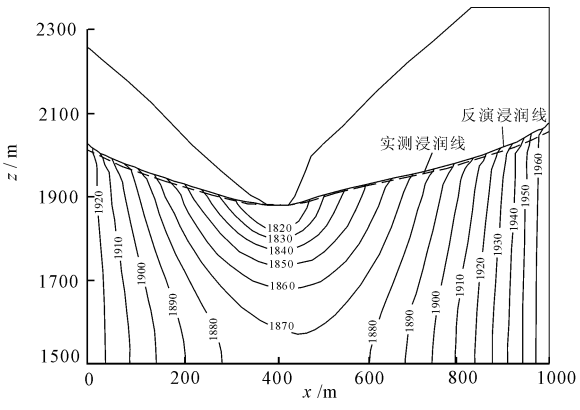


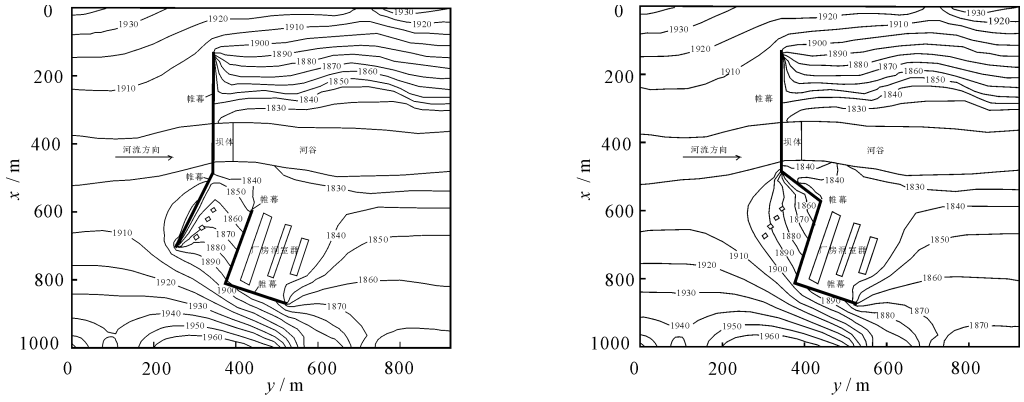
图 3 反演水头等值线(单位:m)

反演所得右岸基岩渗透系数比左岸小,说明右岸基岩整体比左岸完整,这与实测的右岸平均水力坡降比左岸大是吻合的。由图 3 可知,各钻孔的最佳拟合水位略大于实测值,且距离河槽与左右边界越远,其误差越大,最大相对误差为 5.3%,但反演所得浸润线位置与钻孔资料拟合的浸润线位置吻合较好,在其它地质剖面处两者也表现出相同的规律,说明本文反演所得参数较为合理。由反演所得地下等水头线可知,地下水位相对较高,厂房将完全位于地下水位线以下,有必要采用有效合理的防渗排水措施。

4 帷幕布置方案研究

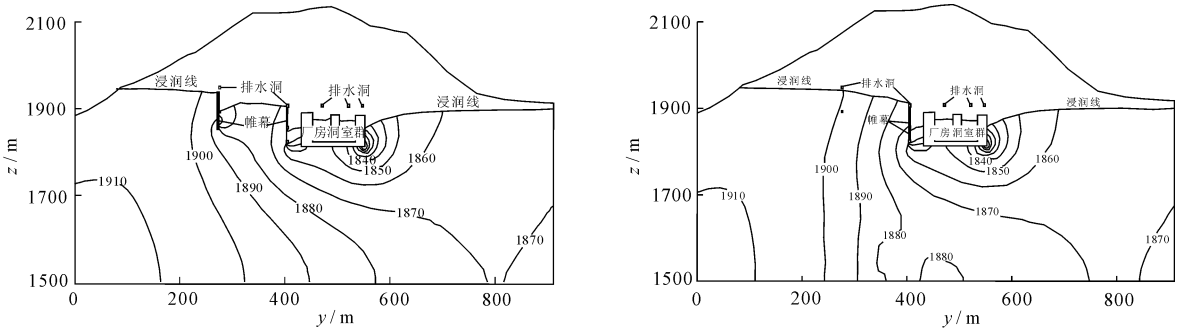
4.1 不同帷幕布置方案下渗流场分布特征

基于天然渗流场反演分析结果,采用三维有限元法,对不同帷幕布置方案条件下运行期厂房区稳定渗流场进行对比分析。图 4、5 分别显示采用开敞式帷幕布置和封闭式帷幕布置两种方案下枢纽区 1840 m 高程平切面水头等值线和厂房纵剖面水头等值线图。



（a）开敞式帷幕布置　　（b）封闭式帷幕布置

图 4　1840 m 高程平切面水头等值线(单位:m)



（a）开敞式帷幕布置　　（b）封闭式帷幕布置

图 5　厂房典型纵向剖面水头等值线(单位:m)

由图可以看出,与厂房前无帷幕计算方案相比,两种防渗方案下,厂区均设置了防渗帷幕、排水孔幕和排水廊道等,都取到了明显的防渗效果,渗流自由面在相应的帷幕之后均有一定程度的跌落。枢纽区出现明显的绕渗现象,特别是厂房区,水头线均有明显降低,大部分位于浸润线以上。

两种方案下由于帷幕布置的差异,水头等值线相应的产生一定差异,主要位于帷幕不同部位,但是两种方案下所降低的厂房区最大水头值基本相同均为 60 m 左右,主要在厂房内侧存在一定差异,封闭式帷幕降低水头较为明显。根据计算结果得出开敞式帷幕布置方案下,厂房区围岩最大水力坡降达 0.96左右,而封闭式帷幕布置方案下达 1.1 左右,两者均在允许水力坡降范围之内。帷幕延伸方案下所得水头等值线分布与原方案结果基本相同,只在延伸部位存在细微差别。

4.2　不同帷幕布置方案下渗流量分析

渗流量是评价防渗排水系统渗控效果的主要指标。各计算方案下枢纽区各部位排出渗流量如表 3 所示。重点对厂房区排出流量进行分析,评价各防渗方案的优劣。

表 3　排出渗流量计算结果　　m^3/h

方案	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	23.322	35.326	22.236	27.473
2	22.619	35.894	18.219	27.132
3	10.150	36.597	23.545	28.021
4	22.977	35.021	21.998	27.356

由表 3 可知,厂前不设防渗排水系统时,厂房区排出流量较小,只有调压室下游边壁排出一定流量,此时厂房基本位于浸润线以下。两种防渗方案正常工作时,厂房区排出流量基本相同,其中封闭式帷幕由于可以截断渗流通道,使厂房区渗流量相对较小,减少了 3.01%。其它部位的流量也呈现出相应的变化规律,为相应部位设置集水井提供必要依据。开敞式帷幕布置下,帷幕范围延伸 10 m,厂房区渗流量减小了 0.345 m^3/h,增加渗流控制效果并不明显。总体来说,封闭式帷幕相对于开敞式可以取得更好的防渗效果。同时本文中封闭式防渗帷幕工程规模明显小于开敞式方案,因此封闭式防渗帷幕应该成为优选方案。

(下转第 160 页)

生火山灰反应,生成 C-S-H 凝胶,细化和减少混凝土界面区域的 $Ca(OH)_2$,未水化的颗粒能够填充于混凝土,能够明显地改善混凝土的密实度,降低混凝土的钙硅比。

参考文献:

[1] Sakai E, Miyahara S. Hydration of fly ash cement[J]. Cement and Concrete Research, 2005,35(6):1135 - 1140.

[2] 张庆欢. 粉煤灰在复合胶凝材料水化过程中的作用机理[D]. 北京:清华大学, 2006.

[3] 孟云芳,孙庆合,王德志. 掺煤矸石混凝土的抗渗性能研究[J]. 中国电力科学技术,2008(14):58 - 65.

[4] 李 响. 复合水泥基材料水化性能与浆体微观结构稳定性[D]. 北京:清华大学, 2010.

[5] 杨恒阳. 复掺锂渣、粉煤灰高性能混凝土强度及早期抗裂性能试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2012.

[6] 周海雷. 锂渣复合粉煤灰混凝土抗氯离子渗透及早期收缩性能的试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2012.

[7] 吴福飞. 环境及荷载对复掺锂渣钢渣混凝土氯离子渗透性能的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学. 2013.

[8] Wu F F, Shi K B, Dong S K. Influence of concrete with lithium-slag and steel slag by early curing conditions[J]. Key Engineering Materials. 2014,599:52 - 55.

[9] Wu F F, Shi K B, Dong S K. Properties and microstructure of HPC with lithium-slag and Fly ash[J]. Key Engineering Materials, 2014,599:70 - 73.

[10] Olson R A, Jennings H M. Estimation of C - S - H content in a blended cement paste using water adsorption[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(3): 351 - 356.

[11] Shehata M H, Thomas M D A, Bleszynski R F. The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(12): 1915 - 1920.

(上接第 155 页)

5 结 语

本文在系统分析地质和水文地质的基础上,根据工程资料建立枢纽区三维模型,采用有限元方法对渗流场进行计算分析。在对枢纽区进行天然渗流场参数反演分析的基础上,对比分析两种帷幕布置方案下的渗流控制效果,探讨合理的渗控措施,主要得出以下几点结论:

(1) 本文反演所得浸润线位置与钻孔资料拟合的浸润线位置吻合较好,本文所得参数结果可以进一步运用于运行期渗流场分析。

(2) 封闭式帷幕布置方案相对于开敞式布置方案渗流控制效果更为明显,同时工程造价明显偏低,推荐成为优选方案。

(3) 延伸帷幕范围可以延长渗径,但是一定程度上延伸帷幕范围对渗流控制效果影响并不明显。

参考文献:

[1] 崔皓东,朱岳明,张家发,等. 深埋洞室群围岩渗流场分析及渗控效果初步评价 [J]. 长江科学院院报, 2009, 26(10):71 - 75.

[2] 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.

[3] 黄 影,赵 坚,沈振中,等. 两河口水电站地下厂房渗流控制布置方案研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(3):35 - 37 + 70.

[4] 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.

[5] 李新强,陈祖煜. 糯扎渡水利枢纽左岸山体三维渗流有限元分析 [J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 638 - 641 + 654.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 李康宏,邓祥辉,何 萌,等. 基于钻孔资料的某尾矿坝渗透系数反演分析有限元模型建立 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(Z1): 4329 - 4332.