

# 阿青水电站沥青心墙坝渗流分析与控制

周 青<sup>1</sup>, 王晓东<sup>2</sup>, 吴梦喜<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团 成都勘测设计院有限公司, 四川 成都 610072; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘 要:** 水电站的渗流计算分析是一项复杂而在设计中又极其重要的工作, 很难获得符合实际的渗流分析结果。结合阿青水电站的渗流控制分析, 全面阐述了水电站渗流分析中熟悉工程概况和水文地质条件, 明确分析任务、概化模型、剖分网格、选取材料参数, 确定了计算方案和边界条件, 整理分析计算结果, 进行方案比较, 分析了参数敏感性的方法和过程, 认为应做好上述每一个环节, 对全面把握工程的渗流性状, 进行防渗排水体系的方案选择和优化的重要意义。分析表明, 河床最大剖面的渗流量不一定比较低坝高剖面的渗流量大, 狭窄河谷心墙堆石坝坝体和坝基总的渗流量, 也可能比大坝最大剖面的渗流量与坝轴线长度的乘积大。

**关 键 词:** 水电站; 有限元; 渗流分析; 渗流控制

**中图分类号:** TV 731.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2015) 增 2 - 0469 - 09

## Seepage analysis and control of asphalt core dam of Aqing hydropower station

ZHOU Qing<sup>1</sup>, WANG Xiao-dong<sup>2</sup>, WU Meng-xi<sup>2</sup>

(1. China Power Construction Group Chengdu Survey and Design Institute Limited, Chengdou, Sichuan 610072, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Seepage analysis of a hydropower station is extremely important in design stage; however realistic results is difficult to obtain for the complexity of the seepage situation. A comprehensive exposition of the seepage analysis process is given based on Aqing hydropower station. Contents including the familiar with the project overview and hydrogeological conditions, a clear analysis of the task, the model generalization and mesh generation, the selection of material parameters, the selection of computing solutions and the determination of boundary conditions, the result analysis, scheme comparison, parameters sensitivity analysis, are introduced step by step. To well done each step makes great sense to fully understand the real seepage situation in the engineering project and a reasonable design for anti-seepage and drainage system. It is not necessarily that the discharge of the greatest section of the dam will be greater than that of sections at the bank. The total discharge may also greater than the product of the length of the dam axis with the discharge at the greatest dam section.

**Keywords:** hydropower station; finite elements; seepage analysis; seepage control

## 1 引 言

渗流分析与控制一直是水电站设计中一项极其重要的工作, 直接关系到工程的费用和安全<sup>[1]</sup>。国内外许多大坝的溃决或破坏是由于渗流控制方面的不足和缺陷造成。美国 Teton 坝是坝高 91.5 m 的宽心墙土石坝, 1976 年 6 月发生垮坝, 事后调查认定发生破坏的基本原因为基岩透水, 在极易冲蚀的分散性心墙坝料接触部位逐渐形成内部冲蚀, 由于没有反滤措施, 裂隙发育的基岩集中渗流通过坝体底

部形成冲刷, 发展为管涌冲蚀通道, 导致大坝完全决口破坏<sup>[1]</sup>。美国 Fontenelle 坝是坝高 42.4 m 的心墙堆石坝, 1965 年发生坝体坍塌事故, 主要原因是心墙与岸坡的接触面发生渗流冲刷侵蚀, 最终形成管涌导致坝体大片坍塌<sup>[2]</sup>。青海省境内的沟后水库为坝高 71 m 的砂砾石面板堆石坝, 于 1993 年 6 月溃决, 重要原因是面板与防浪墙连接处防渗设计和面板后砂砾石坝体排水设计不当<sup>[3]</sup>。我国龙门水库均质土坝、太河水库黏土斜墙坝、龙凤山水库黏土斜墙坝、嵩山水库心墙土石坝等均发生过不同程度

收稿日期: 2014-08-25

第一作者简介: 周青, 女, 1970 年生, 学士, 高工, 主要从事水工设计方面军的研究工作。E-mail: zhouqingcd@sohu.com

通讯作者: 吴梦喜, 男, 1967 年生, 博士, 高工, 主要从事水电工程的渗流、应力变形与边坡稳定性方面的研究工作。E-mail: wumx@imech.ac.cn

的渗流破坏<sup>[4]</sup>。

渗流分析是渗流控制的前提和合理性论证手段。由于水电站的渗流状况很复杂,对于同一个工程,基于相同的基本资料,不同的分析者的分析结果常常差异很大。如何使计算分析结果客观反映工程实际是水电站渗流分析和方案比较与优化的关键,也是一个很重要的研究课题。虽然关于渗流分析计算方法方面和具体水电站的渗流分析成果方面的文章很多,对于一个具体的案例,如何从工程资料着手,进行模型概化、选取计算范围、规划分析方案、确定边界条件,从而通过计算分析,获得符合实际的工程渗流性状和渗流控制方案的文章却很少。不同的水电站由于河谷地形、水文地质、大坝类型和厂房布置差异很大,其合理的有限元计算模型的范围、截取边界位置及边界条件的处理方式<sup>[5]</sup>往往也差异很大,一般需要根据具体的工程情况来确定。本文结合大坝为沥青心墙堆石坝的象泉河阿青水电站的渗流分析与控制,介绍了水电站渗流模型概化、边界条件的选取、计算方案的确定,材料敏感性分析等水电站渗流分析与控制研究的内容。并介绍在此过程中所获得的一些对渗流分析与控制的新的认识或知识。

## 2 工程概况与渗流控制体系

渗流分析的第一步是熟悉工程情况,尤其是工程地质、水文地质和渗流控制方案。

### 2.1 工程概况

阿青水电站位于西藏阿里地区象泉河上,大坝为沥青心墙砂砾石坝,坝高 107 m。枢纽布置如图 1 所示。下坝址河流走向从上游到下游由近东西向转为近南北向,在坝址前有一个大转弯,河弯形如鹅的头颈,大坝处于鹅脖子上,电站位于坝后山坡,处于鹅嘴位置。坝址地形与众多位于峡谷出口两河交汇的电站类似,具典型意义。坝段河谷形态为基本对称的“U”型,河水面(枯期)高程约 3 727 m,河床及漫滩宽约 50~100 m。两岸上部均为土林地貌。河谷 3 760 m 高程以下基岩裸露,自然坡度约为 40°,多陡坎;3 760 m 以上高程谷坡宽缓,自然坡度为 20°~25°。

### 2.2 工程地质与水文地质

左岸岸坡强卸荷水平深度为 13~16 m,弱卸荷水平深度为 30~35 m。右岸卸荷较为强烈,据推测,强卸荷水平深度约为 20~30 m,弱卸荷推测水平深度约为 80~85 m。河床弱卸荷铅直深度约为 25~30 m。强卸荷岩体具中等~强透水;弱风化弱卸荷,

具中等~弱透水性;微新岩体具弱微透水性。透水率有随深度增加逐渐减弱的规律。坝区河床冲积层主要为含漂砂卵石层,其渗透系数一般为  $6.0 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^{-1}$ ,为强透水地层。坝段地下水类型主要有第四系孔隙潜水和基岩裂隙水。第四系孔隙性潜水主要赋存于河谷两岸河漫滩和阶地堆积物中,受大气降水、冰雪融水及基岩裂隙水的补给,受季节影响较大,排泄于象泉河内,水量不丰,水位高程随季节的变化略有升降,在汛期地下水位略高于河水位,并有向岸内翘起的特性;枯水期地下水位与河水位基本一致。基岩裂隙水赋存于两岸基岩裂隙中,接受大气降水和冰雪消融水的补给,补给来源差,水量不丰,排泄于象泉河河谷及松散堆积层内,埋藏深度较深。

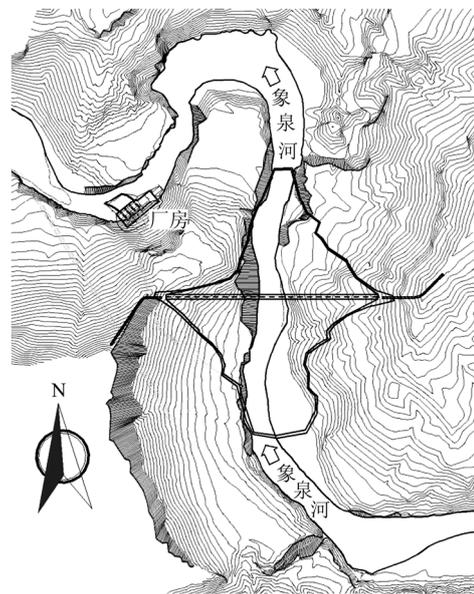


图 1 阿青水电站枢纽布置图

Fig.1 Layout of Aqing hydropower station

### 2.3 大坝设计与防渗体系

大坝防渗体系为坝中央的沥青混凝土心墙、通过坝基廊道和两岸混凝土基座与心墙连接的灌浆帷幕组成。防渗平面帷幕布置如图 2 所示。帷幕范围有 3 个方案:(1)底部延伸至基岩 5 Lu(吕荣值 Lyu Rong's value)线处,左岸延伸至桩号 0~170.00 处,右岸延伸至桩号 0+580.80 处的浅帷幕方案。(2)将浅帷幕方案帷幕深度延伸(3~5) Lu 线的中部的深帷幕方案。(3)将深帷幕方案两端部各缩短 60 m 长度的短帷幕方案。帷幕灌浆孔孔距为 2 m,排距为 1.5 m。

大坝横剖面如图 3 所示。剖面位置在图 2 中已标出,1-1 剖面代表河床剖面,2-2 剖面代表岸坡剖面。沥青心墙顶高程为 3 816.50 m,底高程为

3 709.50 m，心墙顶部厚 0.6 m，至 3 711.50 m 高程处逐渐加厚至 1.14 m，3 711.50 m 至高程 3 709.50 m（坝基廊道顶高程）为心墙大放脚，心墙底部逐渐变厚至 2.34 m。1-1 剖面坝基存在覆盖层，2-2 剖面直接坐落于基岩上，前者坝基高程比后者低 10 m。

坝壳为砂砾石，料场不同级配组合渗透性差异较大，上限平均级配、平均线、下限平均级配对应的渗透系数分别为  $8.93 \times 10^{-5}$ 、 $6.67 \times 10^{-4}$ 、 $6.95 \times 10^{-3}$  m/s。下文进行坝壳料渗透系数敏感性分析时，分别将这 3 个渗透系数作为小、中、大 3 个参数进行计算。

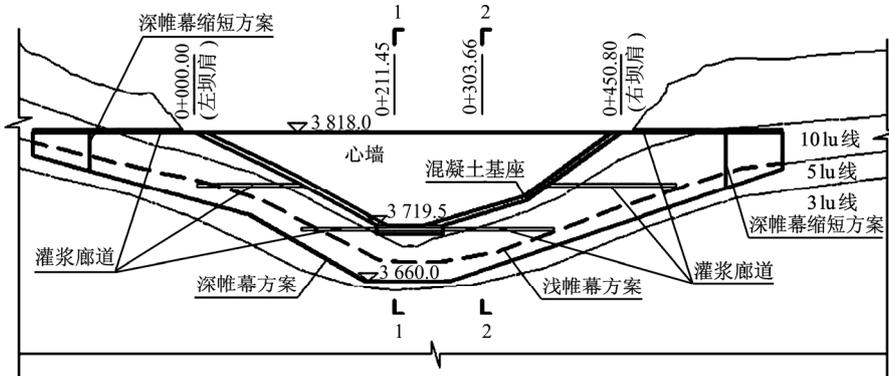
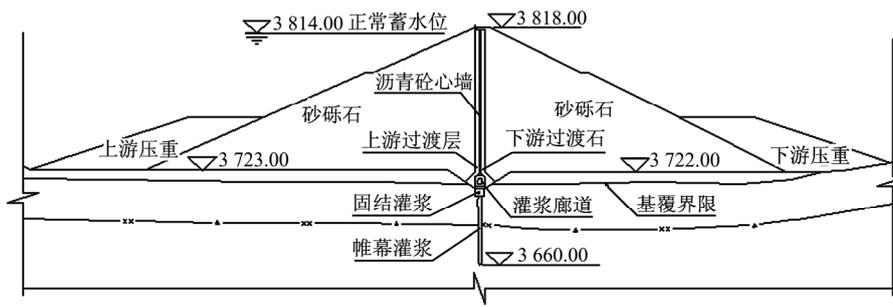
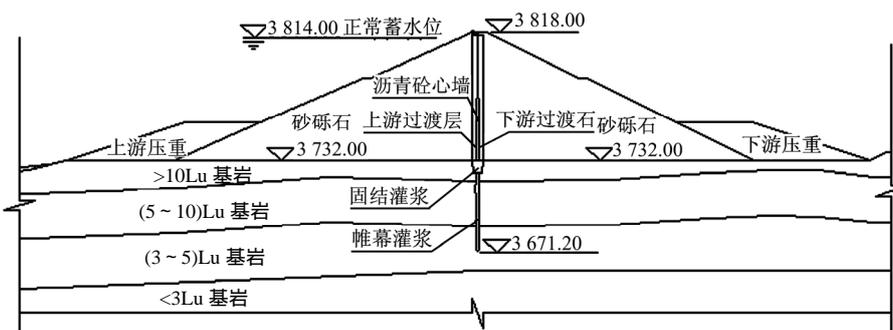


图 2 沿防渗轴线剖面与帷幕灌浆方案 (单位：m)  
Fig.2 Curtain arrangement in anti-seepage plane(unit: m)



(a) 1-1 剖面(0+211.45)



(b) 2-2 剖面(0+303.56)

图 3 大坝横剖面 (单位：m)  
Fig.3 Cross-sections of dam(unit: m)

### 3 渗流分析的任务与模型概化

渗流分析的任务是通过计算分析，获得坝和坝基的渗流场、渗流量和渗透坡降，从而为防渗排水体系的设计提供论证和优化依据。一般先进行二维渗流分析，了解渗流的基本性状，然后进行三维分析，获得水电站的整体渗流性状。

#### 3.1 分析任务

阿青水电站的主要渗流分析任务：(1)对 1-1、2-2 剖面进行二维计算分析，掌握大坝及坝基的基本渗流性状。(2)比较图 2 中 3 个帷幕灌浆方案，确定防渗帷幕的范围，并了解渗流量的总体情况。(3)了解正常高水位工况下游坝壳在砂砾石填筑体不同渗透系数情况下的浸润线位置，包括防渗墙在

出现缺陷情况下的浸润线位置,以确定坝料设计参数和是否需要在防渗墙后增设排水措施。(4)左岸山体在建坝后的绕渗情况以及电站部位边坡的地下水位情况,为此处边坡稳定分析提供地下水渗流场资料。此外,还需要分析水库放空库过程中上游坝壳内的渗流场变化过程,为此工况下的上游坝壳稳定安全性分析提供资料。

### 3.2 模型概化与边界条件

了解工程概况、水文地质、明确分析任务后,接下来就是进行模型概化。实际的渗流是在地表以下的半无限域发生,而渗流计算只能在给定的有限区域内进行,因而确定计算域是模型概化的第一个任务。

渗流计算域的底部和四周是截断边界,而截断处的边界条件往往是难以准确确定的,因而计算域除包括设计对渗流场所关心的区域外,截断边界的位置要取在所采用的边界条件的误差对所关心区域的渗流场的影响较小的位置。

三维渗流计算建模的范围如图4中线框所示。模型左岸截断边界 $AB$ 位于坝 $0\sim 600\text{ m}$ ,右岸截断边界 $ED$ 位于坝 $0+1\ 000\text{ m}$ ,上游截断边界 $BD$ 距坝轴线 $500\text{ m}$ ,下游侧边界右岸侧 $EF$ 距坝轴线 $500\text{ m}$ ,自与下游河道中心线相交处 $F$ ,则沿着河道中心线延伸到与左岸截断面相交于 $A$ (模型范围完全包含 $A$ 右侧下游河道更好)。

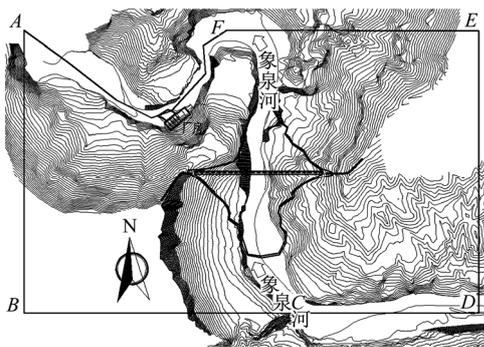


图4 三维有限元渗流计算建模范围

Fig.4 Three-dimensional finite element seepage calculation model range

对于大坝为心墙堆石坝的水电站,常常进行正常高水位和下游最低水位稳定渗流工况的渗流计算,从而论证和优化渗控措施。这一工况下库首的稳定渗流场,其主要地下水来源(1)库水通过坝上游表面、库岸和库底部进入坝体、坝基和两岸山体向下游入渗;(2)分水岭以内大气降水通过地表面入渗,进入包气带,一部分通过蒸发和蒸腾作用返回大气,另一部分缓慢补给地下水向河谷排泄。由

于本工程赋存于两岸基岩裂隙中的基岩裂隙水,接受大气降水和冰雪消融水的补给,补给来源差,水量不丰,定性判断两岸向河谷排泄的地下水量远远小于库水绕渗水量,山体截断边界上进入渗流场的天然地下水流量对水库蓄水后的渗流场影响很小,因而基岩截断面的位置可只考虑库水入渗影响,其边界条件可取为不透水边界。同样的原因,模型范围内降雨入渗对渗流场的影响也可以忽略不计。因而模型的上表面,以高程为 $3\ 818\text{ m}$ 坝顶平面及该平面以下的地表面构成。坝轴线上游,库水位以下为水位等于正常高水位 $3\ 814.00\text{ m}$ 的定水头边界,坝轴线以下地表面,低于 $3\ 720.02\text{ m}$ 的区域为定水头边界,高于此高程的区域为可能的逸出面边界。模型的下表面,为高程 $3\ 200\text{ m}$ 的水平面。该面已经离坝下基岩面最低处超过 $500\text{ m}$ ,该面取为不透水边界。下游覆盖层截断边界取为定水头边界。

二维计算剖面选取了图3中的2个剖面,上下游截断面和底部边界位置及边界条件同三维模型。

三维有限元网格如图5所示,其中防渗帷幕厚 $4\text{ m}$ ,通过改变帷幕区域的材料属性来实现不同的帷幕灌浆范围。剖分 $77\ 954$ 个8节点六面体单元,节点总数 $81\ 304$ 个。模型原点位于坝轴线上,左坝肩 $0+000.00$ ,高程为 $0\text{ m}$ 处, $x$ 轴沿坝轴线指向右岸; $y$ 轴垂直坝轴线指向下游; $z$ 轴正方向向上。水电站渗流中,渗流从渗透系数小的区域流向渗透系数大的区域时,在介质的接触面附近可能存在自由面急剧变化的现象,出现内部逸出面<sup>[6]</sup>。沥青心墙和防渗帷幕后部,设置了处理内部逸出面的渗流接触面单元<sup>[6]</sup>。

模型中各种材料的渗透系数取值也是一个重要的问题。由于岩土材料不是均质的,具有一定的变异性,地质工作者给出的渗透系数也是一个取值范围,而计算只能取定值。一般可先对各材料取中值进行计算,然后对总体的渗流场或渗流量或重点关注部位的渗流场影响较大的材料参数进行敏感性分析,从而全面把握实际渗流场特性及其对工程的影响。表1为基本计算方案中采用的材料渗透系数。

## 4 计算结果比较与分析

本文采用中国科学院力学研究所开发的LinkFEA有限元系统中的SEEPAGE模块进行计算,其算法为饱和-非饱和有限元方法<sup>[7]</sup>,所有材料都采用同一非饱和吸力与相对渗透系数关系见表2。检验后认为,本工程稳定渗流计算工况计算结果对这一关系不敏感。

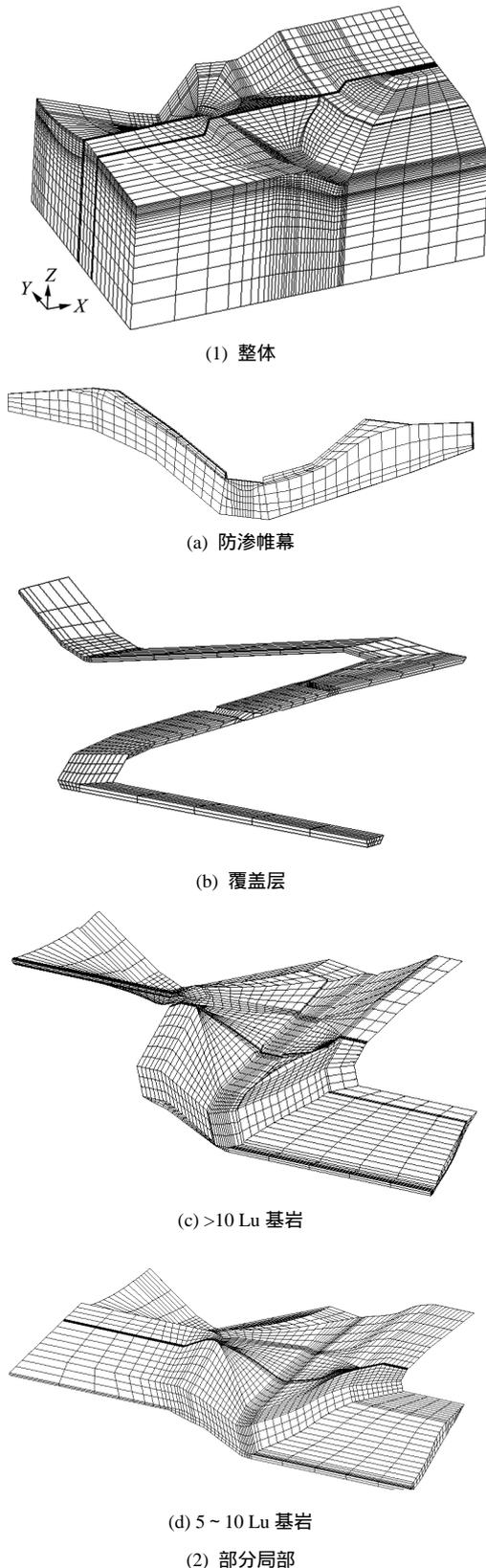


图 5 三维有限元网格

Fig.5 Three-dimensional finite element mesh

值得一提的是，对于水电站工程尤其是心墙堆石坝工程，无论是二维还是三维情况，由于心墙下游面等部位存在内部逸出面现象<sup>[6]</sup>，要获得收敛的正确计算结果，一般来说必须在这些部位设置

表 1 计算所采用的材料渗透系数

Table 1 Permeability coefficient used in the calculation

材料	渗透系数/(m/s)	材料	渗透系数/(m/s)
沥青	$1.00 \times 10^{-10}$	覆盖层	$2.0 \times 10^{-3}$
过渡层	$5.00 \times 10^{-5}$	>10 Lu 基岩	$1.5 \times 10^{-6}$
坝壳料	$6.95 \times 10^{-3}$	5 ~ 10 Lu 基岩	$7.5 \times 10^{-7}$
混凝土	$1.00 \times 10^{-9}$	3 ~ 5 Lu 基岩	$4.0 \times 10^{-7}$
帷幕	$1.00 \times 10^{-7}$	<3 Lu 基岩	$2.0 \times 10^{-7}$

表 2 吸力与相对渗透系数关系

Table 2 Relationships between suction and relative permeability

水头吸力/m	相对渗透系数	水头吸力/m	相对渗透系数
0	1.00	20	0.02
5	0.30	40	0.01
10	0.10	100	0.01
15	0.05		

处理内部逸出面的渗流接触面单元<sup>[6]</sup>，即使设置了单元，由于逸出面部位网格不够细密或接触面算法不够完美等原因，还是会出现迭代计算的误差超过收敛误差的情况。不收敛分为两种情况，一种是材料非线性迭代不收敛，另一种是边界逸出面迭代不收敛。逸出面个别节点边界条件迭代不收敛，有时候只对局部流场有一定影响，对整体流场影响很小，如果是这种情况，并不需要重新剖分网格去追求收敛的计算结果。如果是逸出面边界迭代不收敛，最终的 2 次迭代计算结果总体渗流量、渗流场和各关键部位的渗流场的差异又很小，则计算结果还是可用的，否则，要重新剖分网格以获得收敛的计算结果，这是实际工程渗流计算中获得符合实际计算结果的一个关键。

### 4.1 二维渗流分析

首先对 2 个剖面进行帷幕深、浅两个方案的二维计算，并对坝壳料渗透系数进行敏感性分析。1-1 剖面二维渗流计算所得的等水头线和等渗透坡降线如图 6 所示，各计算方案的渗流量和下游坝壳内的水头降落见表 3，单宽渗流量为 4.43 ~ 4.74 m<sup>3</sup>/d，过心墙的渗流量小于 1%。沥青心墙下游面大部分为内部逸出面，水头降落集中在心墙上，下游坝壳内水头降落仅 4.4 ~ 7.7 m，可见坝壳渗透系数对渗流量和坝壳内水头降落影响不大。浅帷幕的渗流量比深帷幕情况约大 3%。基岩内的渗透坡降防渗帷幕下最大，最大渗透坡降为 4.0，到基岩表面下降为 0.5 以下，覆盖层中的渗透坡降小于 0.1，坝壳内的渗透坡降小于 0.02，均在允许范围内，坝体与坝基渗透稳定性满足要求。

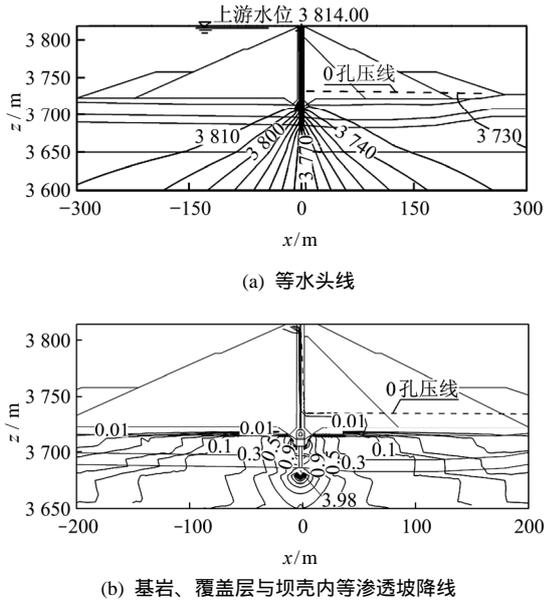


图6 浅帷幕方案 1-1 剖面 (单位: m)

Fig.6 Section 1-1 in case of the shallow curtain (unit: m)

表3 各方案单宽渗流量与下游坝壳内水位降落  
Table 3 Discharge per unit width and water level drawdown in downstream dam shell

编号	方案名称	总渗流量 (m <sup>3</sup> /d)	心墙 (m <sup>3</sup> /d)	帷幕 (m <sup>3</sup> /d)	基岩 (m <sup>3</sup> /d)	下游坝壳 内水位 降落/m
1	浅帷幕大 渗透系数	4.736	0.041	2.397	2.298	4.4
2	浅帷幕中 渗透系数	4.736	0.041	2.397	2.298	4.4
3	浅帷幕小 渗透系数	4.567	0.039	2.310	2.218	7.7
4	深帷幕大 渗透系数	4.588	0.041	3.135	1.413	4.4
5	深帷幕中 渗透系数	4.588	0.041	3.135	1.413	4.4
6	深帷幕小 渗透系数	4.431	0.039	3.025	1.367	7.7

2-2 剖面为左岸剖面, 等水头和渗透坡降情况与此类似, 6 个计算方案, 单宽流量介于 4.68 ~ 5.37 m<sup>3</sup>/d 之间, 与 1-1 剖面相比, 虽然坝高小 10 m, 渗流量反而较大。与一般认为最大剖面渗流量最大的认识不同, 其原因是坝下基岩是主要的渗流通道, 而最大断面下部的岩层的风化深度要低于两岸山坡的风化深度。

### 4.2 三维渗流分析

将图 2 所示防渗平面分成 3 部位, 0+00 以左称为左坝肩, 0+450.8 以右称为右坝肩, 中间部位称为坝轴线。浅帷幕、深帷幕、深帷幕缩短 3 个帷幕方案计算所得的防渗平面渗流量结果见表 4。3 个方案总的渗流量差异小于 2%。坝轴线以外的渗流量

占到了总体渗流量的近 1/3, 这个比例不同的工程差异还很大。3 个方案坝轴线部位的单宽流量分别为 5.29、5.17、5.17 m<sup>3</sup>/d, 与二维横剖面相比, 小于 0+303.66 剖面, 大于 0+211.45 剖面对应的计算方案。总体渗流量大于二维最大断面渗流量与坝轴线长度之乘积。由于渗流流过防渗剖面后, 在河谷具有汇流效应, 因而在三维渗流状况中, 下游坝壳中的水位有可能大大高于二维渗流结果的。因此, 对于狭窄河谷的水电站大坝, 二维渗流的计算结果不足以反映总体的情况。浅帷幕方案地下水位等高线如图 7 所示。y = 100 m 截面内包含 0 孔压线的等水头线图如图 8 所示。两个图结合起来可以看出, 下游坝壳内的地下水位很低, 坝壳排水效果很好, 这一方面是由于沥青心墙的渗流量很少, 另一方面覆盖层的排水能力很强, 很小的水头降落就可以有效排走绕渗流量。其他方案的结果与此差异很小。

表4 各方案渗流量  
Table 4 Discharge in each case

帷幕方案	渗流量/(m <sup>3</sup> /d)			
	左坝肩	坝轴线	右坝肩	合计
浅帷幕	495	2 384	503	3 383
深帷幕	498	2 329	502	3 329
深帷幕缩短	498	2 330	502	3 330

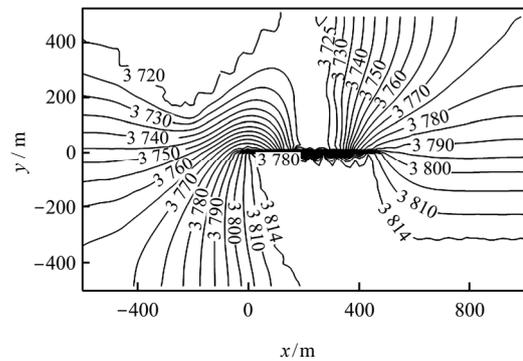


图7 浅帷幕方案自由水面等高线 (单位: m)  
Fig.7 Contours of water table in case of shallow curtain (unit: m)

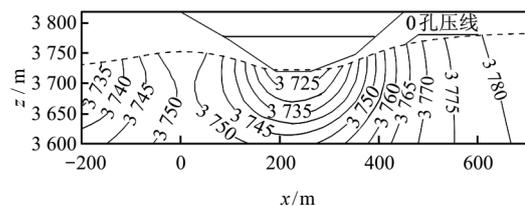
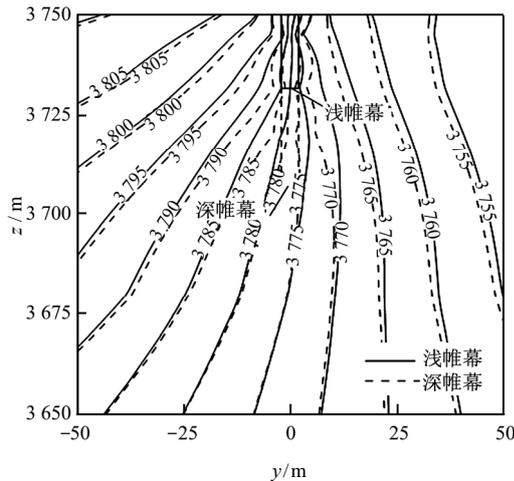
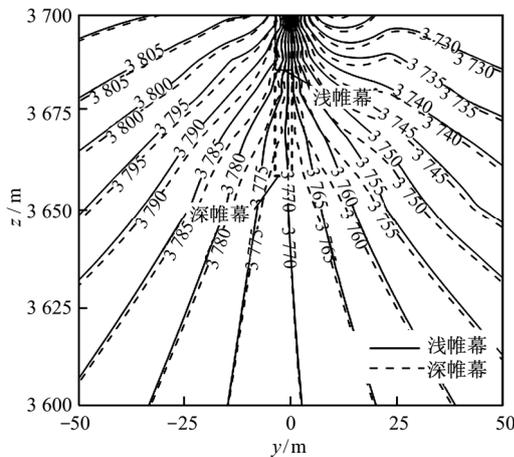


图8 浅帷幕方案 y = 100 m 截面内等水头线  
Fig.8 Contours of head at section y = 100 m in case of shallow curtain

本文中各方案总体差异很小，单独整理等水头线图并进行对比。从图中看不出各方案之中的差异。而比较各方案渗流场之间的异同，是渗流方案论证和比选的关键。因此，必须从方案差异的细部，找出其结果的差异，惟其合理，分析结果才会令人信服。图 9 为深、浅两个帷幕方案防渗帷幕底部的等水头线对比。深帷幕方案与浅帷幕方案相比，在帷幕上游，同一水头等值线位置靠后，即深帷幕方案同一部位水头较大；在帷幕后部同一水头值等值线位置靠前，即深帷幕方案相同部位的水头低于浅帷幕方案，而等水头线的密集程度差异很小；在帷幕上，显然深帷幕方案的等水头线较为密集，说明该处水头降落较浅帷幕为大。两个方案渗流量差异小于 2% 的原因，是因为由于浅帷幕底线与深帷幕底线之间的岩体钻孔压水的吕荣值介于 3~5 Lu (计算时取渗透系数  $4 \times 10^{-7}$  m/s)，仅为帷幕渗透系数的 4 倍，而帷幕的厚度又仅为 4 m，因此，浅、深帷幕方案之间的帷幕对总体的渗流量影响很小。



(a) 0+100.0 截面



(b) 0+223.6 截面

图 9 防渗帷幕部位等水头线对比 (单位: m)

Fig.9 Comparison of head contours in cases with shallow curtain and with deeper curtain at section(unit:m)

深帷幕方案防渗帷幕上游侧的 0 孔隙水压力线 (浸润线) 如图 10 所示。阴影线部位为帷幕缩短方案减少的帷幕范围。相比而言，深帷幕方案帷幕上游剖面的地下水位是最高的，图中帷幕阴影线部位基本上在 0 孔压线以上，即处于饱和渗流范围之外，可见这部分帷幕对渗流场影响很小。

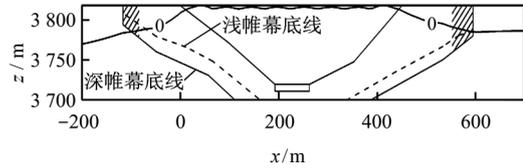


图 10 防渗帷幕上游侧截面 0 孔压线

Fig.10 Position of zero water pressure at the section at the upstream surface of anti-seepage curtain

各部位的渗透坡降是渗流分析的重要内容，一方面二维渗流已有交代，限于篇幅，此处不再列出三维渗流结果。

最终选定的方案为在浅帷幕方案的基础上，右岸坝肩帷幕缩短 40 m 的新方案。

## 5 敏感性分析

材料参数敏感性分析是渗流分析的重要内容，便于全面把握渗流场的变化幅度。下文在三维模型中对坝壳料、覆盖层和心墙渗透系数进行敏感性分析。

### 5.1 坝壳料渗透系数敏感性

坝壳料分别取大、中、小渗透系数计算方案，各方案渗流量和心墙下游水位见表 5。坝壳料不同参数时渗流量的差别小于总渗流量的 2%，渗透系数越大，渗流量越大。坝壳下游迎水面水位最大相差仅 2.4 m，可见在防渗墙完整的情况下坝壳料渗透系数的差异不会显著影响下游坝壳的浸润线，对整体渗流场影响也很小。

表 5 坝壳料取不同渗透系数时的总渗流量及心墙下游水位  
Fig.5 Total discharges and water levels behind the asphalt core wall with varied shell material permeability coefficient

计算方案	渗透系数/(m/s)	总渗流量/(m <sup>3</sup> /d)	水位/m
大	$6.95 \times 10^{-3}$	3 383	3 722.8
中	$6.67 \times 10^{-4}$	3 314	3 724.1
小	$8.93 \times 10^{-5}$	3 248	3 725.2

### 5.2 覆盖层渗透系数的敏感性分析

河床冲积层主要为含漂砂卵砾石层，渗透系数一般为  $6.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-3}$  m/s，取值范围较大，取  $6.0 \times 10^{-4}$ 、 $1.0 \times 10^{-1}$ 、 $1.4 \times 10^{-3}$ 、 $1.8 \times 10^{-3}$ 、 $2.0 \times 10^{-3}$  m/s，

结合坝壳料渗透系数不同的情况进行计算,心墙下游水位与覆盖层渗透系数关系如图 11 所示。覆盖层的渗透系数越大,心墙下游水位越低。水位差值的大小与坝壳渗透系数成负相关。坝壳料渗透系数取  $6.95 \times 10^{-3}$  m/s 时,心墙下游水位结果最大相差 0.26 m,坝壳料渗透系数取  $6.67 \times 10^{-4}$  m/s 时,心墙下游水位结果最大相差 2.04 m,坝壳料渗透系数取  $8.93 \times 10^{-5}$  m/s 时,心墙下游水位结果最大相差 5.75 m。浅帷幕方案覆盖层渗透系数与总渗流量关系见图 12。其他参数相同时,覆盖层渗透系数越大,总的渗流量越大,这点也可以从图 11 的水位与覆盖层渗透系数关系中推求出来,心墙后的水位越低,心墙前后水头差越大,通过心墙剖面的渗流量越大。而图 12 中的流量点有些不符合这一关系,下面先看渗流量差异的大小,再分析结果异常的原因。坝壳料渗透系数分别取大、中、小 3 个值时,覆盖层渗透系数变化所得的渗流量最大差异分别为 0.6%、0.8%、1.4%,可见渗流量差异很小。而渗流量的计算是通过取截面(单元表面)来计算统计的,对于饱和单元很准确,对于部分区域饱和、部分区域非饱和的单元面,由于区域内渗透系数差异很大,高斯积分所得的渗流量的误差很大,总体渗流量统计的误差有 1% 不奇怪,因而会出现图 12 中心墙后水位低一点,渗流量反而小一点。总的来说,覆盖层的渗透系数对渗流量不敏感。对心墙下游水位有一定影响。

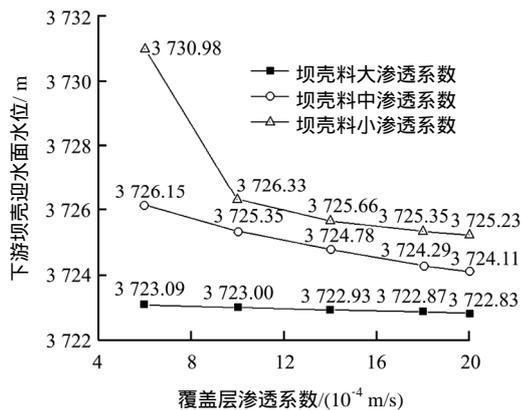


图 11 心墙下游水位与覆盖层渗透系数关系  
Fig.11 Water level behind the asphalt core wall vs. permeability coefficient of the cover layer

### 5.3 心墙渗透系数的敏感性分析

沥青心墙如果出现开裂,其透水能力将大幅度提高。由于具体的开裂部位、裂缝密度与宽度和开裂规模难以确定,为简化起见,对心墙渗透系数范围在  $1 \times 10^{-10}$  m/s ~  $1 \times 10^{-7}$  m/s 之间进行敏感性分析,

以了解大坝在心墙开裂状况下的渗流性状。心墙渗透系数与总的渗流量及心墙下游水位关系结果如图 13、14 所示。心墙下游水位随心墙渗透系数的增大而升高,且坝壳料渗透系数越小,升高越显著。

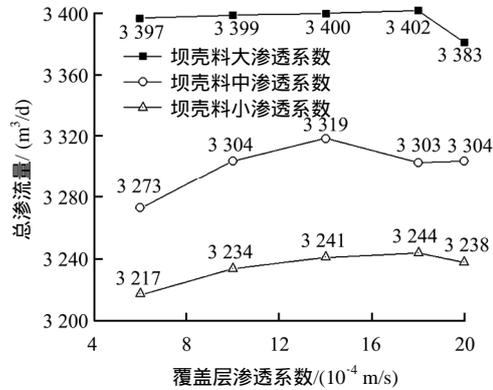


图 12 浅帷幕方案覆盖层渗透系数与总渗流量关系  
Fig.12 Total discharge vs. permeability coefficients of cover layer in shallow curtain case

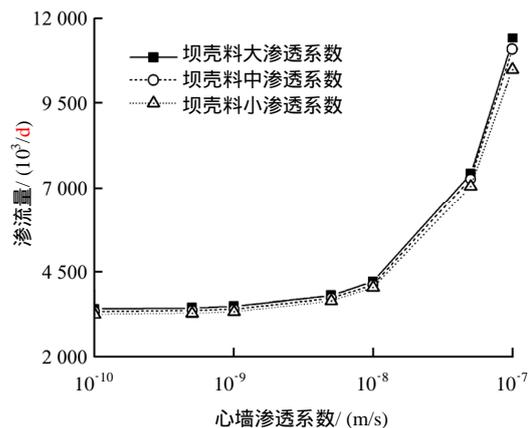


图 13 心墙渗透系数与总渗流量关系  
Fig.13 Total discharge vs. permeability coefficients of core wall

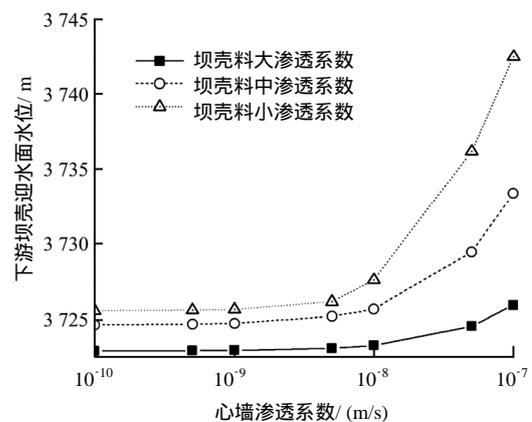


图 14 心墙渗透系数与心墙下游水位关系  
Fig.14 Water level behind core wall vs. permeability coefficients of core wall

取心墙渗透系数  $1 \times 10^{-5}$  cm/s 情况下坝壳料渗透

系数不同时下游坝壳内的水面线如图 15 所示。坝壳料取大、中、小 3 种渗透系数时，心墙下游水位在心墙取最大渗透系数与最小渗透系数时的水位差分别为 16.92、8.75、3.04 m。坡脚出逸点的位置差别仅为 0.1 m，可见即使是坝壳料取下限渗透系数，在沥青心墙的整体渗透系数降低到  $1 \times 10^{-5}$  cm/s，坝基和坝壳也能有效排水，坝体内部不需要另外设置排水措施。

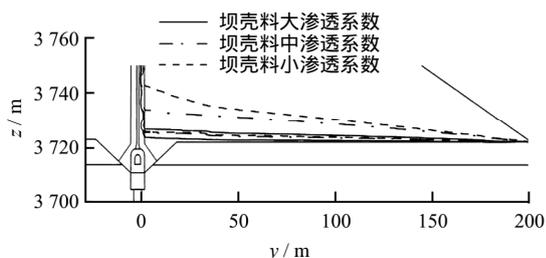


图 15 心墙渗透系数  $1 \times 10^{-7}$  m/s 时下游坝壳内水面线  
Fig.15 Water table in downstream dam shell while permeability coefficient of core wall is  $1 \times 10^{-7}$  m/s

## 6 结 论

(1) 二维渗流不一定最大断面的渗流量最大。

(2) 水电站大坝坝体与坝基三维渗流的渗流量可能大于最大断面的渗流量与坝轴线长度的乘积。

(3) 参数敏感性分析是全面把握渗流场特点的必不可少的内容。

进行水电站工程的渗流分析时建议重视以下工作：(1) 模型概化和边界条件确定必须紧密结合工程的情况来进行；(2) 方案比较要明确指出各方案之间的主要异同；(3) 应进行参数敏感性分析。

### 参 考 文 献

[1] 张有天. 从岩石水力学观点看几个重大工程事故[J].

水利学报, 2003, 48(5): 1 - 10.

ZHANG You-tian. Analysis of several catastrophic failures of hydraulic projects in view of rock hydraulics[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, 48(5): 1 - 10.

[2] 汝乃华, 牛运光. 大坝事故与安全·土石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.

[3] 刘杰. 沟后水库溃坝原因初步分析[J]. 人民黄河, 1994, 40(7): 28 - 33.

LIU Jie. Preliminary analysis of the cause of the dam break of the Gouhou reservoir[J]. **Yellow River**, 1994, 40(7): 28 - 33.

[4] 丁树云, 蔡正银. 土石坝渗流研究综述[J]. 人民长江, 2008, 54(2): 33 - 37.

DING Shu-yun, CAI Zheng-yin. Summary of seepage research for embankment dam[J]. **Yangtze River**, 2008, 54(2): 33 - 37.

[5] 吴梦喜, 杨连枝, 王锋. 强弱透水相间深厚覆盖层坝基的渗流分析[J]. 水利学报, 2013, 58(12): 86 - 94.

WU Meng-xi, YANG Lian-zhi, WANG Feng. Seepage analysis of a dam foundation with deep deposit composed of strong and weak permeable layers alternately[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2013, 58(12): 86 - 94.

[6] WU Meng-xi, YANG Lian-zhi, YU Ting. Simulation procedure of unconfined seepage in a heterogeneous field[J]. **Science China: Physics, Mechanics and Astronomy**, 2013, 56(6): 1139 - 1147.

[7] WU Meng-xi. A finite-element algorithm for modeling variably saturated flows[J]. **Journal of Hydrology**, 2010, 394(3 - 4): 315 - 323.