# 哈达山水利枢纽右岸三维渗流场特性研究

任杰1,沈振中1,王谊2,马志强2,崔娟1

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 中水东北勘测设计研究 有限责任公司, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 坝基渗漏及渗透稳定问题是哈达山水利枢纽工程遇到的主要地质问题,将影响水库工程效益的发挥和 大坝的安全运行,需采取适当的渗控工程措施.根据工程地质条件,建立了能够反映其主要工程地质构造和坝 基面几何形状的三维有限元模型,并采用固定网格的截止负压法增量迭代技术求解渗流场.考虑正常、设计和 校核3种工况,研究土坝和右坝肩的绕坝渗流场特性,分析浸润面、地下水位分布、渗透坡降和渗透稳定性,估算 渗流量.对防渗墙及基岩渗透参数进行敏感性研究,分析其对渗流场的影响.结果表明,设置防渗墙能有效降低 墙后坝肩和坝体的浸润面,且坝体各部位的最大渗透坡降均满足渗透稳定性要求.

**关 键 词:** 三维渗流有限元法; 绕坝渗流; 渗透稳定性; 敏感性分析 中图分类号: TV139.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2010)03-0089-06

渗流与稳定分析是水利工程分析中的重要组成部分.尤其在现代高坝水利工程中,研究区地质结构复杂,渗透介质具有厚度大、分层多等特征,而且建坝后上、下游水头差较大,枢纽区内绕坝渗流与坝基渗流同时存在,渗流的三维特征十分明显<sup>[1]</sup>,渗透稳定对工程安全和经济合理性的影响越来越突出.通过渗流分析,可研究岩体内渗流要素,从而根据实际情况采取相应措施,以确保工程安全<sup>[1-2]</sup>.目前研究渗透变形的方法大都基于连续介质力学理论,采用有限元法对工程进行模拟计算.Tien-kuen Huang<sup>[3]</sup>用有限元分析了土石坝蓄水后在稳定渗流下的渗透稳定性;S.P. Neuman<sup>[4]</sup>建立了饱和-非饱和渗流模型,该模型可用于垂直渗流、水平渗流、轴对称情况下的三维渗流分析;Y.Q.Xu等<sup>[5]</sup>用饱和-非饱和渗流模型分析了1座土石坝断面的渗透稳定性;党发宁等<sup>[6]</sup>提出了改变渗透系数的固定网格法.

本文以哈达山水利枢纽工程右岸绕坝渗流为例,进行三维渗流场特性研究,以期得到一般规律,并为同 类工程提供借鉴.为真实模拟哈达山水利枢纽区渗流场空间分布特征,建立了能够反映其主要工程地质构造 和坝基面几何形状的三维有限元模型,并对右岸坝基(坝肩)防渗方案进行优化分析,确定了合理的优化设 计方案.其计算原理参考文献[7-10].

1 工程概况

哈达山水利枢纽工程位于第二松花江下游河段,距第二松花江与嫩江汇合口处约60km,是第二松花江 干流最后一级控制性工程,也是《松花江、辽河流域水资源综合开发利用规划纲要》推荐的第一期工程.工程 建设任务以吉林西部工农业和生活供水为主,兼顾生态环境保护供水、发电等综合利用.

本工程由坝区枢纽工程、防护区工程和输水工程组成.坝区枢纽工程由挡水土坝、取水及门库段、溢流坝、河床式电站、重力坝连接段组成,防护区防护工程由防护堤、强排站和排水沟等组成,输水工程则包括渠首闸、输水干渠及其交叉建筑物等.哈达山水利枢纽工程建成后,城镇生活和工业年供水量2.825×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,油

收稿日期:2009-10-16

基金项目:河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项基金(2009586012)

作者简介:任 杰(1980-),男,河南信阳人,博士研究生,主要从事水工结构工程研究. E-mail: henanrenjie@163. com

田年供水量 0.332×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,农村防病改水年供水量 0.159×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;灌溉面积 1.9×10<sup>9</sup> m<sup>2</sup>,其中改善土地 2.9× 10<sup>8</sup> m<sup>2</sup>,新增 16.1×10<sup>8</sup> m<sup>2</sup>,年灌溉供水量 13.942×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>;电站装机容量 34.5 MW,多年平均发电量 1.16×10<sup>8</sup> kW·h.

工程为 I 等大(1)型工程,主要建筑物为1级.水库正常蓄水位140.50 m,校核洪水位143.95 m(相应下游水位140.83 m),设计洪水位142.10 m(相应下游水位139.77 m).黏土均质土坝长1926.4 m,桩号0+506.00 m~2+432.40 m.土坝坝顶高程146.00 m,最大坝高13.00 m,上、下游坝坡均为单级坡,坡度均为1:3.左岸与混凝土溢流坝连接,右岸为漫滩阶地.坝基及右岸漫滩为级配均匀的中砂,厚度15~25 m.坝基 垂直防渗采用塑性混凝土防渗墙,厚0.4 m,上部深入坝体2.0 m,底部深入基岩2.0 m,右岸坝基防渗墙处 理到桩号2+570.00.坝体的渗透系数*K*=2.92×10<sup>-5</sup> cm/s,坝基砂层渗透系数*K*=7.48×10<sup>-3</sup>~2.38×10<sup>-2</sup> cm/s,坝址处于8 度地震区,基岩透水率多为*q*=10~100 Lu,坝基存在渗漏问题.

2 计算模型

#### 2.1 模型范围

计算坐标原点取大地坐标 x=4 988.071 km,y=42 425.569 km.x 轴垂直于坝轴中心线,下游指向为正; y 轴平行于坝轴中心线,右岸指向为正;z 轴为垂直方向,向上为正,与高程一致.上游边界截至坝轴线上游 110.00 m,下游边界截至坝轴线下游 110.00 m;左边界取至桩号 2+000,右边界取至桩号 2+640.00;模型底 截至 104.00 m 高程.该计算模型沿河流方向(x 方向)长 220.00 m,垂直河流方向(y 方向)宽 640.00 m,竖直 方向(z 方向)最大高度为 54.7 m.模型包括了可影响右岸坝基渗流场的主要边界和地质分层,模拟了河谷和 坝基面的几何形状以及坝肩的工程地质和水文地质条件.模型截取范围和主要剖面位置见图 1.



Fig. 1 Interception range and main sections of finite element model

采用控制断面超单元自动剖分技术,分析计算区域各种 地质构造的基础上建立少量典型控制断面,利用这些控制断 面构成超单元,用网格自动剖分程序对超单元进行加密剖 分,从而最终生成有限元网格.针对上述计算区域内切取控 制剖面 10 个,并据此形成三维超单元网格.三维超单元网格 的节点总数为 28 500 个,超单元总数为 5 877 个.加密细分 后形成三维有限元网格,生成的有限元网格结点总数为 20 091 个,单元总数为 20 473 个.计算模型超单元网格如 图 2所示.



Fig. 2 Finite element meshes of calculation model

#### 2.2 模型边界条件

稳定渗流分析的边界类型主要有以下 3 种:(1)已知水头边界:包括上游水位、下游水位以下及底高程 104 m 以上的坝体截取边界;(2)出渗边界:坝体两侧上下游水位以上的截面;(3)不透水边界:包括坝体左 右两截取边界及模型底面.

3 计算成果分析

### 3.1 计算工况

为了深入研究右岸坝基(坝肩)防渗及绕坝渗漏问题,拟定了多种方案、多个工况进行三维渗流有限元 计算分析.计算工况如表1所示,各个工况中所布置的防渗系统与右岸坝基(坝肩)防渗墙连接在一起,构成 封闭的防渗体系.本文首先考虑正常蓄水位、设计洪水位和校核洪水位3种水力边界条件:正常蓄水位为上 游水位140.50 m,下游水位134.08 m;设计洪水位为上游水位142.10 m,下游水位139.77 m;校核洪水位为 上游水位143.95 m,下游水位140.83 m.其次,改变防渗墙和基岩的渗透系数,分析渗透系数变化对渗流场 的影响(见表1).

			5 1 6 5	
工况编号	工况说明	防渗墙渗透系数/(m •s <sup>-1</sup> )	强风化基岩渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> )	弱风化基岩渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> )
HDS-1	正常蓄水位	$1.00 \times 10^{-10}$	2. $00 \times 10^{-6}$	1. $30 \times 10^{-6}$
HDS-2	正常蓄水位	5. 00×10 <sup>-10</sup>	2. $00 \times 10^{-6}$	1. $30 \times 10^{-6}$
HDS-3	正常蓄水位	2. $00 \times 10^{-11}$	2. $00 \times 10^{-6}$	1. $30 \times 10^{-6}$
HDS-4	正常蓄水位	$1.00 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-5}$	6. $50 \times 10^{-6}$
HDS-5	正常蓄水位	$1.00 \times 10^{-10}$	4. $00 \times 10^{-7}$	2. 60×10 <sup>-7</sup>
HDS-6	正常蓄水位	5. 00×10 <sup>-10</sup>	$1.00 \times 10^{-5}$	6. $50 \times 10^{-6}$
HDS-7	正常蓄水位	2. $00 \times 10^{-11}$	4. $00 \times 10^{-7}$	2. $60 \times 10^{-7}$
HDS-8	设计洪水位	$1.00 \times 10^{-10}$	2. $00 \times 10^{-6}$	1. $30 \times 10^{-6}$
HDS-9	校核洪水位	$1.00 \times 10^{-10}$	2. $00 \times 10^{-6}$	$1.30 \times 10^{-6}$

表1 稳定渗流分析计算工况

Tab. 1 Calculation conditions of steady seepage analysis

#### 3.2 渗流场特性分析

**3.2.1** 地下水位等势线分布 分析各工况的地下水位等值线(见图 3)可知:防渗墙对坝肩岩体地下水位分 布影响较大,且地下水位等值线在防渗墙附近较密集,表明防渗墙内地下水渗透坡降较大,水头损失较大,防 渗效果显著.因此,设置防渗墙能有效降低墙后坝肩和坝体的浸润面.



Fig. 3 Isoline of the groundwater level (unit: m)

分析各工况横剖面地下水渗流等值线(见图 4),可见:以剖面 B(K2+218.65)为例,通过改变防渗墙和 基岩的渗透系数,坝体内下游浸润面的最高点分别较正常蓄水位 140.50 m 低 5.936, 5.847, 5.932, 5.230, 6.181, 5.131 和 6.197 m; 剖面 D(K2+470.00), 右坝肩山体内下游浸润面最高点分别较正常蓄水位 140.50 m低 3.637, 3.665, 3.580, 3.393, 3.547, 3.500 和 3.650 m. 这说明该防渗系统可较大程度地降低坝体 和右坝肩的地下水位, 设置防渗墙具有良好的效果.



3.2.2 渗透坡降 地下水表面坡降等值线见图 5, 剖面 A(K2+143.35)的渗流等值线见图 6. 从图 5 和 6 可以看出,防渗墙附近局部的坡降较大,水头损失较大,防渗作用明显. 剖面 A(K2+143.35)防渗墙顶部附近的渗透坡降很大,从该剖面的位势分布可见,该位置防渗墙的顶部位于坝基附近,未插入到坝体,而上游正常蓄水位仍位于防渗墙顶高程以上,因此,该处浸润面陡降,导致渗透坡降较大.由于该部位位于坝体内部,且渗透坡降较大的范围很小,因此,应该不会引起渗透变形.



正常蓄水位工况下坝体内的最大渗透坡降为0.0195,出现在上游坡正常水位入渗点附近,防渗墙和基 岩的渗透性变化对坝体的最大渗透坡降影响不大;防渗墙的最大渗透坡降为1.0000,出现在防渗墙的坝基 高程附近,防渗墙和基岩的渗透性变化对防渗墙的最大渗透坡降影响不大;防渗墙顶部的最大渗透坡降为 0.4490,亦不随防渗墙和基岩的渗透性改变发生变化;右岸坝肩的最大渗透坡降为0.0347,防渗墙和基岩 的渗透性变化对右岸坝肩的最大渗透坡降影响不大.设计洪水位工况和校核洪水位工况下坝体最大渗透坡 降分别为0.0057和0.0232,其出逸点位置都出现在下游坡出渗点附近.由于上游水位发生变化(设计洪水 位、校核洪水位分别比正常蓄水位高1.60和3.45m),因此,下游水位抬升后,下游出现出逸点,并且出逸点 的高程随着上游水位的抬升有所抬高,渗流场的最大坡降略有减少.

各工况坝体各部位的最大渗透坡降均小于黏土的允许渗透比降,因此,坝体各分区均满足渗透稳定性要求.各方案右坝肩的渗透坡降较小,均可以满足渗透稳定的要求.

3.2.3 防渗墙的渗透性对渗流场的影响 计算结果表明,防渗墙的渗透性变化对渗流场的影响不太明显. 当防渗墙的渗透系数放大为原值的5倍时,通过坝基、右坝肩和右岸绕坝的渗透流量比正常蓄水位工况 HDS-1分别增加2.9%,1.7%和2.5%;当防渗墙的渗透系数减小为原值的20%时,通过坝基、右坝肩和右 岸绕坝的渗透流量比正常蓄水位工况 HDS-1分别减小1.6%,1.8%和2.8%.

当防渗墙的渗透系数放大为原值的5倍时,坝体最大渗透坡降比正常蓄水位工况 HDS-1减少了

当防渗墙和基岩的渗透系数同时放大为原值的 5 倍时,通过坝基、右坝肩和右岸绕坝的渗透流量比正常 蓄水位工况 HDS-1 分别增加 31.7%, 71.2% 和 65.6%;当防渗墙和基岩的渗透系数同时减小为原值的 20% 时,通过坝基、右坝肩和右岸绕坝的渗透流量比正常蓄水位工况 HDS-1 分别减小 21.0%, 36.6% 和 26.3%. **3.2.4** 基岩渗透性对渗流场的影响 计算结果表明,基岩的渗透性变化对渗流场的影响较大.当基岩渗透 系数放大为原值的 5 倍时,通过坝基、右坝肩和右岸绕坝的渗透流量比正常蓄水位工况 HDS-1 分别增加 29.3%, 63.1% 和 50.6%,坝体最大渗透坡降比正常蓄水位工况 HDS-1 增加 0.002 3,右坝肩最大渗透坡降 比正常蓄水位工况 HDS-1 减少了 0.001 4;渗透系数减小为原值的 20% 时,通过坝基、右坝肩和右岸绕坝的 渗透流量比正常蓄水位工况 HDS-1 减少了 0.001 4;渗透系数减小为原值的 20% 和 23.8%,坝体最大渗透坡降比正常蓄水位 工况 HDS-1 减少了 0.000 3,右坝肩最大渗透坡降比正常蓄水位工况 HDS-1 增加了 0.001 6.

当防渗墙的渗透系数和基岩渗透系数同时放大为原值的 5 倍时,坝体最大渗透坡降比正常蓄水位工况 HDS-1 增加了 0.004 7,右坝肩最大渗透坡降比正常蓄水位工况 HDS-1 增加了 0.003 7;同时当渗透系数减小 为原值的 20% 时,坝体最大渗透坡降比正常蓄水位工况 HDS-1 减少了 0.002 7,右坝肩最大渗透坡降比正常蓄水位工况 HDS-1 减少了 0.000 6.

#### 4 结 语

(1)防渗墙在较大程度上影响了坝肩岩体的地下水位分布,且地下水位等值线在防渗墙附近较密集,表明在防渗墙内地下水渗透坡降较大,水头损失较大,防渗效果显著.因此,设置防渗墙对降低墙后坝肩和坝体的浸润面有良好的效果;

(2)各工况下坝体各部位的最大渗透坡降均小于黏土的允许渗透比降,坝体各分区均满足渗透稳定性 要求.各工况右坝肩的渗透坡降较小,均可以满足渗透稳定的要求.设计洪水位工况和校核洪水位工况下坝 体的出逸点位置都出现在下游坡出渗点附近,出逸点的高程随着上游水位的抬升有所抬高,渗流场的最大坡 降略有减小.下游坡出逸点的高程随着上游水位的抬升有所抬高,渗流场的最大坡降略有减小.

### 参考文 献:

- [1] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. (MAO Chang-xi. Seepage computation analysis and control[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1990. (in Chinese))
- [2] 柴军瑞. 大坝工程渗流力学[M]. 拉萨: 西藏人民出版社, 2001. (CAI Jun-rui. Seepage theory for dam engineering[M]. Lhasa: Tibet People's Press, 2001. (in Chinese))
- [3] HUANG T K. Stability analysis of an earth dam under steady state seepage [J]. Computer & Structure, 1996, 58(6): 1075-1082.
- [4] NEUMAN S P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements[J]. J Hydraulic Div, 1973, 99(12): 2233-2250.
- [5] XU Y Q, UNAMI K, KAWACHI T. Optimal hydraulic design of earth dam cross section using saturated-unsaturated seepage flow model[J]. Advances in Water Resources, 2003, 26(1) : 1-7.
- [6] 党发宁, 王晓章, 郑忠安, 等. 有自由面渗流分析的变单元渗透系数法[J]. 西北水力发电, 2004, 20(1): 1-3. (DANG Fa-ning, WANG Xiao-zhang, ZHENG Zhong-an, et al. Variable element seepage coefficient method for seepage numerical analysis with free surface[J]. Journal of Northwest Hydroelectric Power, 2004, 20(1): 1-3. (in Chinese))
- [7] LACY S J, PREVOST J H. Flow through porous media: a procedure for locating the free surface [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1978, 11(6): 585-601.
- [8] 速宝玉, 沈振中, 赵坚. 用变分不等式理论求解渗流问题的截止负压法[J]. 水利学报, 1996(3): 22-29, 35. (SU Baoyu, SHEN Zhen-zhong, ZHAO Jian. The cut-off negative pressure method for solving filtration problems based on the theory of variational inequalities[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(3): 22-29, 35. (in Chinese))

- [9] 沈振中, 毛春梅. 稳定渗流场流网的计算与自动化绘制[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1994, 22(5): 75-77. (SHEN Zhen-zhong, MAO Chun-mei. Calculation and automation draft of flow net in steady seepage field [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 1994, 22(5): 75-77. (in Chinese))
- [10] LAM L, FREDLUND D G. Saturated-unsaturated transient finite element seepage model for geotechnical engineering [J]. Advances in Water Resources, 1984, 7(3): 8-12.

## 3D seepage flow field characteristics research for the right bank of Hadashan Hydroproject

REN Jie<sup>1</sup>, SHEN Zhen-zhong<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>2</sup>, MA Zhi-qiang<sup>2</sup>, CUI Juan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Water Northeastern Investigation, Design and Research Co., Ltd., Changchun 130021, China)

Abstract: The geological problems of the building of Hadashan Hydro-project are the seepage of the dam base and its stability of infiltration, which will influence the engineering benefit and the safe operation of the dam, and thus proper measures are needed to control the infiltration. A 3D finite element model of seepage flow is set up, which can simulate the geologic conditions of the structure and the geometrical boundary of the dam foundation based on the technology of fix meshing iteration with the cut-off negative pressure method for solving filtration problems. And normal, design and verification conditions are considered to study seepage field characteristics of the earth and by-pass right abutment. Seepage faces, distribution of ground water level, seepage gradient and seepage stability are analyzed. Sensitivity analysis on the percolation parameter of the cutoff wall and rock base has been done in this paper; and their influence on seepage area is deeply analyzed. The results show that the cutoff wall can reduce seepage face of the abutment and dam, and each part of the dam for the largest seepage gradient can satisfy seepage stability.

Key words: three-dimensional seepage finite element method; by-pass seepage; seepage stability; sensitivity analysis

\* \* \* ĸ International Symposium on Hydraulic Physical Modeling and Field Investigation \* "水工模型试验和原型观测技术国际研讨会"在南京召开 \* \* \* 由南京水利科学研究院主办,国际水利工程与研究协会、中国水利学会、中国水力发电工程学会等国内外相关组织 和机构协办的"水工模型试验和原型观测技术国际研讨会"于 2010 年 9 月 13~15 日在南京隆重召开. \$ 这次国际会议是在测量与控制技术快速发展,物理模型试验和原型观测技术取得长足进步,水科学研究水平不断提 高的背景下召开的.会议主要议题: K 1、物理模型试验新技术;2、原型观测新技术;3、测量仪器与设备;4、复合模型(物模+数模)技术. \* ∛ 这次国际会议通过特邀报告、分议题报告和技术展览等形式对国内外模型试验与原型观测方面的新方法、新技术和 新成果进行广泛交流.会议的顺利召必将有力促进国内外物理模型试验和原型观测技术的进一步发展. \$ 摘自《南京水利科学研究院网站》 \*