

# 李家峡大坝6号坝段坝基扬压力异常成因综合分析

包腾飞, 顾冲时, 吴中如

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 针对李家峡大坝6号坝段坝基扬压力产生异常的现象, 建立了该坝及坝基的三维渗流有限元模型。详细介绍了模型中防渗帷幕及坝基、坝体排水孔模拟的方法, 并且利用人工神经网络反演了岩体的渗透系数张量, 对坝基进行了渗流有限元分析, 分析不同防渗、排水以及基岩地质条件下的坝基渗流场, 评估了各种因素对坝基渗流场的影响, 结合坝基钻孔取芯、水质分析等试验成果, 分析了扬压力异常的物理成因。研究表明, 引起扬压力异常的原因是防渗帷幕局部存在缺陷, 且帷幕前浅部岩层存在强透水带。建议对右岸6号坝段坝基进行灌浆处理, 以阻断渗漏通道, 提高防渗帷幕的阻水效果, 并加强对渗水的抽排工作, 以有效地降低扬压力。

**关键词:** 渗流; 扬压力; 异常; 渗透系数张量; 排水孔; 防渗帷幕

**中图分类号:** TU411.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2008)10-1460-07

**作者简介:** 包腾飞(1974-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 副教授, 从事水工结构及岩土工程的安全监控、评估及反馈分析方面的工作。E-mail: baotf@hhu.edu.cn。

## Analysis of uplift pressure anomaly of Lijiaxia Dam foundation

BAO Teng-fei, GU Chong-shi, WU Zhong-ru

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** With regard to the uplift anomaly phenomenon occurred in the right abutment of Lijiaxia Dam in China, a three-dimensional finite element model for seepage of the dam and its foundation was established. The methods of modeling the seepage prevention curtains were introduced. The drainage holes were modeled as so-called drainage sub-structures. Then an approach of back analysis for seepage parameters based on artificial neural network was proposed. The back analysis was conducted and the permeability tensors of the rock masses were obtained. The three-dimensional finite element analysis of seepage flow through the dam and its foundation was performed. Using the analytic results the influence of various factors such as seepage prevention measures, drainage and geologic conditions in the seepage field was evaluated, and then the cause of uplift anomaly was investigated combined with the results of the drilling and water quality tests in the foundation. It was shown that anomaly phenomenon was due to the grout curtain defects and leakage channel exiting in the shallow foundation.

**Key words:** seepage; uplift; anomaly; permeability tensor; drainage hole; grouting curtain

## 0 引 言

渗漏及扬压力超限等渗流问题是大坝运行中值得特别关注的问题, 这些问题不仅造成水资源的损失、恶化大坝的运行环境, 同时也会影响大坝的稳定性, 甚至造成大坝的失事。针对不同的渗流问题, 国内外开展了一系列的研究, 以揭示其成因机理, 为采取适当的工程加固措施提供依据。Malkawi 等<sup>[1]</sup>在分析约旦 Kafrein 坝的渗流问题时, 提出了“激励-反应”法, 即降低该水库水位, 观察渗漏和扬压力的反应情况, 以此追踪坝基的渗漏通道及其成因。Ghobadi 等<sup>[2]</sup>提出了 X 射线荧光分析法, 以此分析了位于伊朗岩溶地区的 Shahid Abbaspour 拱坝右坝肩渗水的 MgO 和 CaO 含量, 以揭示渗漏通道的具体位置。宋汉周等<sup>[3]</sup>

从地质的角度, 探讨了大坝局部扬压力异常的起因。刘凤林等<sup>[4]</sup>根据固山大坝的地质情况及水质分析的成果, 分析了该坝扬压力超限问题。周志芳等<sup>[5]</sup>采用多元回归分析、流量衰减分析等相结合的方法, 研究了新安江水电站三坝段扬压力异常机理。由于渗流问题的复杂性, 单纯用一两种方法难以揭示其成因机理, 为此, 本文针对李家峡水电站大坝6号坝段扬压力偏高现象, 采用数值模拟、钻孔取样、水质分析等多种

**基金项目:** 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50539030); 国家科技支撑计划课题(2006BAC14B03); 国家自然科学基金项目(50539010, 50539110, 50579010); 河海科技创新基金项目(2013/406069)

**收稿日期:** 2007-09-21

手段, 结合坝址区的工程地质及水文地质条件, 综合分析其物理成因。

李家峡水电站位于青海省尖扎县与化隆县交界处, 是黄河干流上游的大型梯级水电站之一。水电站属大 (I) 型一等工程, 以发电为主, 兼有灌溉等综合效益。李家峡水电站枢纽由混凝土双曲拱坝、左岸重力墩、左岸副坝、泄水建筑物、水电站引水系统、坝后双排机厂房等组成<sup>[6]</sup>。坝址区位于李家峡峡谷中段, 坝址处河流流向  $NE78^{\circ} \sim 82^{\circ}$ , 河谷为 V 型河谷, 两岸谷坡基本对称, 左岸地形平均坡度  $45^{\circ}$ , 右岸平均  $50^{\circ}$ 。右岸山体雄厚, 左岸沿坝轴线下游约 220 m 处有深切达百余米的左坝沟及其支沟分布, 左坝顶形成一个三面临空的山梁, 使得坝后支撑岩体显得单薄。坝址区岩石主要由前震旦系混合岩与片岩组成, 其间穿插有华力西期花岗伟晶岩脉。混合岩单层厚度 6~20 cm, 岩质硬脆, 片理及隐裂隙发育; 片岩单层厚度 40~20 cm, 岩质较混合岩稍软。前震旦系地层为单斜构造, 片理产状为  $NW300^{\circ} \sim 330^{\circ} SW \angle 38^{\circ} \sim 55^{\circ}$ , 倾向上游偏右岸<sup>[7]</sup>。坝址区两岸地下水水力坡降较陡, 地下水对普通硅酸盐水泥具有较强的结晶类硫酸盐腐蚀性。

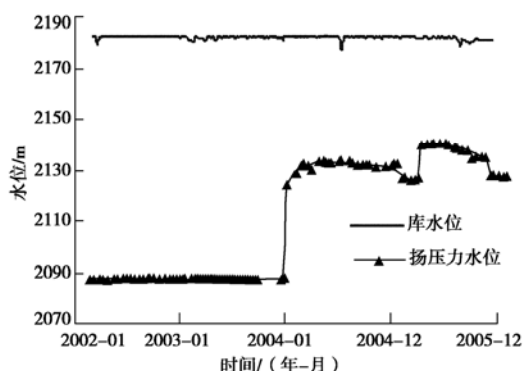


图 1 Y6-1 扬压力测孔实测过程线

Fig. 1 Diagram of uplift pressure at the measuring point Y6-1

李家峡水电站大坝运行期间, 右岸 6 号坝段基础灌浆廊道内 Y6-1 扬压力孔在 2004 年 1 月扬压力水位从原来的 2088.08 m 突增至 2124.68 m, 增幅达 36.60 m, 其后最大值达到了 2141.08 m, 大部分时间维持在 2130 m 左右, 高出测孔孔口高程约 43 m, 如图 1 所示。而在此期间, 上游库水位比较稳定, 无明显的变化。右岸 6 号坝段扬压力明显偏高, 同时发现该坝段廊道底板渗水析出物较多等问题, 为此, 李家峡发电分公司会同设计、施工、运行等多个单位或部门, 多方查找原因, 但未能找出其成因。右岸 6 号坝段扬压力的异常现象, 严重影响了坝体的安全运行, 一直困扰该坝的运行和管理工作。因此, 有必要对其成因做具体分析, 为大坝运行管理人员采取相应的工程措施

提供依据, 以达到坝体安全运行、工程充分发挥效益的目的。

本文将对该工程区渗流场进行三维有限元分析, 分析不同防渗、排水以及基岩地质条件下的坝基渗流场, 评估各种因素对坝基渗流场的影响, 结合设计、施工以及运行单位的试验成果, 分析 6 号坝段扬压力异常的物理成因, 为该工程的补强加固提出建议。

## 1 渗流场求解基本理论

### 1.1 基本方程

非均质各向异性多孔介质中的稳定饱和渗流连续微分控制方程为<sup>[8-10]</sup>

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + Q = 0 \quad (1)$$

式中  $x_i$  为直角坐标 ( $i=1, 2, 3$ );  $k_{ij}$  为达西渗透系数张量, 描述岩体透水能力和渗透各向异性特性;  $h=x_3 + p/\gamma$  为总水头,  $x_3$  为位置水头,  $p/\gamma$  为压力水头,  $\gamma$  为水的容重;  $Q$  为源汇项。

### 1.2 边界条件

$$h|_{\Gamma_1} = h_1 \quad (2)$$

$$-k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i |_{\Gamma_2} = q_n \quad (3)$$

$$-k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i |_{\Gamma_3} = 0, \text{ 且 } h=x_3 \quad (4)$$

$$-k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i |_{\Gamma_4} \geq 0, \text{ 且 } h=x_3 \quad (5)$$

式中  $h_1$  为已知水头函数;  $n_i$  为渗流边界面外法线方向余弦 ( $i=1, 2, 3$ );  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$  和  $\Gamma_4$  分别为第一类和第二类渗流边界、渗流自由面和渗流逸出面;  $q_n$  为法向流量, 流出为正。

### 1.3 有限元法求解

根据研究区域的水文地质结构, 把渗流场离散化为有限个单元, 引入单元形函数, 然后根据变分原理可建立上述问题的有限元控制方程

$$[K]\{h\} = \{Q\} \quad (6)$$

式中  $[K]$  为总传导矩阵;  $\{h\}$  为结点水头阵列;  $\{Q\}$  为结点等效流量阵列。

## 2 关键问题的处理

### 2.1 防渗帷幕及排水孔的模拟

坝基渗控条件的改变通常是影响和改变坝基渗流场分布的决定因素, 而防渗帷幕和排水孔布置则是渗控措施的核心。为了分析坝基渗流场的状态, 必须正确模拟帷幕和排水孔, 以便了解帷幕和排水孔在不同的工作状态下对渗流场的影响。对于帷幕的模拟, 在

建立有限元模型的过程中,在基础内专门分割出帷幕单元,并且与上部坝体各坝段相匹配,而排水孔的模拟则采用排水子结构技术<sup>[11-12]</sup>,排水子结构的定义,主要是由具体渗流问题的性质、排水孔的孔距、排距等因素决定,同时子结构内部单元以及子结构与邻域单元间都必须服从水头协调性原则。本文采用的排水子结构划分形式如图 2 所示。

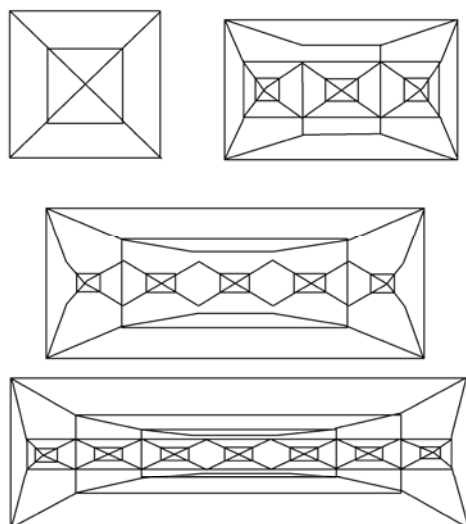


图 2 排水子的划分形式

Fig. 2 Mesh of drainage sub-structures

设排水子结构的有限元方程求解格式为  $[K_s]\{h_s\} = \{Q_s\}$ , 设排水子结构内部结点的未知水头及相应的右端项为  $x_1, b_1$ , 出口结点的未知水头及相应右端项为  $x_2, b_2$ , 将  $[K]$  及  $\{Q_s\}$  相应分块, 则有

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

$$x_1 = K_{11}^{-1}(b_1 - K_{12}x_2), \quad K'_{22}x_2 = b'_2, \quad (8)$$

式中,  $K'_{22} = K_{22} - K_{21}K_{11}^{-1}K_{12}$  和  $b'_2 = b_2 - K_{21}K_{11}^{-1}b_1$  分别为子结构凝聚后的排水子结构的出口传导矩阵和出口右端项。

本文将排水孔分为两类: 第一类是孔内无积水的排水孔, 模拟坝体内的排水孔以及位于两岸较高基岩中的排水孔, 此类排水孔底端为排水出口处, 其特点是整个排水孔壁面为可能逸出面, 自由面下、孔壁面上任何一点的水头都等于其位置高程; 第二类是孔内注满水的排水孔, 模拟坝基排水孔以及位于两岸基岩内位置最低的排水孔, 其工作特点是整个排水孔内部的积水都得从孔顶面溢出, 此时, 壁面上任何一点的水头都等于孔顶的位置高程。对于第一类排水孔, 只要不予堵塞, 边界条件为可能逸出面, 但由于事先不知道自由面的位置, 因而事先无法确定排水孔内渗流逸出线的位置, 需在迭代过程中逐步进行修正。

## 2.2 岩体渗透系数张量的确定

岩体中的裂隙以构造生成为主, 常成组分布, 从而使岩体渗流有明显的方向性, 当将岩体等效为多孔介质时, 其渗透性具有明显的各向异性特征, 描述岩体这种渗透特性的物理量为渗透系数张量, 因此, 有必要根据实测资料反演岩体的渗透系数张量, 并以此来分析工程区的渗流场。

根据岩层分布及水文地质勘探, 按风化程度将坝区岩体由表及里分为强风化区、弱风化区、微风化区及新鲜岩体区 4 个岩区。由于新鲜岩体的渗透各向异性比其它岩区岩体小得多, 因此, 将其视为各向同性体。根据压水试验, 新鲜岩体的单位吸水率为  $\omega = 0.001$ , 根据文献[13], 将其换算成渗透系数为  $K = 1.01 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 。另外, 将防渗帷幕及混凝土也视为各向同性体, 根据压水试验成果, 经换算可得防渗帷幕的渗透系数  $K = 1.60 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ , 将混凝土的渗透系数取为  $K = 1.00 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 。

由于强风化区、弱风化区、微风化区岩体的渗透系数张量未知, 因此, 需要结合实测资料进行反演。3 个岩区的渗透系数张量的独立参数为 18 个, 通过反演获得其参数一般比较困难, 为此, 取岩层法向和切向主渗透系数作为反演待求量, 此时反演的独立参数仅为 6 个, 大大降低了反演的难度。得到主渗透系数后, 通过张量转换公式便可求得 3 个岩区的渗透系数张量。

反演分析前首先进行有限元正演分析, 即拟定多组上述 3 个岩区的主渗透系数, 计算工程区的渗流场, 以获取地下水观测孔处的计算水位。为此, 对强风化区、弱风化区及微风化区岩体的主渗透系数拟定了 108 个组合情况, 经过计算得到了 108 组地下水观测孔处的计算水位。将 108 组计算孔水位和渗透系数张量分别作为人工神经网络<sup>[14-16]</sup>的输入向量和输出向量, 形成了 108 组模式对, 以此训练神经网络。

将训练好的神经网络以地下水观测孔处的实测水位作为输入向量, 经过神经网络的映射, 其输出向量就是反演的岩体主渗透系数, 经转换后得到渗透系数张量, 其结果见表 1。需要特别指出的是, 实测孔水位是由库水位、降雨等因素引起的综合结果, 而且它是在库水位变动情况下非稳定渗流的瞬时状态结果, 它对于库水位的变化具有一定的滞后效应, 为了消除这些影响因素, 在选取实测水位时, 选取的是库水位变化平稳、降雨量比较少、各地下水长期观测孔水位变化较平稳的时段内水位, 这样所得的反演结果更符合大坝的实际情况。另外, 在反演过程中, 为了保证神经网络的收敛性, 训练前将输入向量和输出向量分别进行了归一化处理, 并且在训练过程中不断改变神

经网络隐含层节点的个数。

表 1 岩体渗透系数张量

| 材料区  | 渗透系数张量/(m·s <sup>-1</sup> ) |                        |                       |                        |                        |                       |
|------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
|      | $K_{xx}$                    | $K_{xy}$               | $K_{yx}$              | $K_{yz}$               | $K_{zx}$               | $K_{zz}$              |
| 强风化带 | $7.86 \times 10^{-5}$       | $-2.14 \times 10^{-5}$ | $7.86 \times 10^{-5}$ | $-2.87 \times 10^{-5}$ | $-2.87 \times 10^{-5}$ | $6.14 \times 10^{-5}$ |
| 弱风化带 | $1.26 \times 10^{-6}$       | $-3.67 \times 10^{-8}$ | $1.26 \times 10^{-6}$ | $-4.93 \times 10^{-8}$ | $-4.93 \times 10^{-8}$ | $1.23 \times 10^{-6}$ |
| 微风化带 | $8.51 \times 10^{-7}$       | $-9.79 \times 10^{-8}$ | $8.51 \times 10^{-7}$ | $-1.31 \times 10^{-7}$ | $-1.31 \times 10^{-7}$ | $7.73 \times 10^{-7}$ |

3 扬压力异常成因综合分析

为了考察帷幕、排水、基岩地质条件等各种因素对 6 号坝段坝基扬压力的影响, 揭示扬压力的异常成因, 对李家峡大坝坝基进行三维有限元分析。

3.1 计算模型

根据李家峡水电站坝址区的岩层水文地质特性、地形地貌, 以及渗流场分析研究的要求, 计算分析模型包括的区域范围为左右岸共 800 m, 上下游长度为 520 m, 基础深度取至距坝基防渗帷幕底部 60 m。模型包括了可影响计算域渗流场的主要边界范围, 模拟了工程区岩体、拱坝坝体、防渗帷幕、排水孔幕等。计算中用空间六面体 8 结点等参元为主对计算域进行剖分, 不计排水子结构内部单元结点时网格共有 33665 个结点和 29639 个单元。图 3 为计算所用的单元网格图。

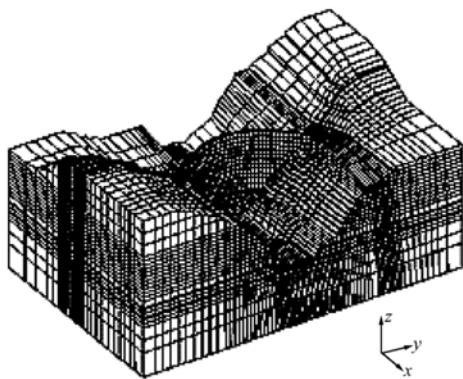


图 3 李家峡拱坝渗流场计算网格  
Fig. 3 Mesh of Lijiaxia Dam

3.2 计算工况

进行渗流有限元的目的是分析右岸 6 号坝段坝基扬压力异常的物理成因。因此, 计算工况组合也围绕 6 号坝段来拟定, 共拟定了 26 组计算工况, 限于篇幅, 表 2 仅列出了 11 组典型组合方式。所有工况中上游水位取正常蓄水位 2180.00 m, 下游水位取 2050.00 m, 上下游截取边界以不透水边界处理, 左右岸边界以已

知水头边界处理, 其值根据地下水长期观测孔实测资料进行外推确定。

表 2 渗流分析典型计算工况组合

| Table 2 Typical cases of seepage analysis |             |                    |                         |
|-------------------------------------------|-------------|--------------------|-------------------------|
| 工况                                        | 6 号坝段防渗帷幕布置 | 6 号坝段排水孔布置         | 备注                      |
| 1                                         | 防渗帷幕正常      | 排水孔正常              | 正常工况                    |
| 2                                         | 防渗帷幕正常      | 第一排排水孔正常, 第二排排水孔失效 |                         |
| 3                                         | 防渗帷幕正常      | 第一排排水孔失效, 第二排排水孔正常 |                         |
| 4                                         | 防渗帷幕正常      | 两排排水孔均失效           | 工程区坝体、坝基其余部位防渗帷幕、排水孔均正常 |
| 5                                         | 防渗帷幕失效      | 排水孔正常工作            |                         |
| 6                                         | 防渗帷幕失效      | 第一排排水孔正常, 第二排排水孔失效 |                         |
| 7                                         | 防渗帷幕失效      | 第一排排水孔失效, 第二排排水孔正常 |                         |
| 8                                         | 防渗帷幕失效      | 两排排水孔均失效           |                         |
| 9                                         | 防渗帷幕正常      | 排水孔正常              | 右岸地下水位抬高 15 m           |
| 10                                        | 帷幕局部存在缺陷    | 排水孔正常              | 帷幕前坝底浅部岩层存在强透水带         |
| 11                                        | 帷幕局部存在缺陷    | 排水孔正常              | 帷幕前深部岩层存在强透水带           |

3.3 计算结果分析

典型工况下右岸 6 号坝段径向剖面基岩渗流场分布图见图 4。各工况下 Y6-1 孔处的计算扬压力水位见表 3。

表 3 计算扬压力水位

| Table 3 Calculated uplift at the measuring point Y6-1 |             |                      |
|-------------------------------------------------------|-------------|----------------------|
| 工况                                                    | 扬压力水位计算值 /m | 与孔口高程 (2087 m) 的差值/m |
| 1                                                     | 2086.335    | -0.665               |
| 2                                                     | 2086.545    | -0.455               |
| 3                                                     | 2085.563    | -1.437               |
| 4                                                     | 2086.073    | -0.927               |
| 5                                                     | 2103.514    | 16.514               |
| 6                                                     | 2103.516    | 16.516               |
| 7                                                     | 2123.651    | 36.651               |
| 8                                                     | 2125.176    | 38.176               |
| 9                                                     | 2086.368    | -0.632               |
| 10                                                    | 2131.528    | 44.528               |
| 11                                                    | 2086.342    | -0.658               |

(1) 防渗帷幕正常工作时的渗流场分析

工况 1~4, 9 模拟坝基防渗帷幕正常工作时的渗流场, 在此情况下坝基布置防渗帷幕部位等水头线分

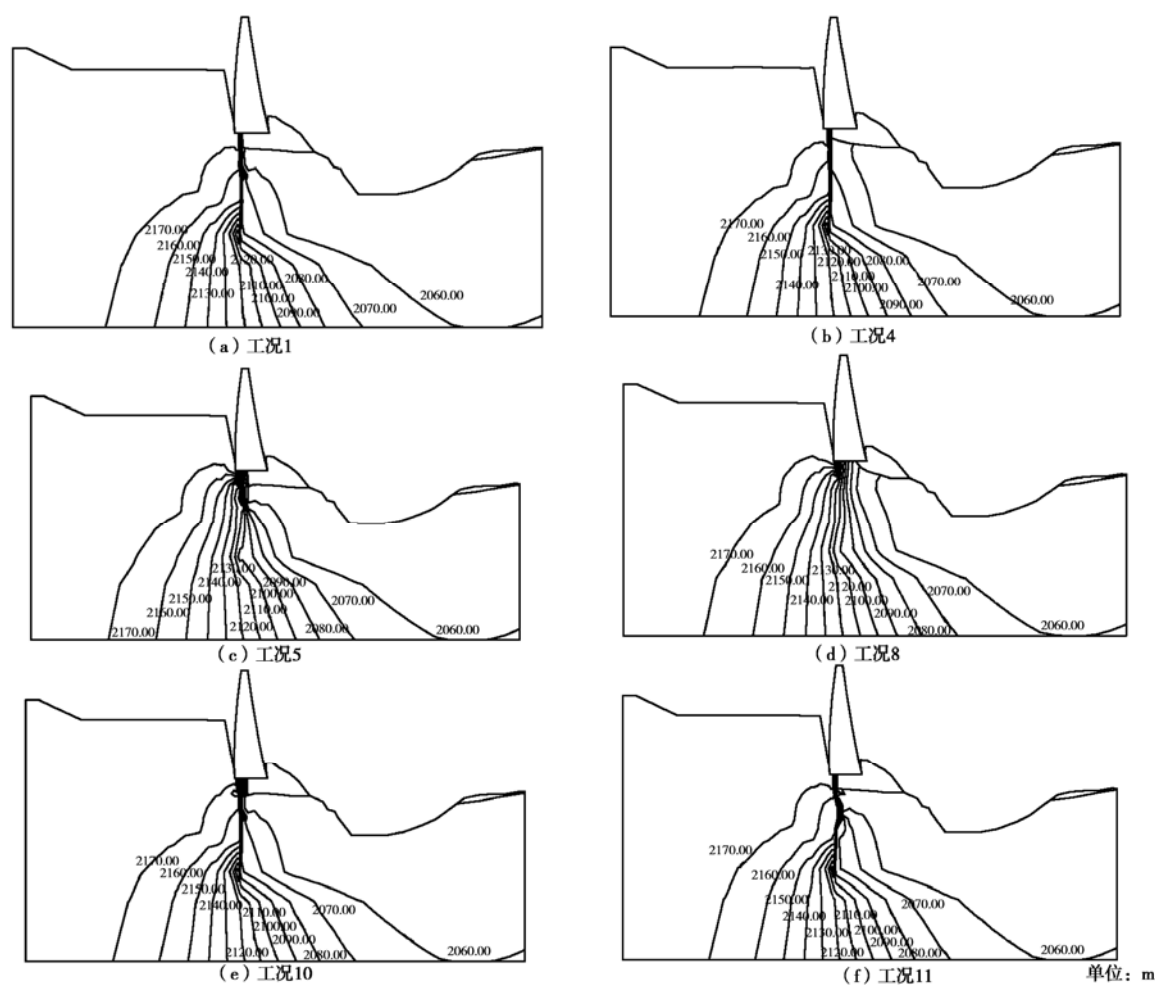


图 4 典型工况下 6 号坝段基岩扬压力分布图

Fig. 4 Distribution of seepage pressure across the dam foundation under the typical cases

布密集, 有效地降低了帷幕处坝基的水头值, 如图 4 (a)、(b)。只要防渗帷幕正常工作时, 无论是单排还是双排排水孔失效, 均不会引起坝基扬压力过大的升高, 此时, Y6-1 孔处计算扬压力水位在 2085.563~2088.073 m 之间, 基本与测压孔孔口平齐 (测压孔孔口高程为 2087 m), 与扬压力发生异常之前的实测水位 2088.08 m 接近。从工况 9 来看, 即使是右岸地下水位增高 15 m, 也不会引起扬压力过大的变化, 因此, 可排除地下水抬高引起 6 号坝段扬压力发生异常的可能性。

## (2) 防渗帷幕失效时的渗流场分析

工况 5~8 模拟 6 号坝段坝基防渗帷幕失效。从图 4 (c)、(d) 及表 3 中可以看出, 当 6 号坝段坝基防渗帷幕失效时, 坝基部位等水头线分布比防渗帷幕正常工作时稀疏, 坝轴线上游岩体中的水头也较帷幕正常工作时高, Y6-1 孔处计算扬压力水位较防渗帷幕正常工作时高出许多。但当 6 号坝段排水孔正常工作或仅第二排排水孔失效时, Y6-1 孔处计算扬压力水位在

2103.5 m 左右, 高出孔口高程约 16.5 m; 当 6 号坝段第一排排水孔失效或两排排水孔均失效时, Y6-1 孔处计算扬压力水位分别达到 2123 m 和 2125 m, 超过孔口高程 36~38 m。由此看来, 6 号坝段防渗帷幕对坝基扬压力影响较大。

## (3) 坝基局部存在强透水带时的渗流场分析

工况 10 是对帷幕前浅部 (建基面附近) 岩层存在强透水带、帷幕存在缺陷情况的模拟, 此时, 6 号坝段建基面附近等水头线较帷幕正常工作时稀疏, 如图 4 (e)。Y6-1 孔处计算扬压力水位为 2131.528 m, 超过孔口高程 44.528 m, 与当前实测值较为接近 (实测扬压力水位大部分时间内高出孔口高程 43 m 左右)。工况 11 模拟的是帷幕前深部岩层存在强透水带、帷幕存在缺陷, 从图 4 (f) 及表 3 可以看出, 该透水带主要影响其所经过部位的渗流场分布, 而对测孔处扬压力影响甚微。

(4) 右岸 6 号坝段坝基扬压力异常成因综合分析 综上所述可知, 当防渗帷幕完好时, 即使排水孔失

效, 扬压力不会大幅升高, 排除了排水孔失效引起扬压力异常的可能性, 通过检查, 排水孔均正常。根据工况 9, 也排除了右岸地下水位升高引起扬压力大幅升高的可能性, 而实测扬压力水位高出孔口高程 40 m 之多, 因此可认为 6 号坝段防渗帷幕存在缺陷, 而 6 号坝段帷幕大范围失效的可能性不大, 因此最有可能引起扬压力大幅升高的原因是防渗帷幕局部存在缺陷, 且帷幕前浅部岩层存在强透水带, 建基面附近产生渗漏, 导致扬压力大幅升高, 其物理成因可能是:

①基础爆破开挖后产生裂隙未撬挖干净, 或建基面岩体本身较为破碎且处理不彻底, 或帷幕前坝底混凝土与基岩脱开; ②帷幕被长期渗流溶蚀而被破坏, 或帷幕灌浆未灌好。事实上, 对 6 号坝段基岩钻孔试验表明, 建基面附近岩石为混合岩, 岩石较为破碎, 岩石中夹有白色、粉状充填物, 它们在长期渗流作用下易形成强透水带, 由水质分析表明, 扬压力孔所取水样接近库水, 因而建基面附近岩石存在裂隙可能性较大。另外, 由于地下水类型以  $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- - \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$  型和  $\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- (\text{SO}_4^{2-}) - \text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+$  型为主, 其中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  及侵蚀性  $\text{CO}_2$  含量较高, 对普通硅酸盐水泥具有较强的硫酸盐、碳酸盐及溶出型腐蚀性, 帷幕被长期渗流溶蚀破坏的可能性较大。在这些情况下, 导致沿建基面附近产生渗漏, 而扬压力孔紧靠帷幕布置, 对渗漏较为敏感, 致使测值大幅升高。

## 4 结论与建议

(1) 通过对李家峡拱坝坝基扬压力、工程区地下水长期观测水位等实测资料的综合分析, 建立了李家峡工程区较为贴近实际的水文地质模型, 反演计算了各个地层的渗透参数, 为坝基渗流场的分析奠定了基础。

(2) 通过对李家峡水电站工程区在各种典型工况下的渗流场计算分析, 结合 Y6-1 孔扬压力实测资料, 分析出导致右岸 6 号坝段 Y6-1 孔测值异常的可能原因, 认为最有可能引起 Y6-1 孔处扬压力大幅升高的原因在于帷幕前浅部岩层存在强透水带, 而此处防渗帷幕又存在缺陷, 渗漏通道未予完全切断。其成因在于建基面附近岩石较为破碎, 岩石中夹有白色、粉状充填物, 在长期渗流作用下易形成强透水带; 地下水侵蚀性较高, 对普通硅酸盐水泥具有较强的硫酸盐、碳酸盐及溶出型腐蚀性, 帷幕可能被长期渗流溶蚀破坏。

(3) 建议对右岸 6 号坝段坝基进行灌浆处理, 以阻断渗漏通道, 提高防渗帷幕的阻水效果, 并加强 6

号坝段渗水的抽排工作, 以有效地降低扬压力。

## 参考文献:

- [1] MALKAWI A I H, AL-SHERIADEH M. Evaluation and rehabilitation of dam seepage problems[J]. *Engineering Geology*, 2000, **56**(4): 335 - 345.
- [2] GHOBADI M H, KHANLARI G R, DJALALY H. Seepage problems in the right abutment of the Shahid Abbaspour Dam[J]. *Engineering Geology*, 2005, **82**(2): 119 - 126.
- [3] 宋汉周, 汤瑞凉. 某大坝局部扬压力异常的地质成因分析[J]. *水电自动化与大坝监测*, 1992, **16**(3): 25 - 30. (SONG Han-zhou, TANG Rui-liang. Analysis of local uplift pressure anomaly under a dam foundation[J]. *Hydropower Automation and Dam Monitoring*, 1992, **16**(3): 25 - 30. (in Chinese))
- [4] 刘凤林, 李中镇. 回龙山大坝扬压力超限问题及处理[J]. *东北电力技术*, 2004, **12**: 29 - 30. (LIU Feng-lin, LI Zhong-zhen. The problem and treatment of excess lifting pressure on Huilongshan Dam[J]. *Northeastern Electric Power Technology*, 2004, **12**: 29 - 30. (in Chinese))
- [5] 周志芳, 朱学愚. 新安江水电站三坝段扬压力异常机理分析[J]. *岩土工程学报*, 1998, **20**(4): 54 - 57. (ZHOU Zhi-fang, ZHU Xue-yu. Mechanism analysis of uplift abnormality for dam section 3 of Xi'anjiang Hydropower Station[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, **20**(4): 54 - 57. (in Chinese))
- [6] 牛仁杰, 蒋志全, 陈永福, 等. 黄河李家峡水电站技施设计—工程布置及建筑物[R]. 西安: 国家电力公司西北勘测设计研究院, 2000. (NIU Ren-jie, JIANG Zhi-quan, CHEN Yong-fu, et al. Design of Liji Xia Hydropower Station in the Huanghe River: layout of the project and structures[R]. Xi'an: Northwest Institute of Investigation and Design, 2000. (in Chinese))
- [7] 吕生弟, 罗志钢, 韩建设, 等. 黄河李家峡水电站技施设计—工程地质[R]. 西安: 国家电力公司西北勘测设计研究院, 2000. (LÜ Sheng-di, LUO Zhi-gang, HAN Jian-she, et al. Design of Liji Xia Hydropower Station in the Huanghe River: geology[R]. Xi'an: Northwest Insititute of Investigation and Design, 2000. (in Chinese))
- [8] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖貽, 等. 渗流数值计算与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1981. (MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao, LI Zu-yi, et al. Numerical calculation and analysis in seepage[M]. Nanjing: Hohai University Press,

1981. (in Chinese))
- [9] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (MAO Chang-xi. Seepage computation analysis and control[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))
- [10] HSIEH P A, NEUMAN S P. Field determination of the three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media[J]. Water Resources Research, 1985, **21**(8): 2167 - 2182.
- [11] 王 镭, 刘 中, 张有天. 有排水孔幕的渗流场分析[J]. 水利学报, 1992(4): 15 - 20. (WANG Lei, LIU Zhong, ZHANG You-tian. Analysis of seepage field near a drainage hole curtain[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992(4): 15 - 20. (in Chinese))
- [12] 朱岳明, 陈建余, 龚道勇, 等. 拱坝坝基渗流场的有限单元法精细求解[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(3): 326 - 330. (ZHU Yue-ming, CHEN Jian-yu, GONG Dao-yong, et al. Refined solution to seepage in arch dam foundation with FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(3): 326 - 330. (in Chinese))
- [13] 张祯武, 李兴成, 徐光祥. 利用定压力非稳定流压水试验求水文地质参数岩[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(15): 2543 - 2546. (ZHANG Zhen-wu, LI Xing-cheng, XU Guang-xiang. Determination of hydrogeological parameters by water pressure test of steady-pressure and non-stationary flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004, **23**(15): 2543 - 2546. (in Chinese))
- [14] HORNIK K, STINCHCOMBE M, WHITE H. Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feedforward networks[J]. Neural Networks, 1990, **3**: 551 - 560.
- [15] 杨行峻, 郑君里. 人工神经网络与盲信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (YANG Xing-jun, ZHENG Jun-li. Artificial neural network and blind signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese))
- [16] 闻 新, 周 露, 李 翔, 等. MATLAB 神经网络仿真与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (WEN Xin, ZHOU Lu, LI Xiang, et al. Simulation and application of MATLAB neural network[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》2009 年黄文熙讲座暨学报创刊 30 周年纪念学术报告会通知

《岩土工程学报》2009 年黄文熙讲座暨创刊 30 周年纪念学术报告会定于 2009 年 1 月 10~11 日在南京举行。

2009 年黄文熙讲座的主讲人为本刊编委会主任编委河海大学殷宗泽教授, 讲座题目为“土石坝的应力变形分析”, 讲座文稿将刊登在本刊 2009 年第 1 期, 为了更好地促进岩土工程学科的学术交流, 同时举行黄文熙讲座学术报告。

《岩土工程学报》自 1979 年创刊以来已历经 30 春秋, 在广大读者的支持和爱护下, 学报已经成为岩土工程领域具有较大影响的学术园地。在学报而立之年之际, 学报编委会研究决

定与 2009 年黄文熙讲座一并举办学术活动, 届时将邀请多名岩土工程前辈作学术报告。热烈邀请《岩土工程学报》的新老编委、广大的读者、作者和审稿人参加, 期待着《岩土工程学报》的老老朋友欢聚一堂, 共同回顾学报不平凡的历史, 展望学报美好的未来。

会议报到地点: 南京市广州路 223 号瑞迪大酒店, 会议的大致日程为 2009 年 1 月 9 日下午报到, 1 月 10 日、11 日举行学术报告会等活动。更及时具体的会议事项将届时公布在《岩土工程学报》网站 [www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com), 敬请关注。

(本刊编辑部)