

DOI: 10.11779/CJGE201605003

金川水电站地下厂房裂隙围岩渗控效应数值模拟与评价

孙超伟¹, 柴军瑞^{1, 2}, 许增光¹, 覃源¹

(1. 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 710048; 2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对金川水电站工程区复杂的地质条件和渗控措施, 分别建立基于排水孔等效模型的坝基整体模型和基于密集排水孔“弃孔算法”精细模拟的左岸厂区子模型, 采用 Signorini 型变分不等式和自适应罚函数相结合的稳定渗流分析方法对厂区围岩的长期渗控效应进行论证和敏感性分析。在数值模拟中, 为了克服传统分析所采用的均质各向同性渗透系数不能反映裂隙岩体渗透特性的不足, 首先根据两岸和坝基岩体优势裂隙组的空间展布情况, 基于统计学方法初步确定其渗透系数张量并获得主值及主方向, 再根据钻孔压水试验资料确定的等效渗透系数对其进行修正, 并通过坝址区的地下水位反分析对该方法进行了验证。结果表明, 运行期工况下防渗排水系统对山体地下水位具有控制作用, 主变洞和发电机层底板处于自由面之上, 厂房和调压室底板稍有承压性。帷幕的渗透特性、辅助排水孔幕以及排水孔间距对渗流场分布影响很小但能显著减小厂房洞室及排水廊道的渗漏量, 因此应保证防渗帷幕的施工质量并建议设置辅助排水孔幕, 建议中层廊道以下的排水孔间距设为 3 m, 中层廊道以上的排水孔间距放宽到 4.5 m。

关键词: 水利工程; 金川水电站; 地下厂房; 渗流分析; 裂隙岩体; 密集排水孔; 数值模拟

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)05-0786-12

作者简介: 孙超伟(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事水利和岩土工程渗流数值分析研究。E-mail: chao_wei_106@126.com。

Numerical simulation and assessment of seepage control effects on surrounding fractured rocks of underground powerhouse in Jinchuan Hydropower Station

SUN Chao-wei¹, CHAI Jun-rui^{1, 2}, XU Zeng-guang¹, QIN Yuan¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Northwest Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: A global model of equivalent modeling and a submodel of accurate modeling based on “abandoned hole algorithm” for densely deployed drainage holes are established respectively to simulate the complicated seepage control measures and geological conditions for the underground hydropower cavern area at the left bank of Jinchuan Hydropower Station. The long-term seepage control effects of the surrounding rocks of the underground powerhouse and the sensitivity analysis of seepage control measures for the project design are performed by using the stationary seepage analysis method and combining the variational inequality formulation of Signorini’s type with an adaptive penalty Heaviside function. The method of determining the hydraulic conductivity tensor is modified so that it can accurately overcome the disadvantage of ignoring the permeability characteristics of the fractured rock mass. The principal values and directions of the hydraulic conductivity tensor are first determined by the statistical method based on the measurements of the spatial spreading of fractures, and are then modified using the estimates of isotropic hydraulic conductivity that are calculated according to the water permeability rate from a field water-pressure test, and finally are verified using the inversion analysis. The results show that the integrated seepage-proof drainage system will control the water flow from the reservoir and mountain area efficiently; the cavern walls of generator floor and transformer room will be above the ground water surface under the operating conditions; the floor of the machine hall and the surge chamber are both under pressure slightly. The seepage distribution is not sensitive to the permeability of grouting curtains, auxiliary drainage hole arrays and spacing of drainage holes, which however can reduce the flux from drainage holes obviously. It is suggested that the quality for grouting curtain should be guaranteed and the auxiliary drainage hole arrays should be arranged. A spacing of 3 m can be taken for the drainage holes below the middle drainage tunnels and a larger spacing (e.g., 4.5 m) is

基金项目: 陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-15); 国家自然科学基金项目(51409206, 51409208)

收稿日期: 2015-04-21

suggested for those holes above the middle drainage tunnels.

Key words: hydraulic project; Jinchuan Hydropower Station; underground powerhouse; seepage analysis; fractured rock; densely-distributed drainage hole; numerical simulation

0 引言

中国在建和拟建的大型水电工程普遍位于河谷深切, 坝址区地形、地貌及地质条件复杂的西南地区, 渗漏问题往往是工程枢纽区常见的工程地质问题之一, 尤其对于坝址区岩体裂隙较为发育的岩溶地区, 坝基以及地下厂房围岩区的渗漏问题更为凸显^[1-3]。金川水电站地处四川省阿坝藏族羌族自治州金川县境内, 坝址段河谷狭窄并呈V形, 两岸岸坡陡峻, 左右岸均有较多的冲沟切割, 河床漫滩及宽阶地发育, 地形完整性和岸坡稳定性差。坝区河床下部覆盖层分布广泛且较深厚, 两岸基岩裸露, 岩体为三叠系上统杂谷脑组上段(T_{3z}^2)岩组薄—厚层状变质细砂岩夹碳质千枚岩。地质条件较为复杂, 坝基及厂房区地下围岩强、弱卸荷岩体节理裂隙发育且存在倾倒拉裂变形现象, 岩体卸荷强烈, 透水性较强, 地质条件较为复杂, 渗漏及渗透稳定性问题较为突出。

为减小左岸地下厂房厂区渗漏并改善厂房围岩的渗透稳定性, 需要对厂房区围岩的渗流场分布特征及渗控措施效果进行全面分析研究。本文采用裂隙样本统计法和野外压水试验法相结合, 首先根据两岸和坝基岩体的优势节理裂隙组参数空间展布情况, 基于统计学方法初步确定两岸和坝基裂隙岩体的渗透系数张量, 获得其主值和主方向, 再根据现场单孔压水试验资料对渗透系数张量进行修正。在此基础上, 针对金川水电站工程区复杂的地质条件和渗控措施, 分别建立基于排水孔等效模拟的坝区整体模型和基于密集排水孔“弃孔算法”^[4]精细模拟的厂房模型, 并采用Signorini型变分不等式和自适应罚函数相结合的方法^[5]求解渗流自由面和溢出点, 开展了金川水电站地下厂房裂隙围岩渗控效应分析, 并论证了渗流控制方案的合理性, 为渗控措施的优化设计提出了建议。

1 裂隙岩体渗透系数张量的计算方法

实际工程中由于裂隙岩体往往赋存于地表以下很深的位置, 而且裂隙在岩体中通常是大量随机分布的、相互切割、复杂交错, 因此造成岩体渗透特性呈现不均匀性及各向异性且难以确定。岩体渗透特性的各向异性一般采用渗透张量来表征, 渗透张量的确定是裂隙岩体进行渗流场正确模拟的关键。目前确定裂隙岩体的渗透系数张量主要有3种方法: 统计学法^[6]、野外压水试验法以及数学模型反演法^[7]。数学模型反演法是基于地下水动态信息建立数学模型, 通过反演方法

推求渗透系数。该方法的准确性取决于动态数据的可靠性及模型选择的合理性。当所研究区域缺乏足够的地下水位观测资料时, 其结果的准确性很难保证。统计学法根据岩体裂隙的几何参数(产状、隙宽、隙间距等)测量值, 采用统计学理论推求岩体的渗透系数张量。该方法简单实用, 理论较完备, 但由于裂隙几何参数, 如隙宽、隙间距的测量不准带来的计算误差很大。野外压水试验法基于数值解析法, 根据野外压水试验资料, 如单孔压水试验、三段压水试验^[8]、交叉孔试验^[9]等, 通过公式换算出渗透系数。该方法能直观反映现场裂隙的渗透特性, 但无法反映由于随机裂隙而引起的渗透各向异性。本文采用裂隙样本统计法和野外压水试验法相结合, 通过裂隙在空间的展布状况(产状、隙宽、隙间距)测量, 统计出坝基及两岸岩体的优势节理裂隙组参数分布, 运用等效连续介质渗流理论推求出岩体的渗透系数张量, 获得渗透系数张量的主值和主方向; 再根据坝址区压水试验资料对渗透系数张量进行修正, 使其既能反映裂隙岩体的渗透特性又相对准确。

1.1 统计学方法初步确定渗透系数张量

岩体裂隙的渗透特性取决于裂隙的性质和分布, 因而通过测量裂隙在空间的展布状况(走向、倾向、倾角、裂隙开度和间距), 运用统计学方法初步确定岩体的渗透系数张量^[6]。假定在统计上为规则和均质的单纯裂隙岩体中, 展布有n组不同方向的导水裂隙网络, 依据等效连续介质渗流理论及渗透系数张量理论, 将每组渗透结构面的渗透系数张量叠加, 则其渗透系数张量 \mathbf{K} 的表达式为^[10-11]

$$\mathbf{K} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho g b_i^3}{12 \mu S_i} \begin{bmatrix} K_{xxi} & K_{xyi} & K_{xzi} \\ K_{yxi} & K_{yyi} & K_{yzi} \\ K_{zxi} & K_{zyi} & K_{zzi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $K_{xxi} = 1 - \sin^2 \beta_i \sin^2 \gamma_i$; $K_{yyi} = 1 - \cos^2 \beta_i \sin^2 \gamma_i$; $K_{zzi} = 1 - \cos^2 \gamma_i$; $K_{xyi} = K_{yxi} = -\sin \beta_i \cos \beta_i \sin^2 \gamma_i$; $K_{xzi} = -\sin \beta_i \sin \gamma_i \cos \gamma_i$; $K_{yzi} = K_{zyi} = -\cos \beta_i \sin \gamma_i \cos \gamma_i$; \mathbf{K} 为岩体的渗透系数张量; 空间直角坐标系的定义符合“右一前一上”右手正交坐标系准则, x 轴表示正东方向(E), y 轴表示正北方向(N), z 轴表示正上; b_i , S_i 分别为第 i 组裂隙的开度和裂隙间距; β_i , γ_i 分别为第 i 组裂隙的倾向和倾角; ρ , μ 分别为水的密度和动力黏滞系数; g 为重力加速度。

求解渗透系数张量 \mathbf{K} 的特征值和特征向量, 即可得到岩体裂隙系统的渗透系数张量的3个主值(K_1 ,

K_2, K_3 及主渗透方向。渗透系数张量 \mathbf{K} 的 3 个特征根可表示为

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= I_1/3 + 2\sqrt{-A/3} \cos(\theta/3), \\ K_2 &= I_1/3 - 2\sqrt{-A/3} \cos(\theta/3 + 60^\circ), \\ K_3 &= I_1/3 - 2\sqrt{-A/3} \cos(\theta/3 - 60^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $A = I_2 - I_1^2/3$; $I_1 = K_{xxi} + K_{yyi} + K_{zzi}$; $I_2 = K_{xxi}K_{yyi} + K_{yyi}K_{zzi} + K_{xxi}K_{zzi} - K_{xyi}^2 - K_{yzi}^2 - K_{xzi}^2$ 。

渗透张量 \mathbf{K} 主轴的倾向 α_i 、主轴倾角 β_i 可表示为

$$\alpha_i = \begin{cases} 270^\circ - \arcsin(U_{iy}/\sqrt{U_{ix}^2 + U_{iy}^2}) (U_{ix} > 0) \\ 90^\circ + \arcsin(U_{ix}/\sqrt{U_{ix}^2 + U_{iy}^2}) (U_{ix} < 0) \end{cases} \quad (i=1,2,3), \quad (3)$$

$$\beta_i = \arcsin U_{iz} \quad (i=1,2,3), \quad (4)$$

式中, U_{ix} , U_{iy} 和 U_{iz} 为第 i 组裂隙渗透系数张量单位向量的分量, 即渗透主方向法向矢量的方向余弦。

1.2 渗透张量的修正

根据工程中常用的单孔压水试验对裂隙岩体的渗透张量进行修正。运用压水试验资料可以求出均质各向同性的渗透系数, 岩体透水率 q 与单位吸水量 ω 之间的关系: $\omega = 0.01q$ 。当 $q < 10$ Lu, 可根据巴布什金公式近似计算岩体的渗透系数^[12]:

$$K = 0.525\omega \lg \frac{aL}{r_0} \quad (5)$$

式中 K 为岩体的渗透系数; ω 为单位吸水量; L 为试验段长度; a 为与试验段位置有关的参数, 当试验段底与下部隔水层的距离大于 L 时取 0.66, 反之取 1.32; r_0 为钻孔半径。

根据 Park 等^[13]的研究结论, 式 (5) 求得的渗透系数的算术平均值比实际岩体的渗透性要高, 所以采用其几何平均值作为岩体的等效渗透系数^[14-15]:

$$K_\omega = \sqrt[n]{K_1 K_2 \cdots K_n} \quad (6)$$

式中, K_ω 为等效渗透系数, K_i ($i=1,2,\dots,n$) 为各个试验段的计算结果。

利用式 (7) 对由统计学方法求得的 3 个渗透主值 K_1 , K_2 和 K_3 进行修正:

$$\left. \begin{aligned} K'_1 &= \frac{K_\omega}{\sqrt[3]{K_1 K_2 K_3}} K_1, \\ K'_2 &= \frac{K_\omega}{\sqrt[3]{K_1 K_2 K_3}} K_2, \\ K'_3 &= \frac{K_\omega}{\sqrt[3]{K_1 K_2 K_3}} K_3. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, K'_1 , K'_2 和 K'_3 分别为修正后的 3 个渗透系数主值。其中, 为了便于对渗透系数张量进行修正, 定义

修正系数为 $m = \frac{K_\omega}{\sqrt[3]{K_1 K_2 K_3}}$, K_1 , K_2 和 K_3 为修正前的渗透系数主值。

2 三维复杂渗流场求解关键方法

2.1 渗流自由面和溢出点的求解

一个典型的土坝非承压饱和渗流问题如图 1 所示, 全域 Ω 上的渗流实际上仅在自由面 Γ_f 以下的湿区 Ω_w 中运动。变分不等式方法通过引入 Heaviside 阶跃函数 $H(\varphi - z)$ 作为相对渗透系数 k_r , 对饱和渗透系数 k_s 按照式 (8) 和式 (9) 进行调整:

$$k = k_r k_s = H(\varphi - z) k_s, \quad (8)$$

$$H(\varphi - z) = \begin{cases} \varepsilon_0 & \varphi \geq z (\Omega_w \text{ 内}) \\ 1 & \varphi < z (\Omega_d \text{ 内}) \end{cases}. \quad (9)$$

式中 φ 为总水头; $\varphi = z + p/\gamma_w$, z 为位置水头, p 为孔隙水压力, γ_w 为水的重度; ε_0 为一任意小量, 理论上 $\varepsilon_0 = 0$, 实际考虑到数值计算的稳定性, ε_0 取为 0.001。

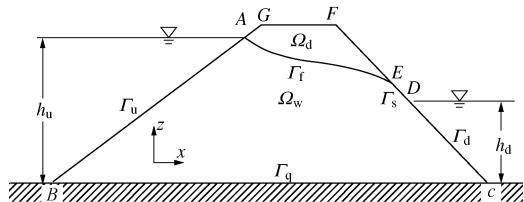


图 1 土坝渗流问题示意图

Fig. 1 Sketch of seepage flow in earth dam

将 Darcy 定律的求解域由湿区 Ω_w 扩大到全域 Ω , 饱和区渗透系数取 k_s , 非饱和区取为 0。重新定义的 Darcy 定律形式如下:

$$\mathbf{v} = -k_s \nabla \varphi + \mathbf{v}_0. \quad (10)$$

式中 ∇ 为梯度算子; \mathbf{v} 为渗流速度; \mathbf{v}_0 为初流速, \mathbf{v}_0 的引入是为了消除干区 Ω_d 上的虚假渗流场, 其表达式为

$$\mathbf{v}_0 = \mathbf{k} \nabla \varphi = H(\varphi - z) k_s \nabla \varphi. \quad (11)$$

对不可压缩的稳态饱和渗流问题, 在全域 Ω 内的各向异性稳定渗流应满足如下连续方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (\Omega \text{ 内}). \quad (12)$$

式 (12) 应满足下列边界条件:

(1) 水头边界条件

$$\varphi = \bar{\varphi} (\Gamma_\varphi = AB + CD \text{ 上}), \quad (13)$$

式中, $\bar{\varphi}$ 为水头边界 Γ_φ 上的已知水头。

(2) 流量边界条件

$$q_n \equiv -\mathbf{n}^\top \mathbf{v} = \bar{q} (\Gamma_q = BC \text{ 上}), \quad (14)$$

式中, \bar{q} 为流量边界 Γ_q 上的已知流量, 对隔水边界, $\bar{q} = 0$, \mathbf{n} 为边界上的单位外法线向量。

(3) 溢出面Signorini型互补边界条件

$$\left. \begin{array}{l} \varphi \leq z, q_n(\varphi) \leq 0 \\ (\varphi - z) q_n(\varphi) = 0 \end{array} \right\} \quad (\Gamma_s = DEFGA \text{上})。 \quad (15)$$

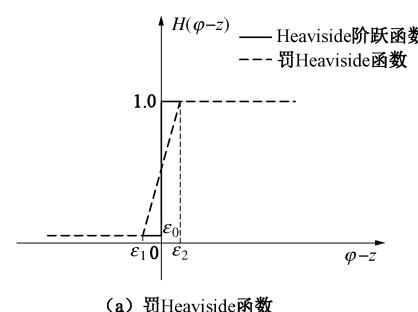
式中 Γ_s 为渗流溢出面边界; 显然, 在 DE 上, $\varphi = z$ 且 $q_n \leq 0$; 在 $EFGA$ 上, $\varphi < z$ 且 $q_n = 0$; 而在溢出点 E 上, 则有 $\varphi = z$ 且 $q_n = 0$ 。

(4) 自由面边界条件

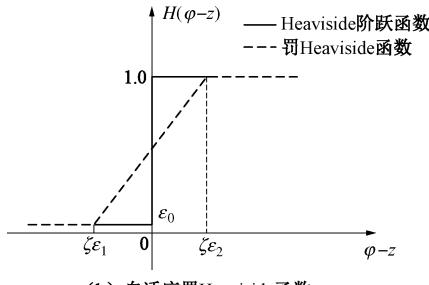
$$q_n|_{\Omega_w} = q_n|_{\Omega_d} = 0 \quad (\Gamma_f = AE \text{上}) \quad , \quad (16)$$

式中, $\Gamma_f \equiv \{(x, y, z) | \varphi = z\}$ 为自由面边界, 即湿区 Ω_w 和干区 Ω_d 的分界。上述问题的求解算法及验证参阅文献[5], 限于篇幅此处不再详述。下面主要介绍对Heaviside阶跃函数的处理及其罚参数的三维推广。

式(8)中由于Heaviside阶跃函数 $H(\varphi - z)$ 的存在, 导致自由面迭代过程中有限元求解可能出现振荡, 产生收敛问题和网格依赖性问题。为改善数值收敛性和网格依赖问题, 王媛^[16]通过引入单元罚参数 ε_1 和 ε_2 对阶跃Heaviside函数进行线性微调, 将式(8)和式(9)表示的类似刚塑性问题概化为理想弹塑性问题, 如图2(a)所示, 从而得到连续的罚Heaviside函数(式(17a)、(17b))。陈益峰等^[17]认为, 当排水系统引起自由面剧烈降落时, 罚Heaviside函数的定义过于严格, 在自由面迭代过程中仅在自由面附近极少数的节点获得罚权重, 使溢出点在自由面相邻迭代步中来回跳跃, 造成渗流自由面难以准确定位。为了解决上述问题, 在罚Heaviside函数的基础上提出自适应罚Heaviside函数(式(18a)、(18b)), 根据收敛条件逐步放宽罚参数值来实现准确定位渗流自由面, 如图2(b)所示。



(a) 罚Heaviside函数



(b) 自适应罚Heaviside函数

图2 两类罚Heaviside函数

Fig. 2 Two types of penalized Heaviside functions

$$H(\varphi - z) = \begin{cases} 1 & (\varphi - z \geq \varepsilon_2) \\ \frac{\varphi - z - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} & (\varepsilon_1 < \varphi - z < \varepsilon_2) \\ \varepsilon_0 & (\varphi - z \leq \varepsilon_1) \end{cases} \quad (17a)$$

$$H_\zeta(\varphi - z) = \begin{cases} 1 & (\varphi - z \geq \zeta \varepsilon_2) \\ \frac{\varphi - z - \zeta \varepsilon_1}{\zeta(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} & (\zeta \varepsilon_1 < \varphi - z < \zeta \varepsilon_2) \\ \varepsilon_0 & (\varphi - z \leq \zeta \varepsilon_1) \end{cases} \quad (17b)$$

式中, ζ 是为放大 ε_1 和 ε_2 两个罚参数而引入的计算参数, ζ 一般取为 1~10。计算初始 $\zeta = 1$; 计算过程中根据问题的收敛条件和单元网格尺寸, 以 0.5~1.0 的增量逐步增大 ζ 值。一般情况下, 问题的非线性越强、单元网格越粗、收敛标准越严, 则 ζ 的取值就需要越大才能保证自由面迭代收敛。 ε_1 , ε_2 为一微小负值和正值。根据文献[18], 对于平面问题和矩形网格, ε_1 取为矩形单元中最低积分点与最低节点压力水头差的最大值。此处类比 ε_1 , 将 ε_2 取为最高积分点与最高节点的压力水头差的最大值。如果单元积分点的压力水头小于 $-\zeta \varepsilon_1$, 则该积分点对节点流量的贡献最小。如果单元某积分点压力水头大于 $\zeta \varepsilon_2$, 则该积分点对节点流量贡献最大。如压力水头处于两者之间, 则按照式(17b)进行线性插值。将照上述方法, 类推至三维及其他单元类型情况, 如图3所示。对于三维情况单元, ε_1 , ε_2 的计算式为

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= -\max(f(\alpha)) = -\max(l \cos \alpha \sin \alpha + h \cos^2 \alpha) \\ &= -0.5h(\sqrt{1 + l/h} + 1) \end{aligned} \quad , \quad (18a)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= \max(g(\alpha)) = \max(l \cos \alpha \sin \alpha + h \cos^2 \alpha) \\ &= 0.5h(\sqrt{1 + l/h} + 1) \end{aligned} \quad , \quad (18b)$$

式中 h 为水头差; g 为重力加速度; l 为单元长度, 二维情况下 l 为除重力方向外另一个方向的距离; 三维情况下 l 为除重力方向外另两方向距离的矢量和。

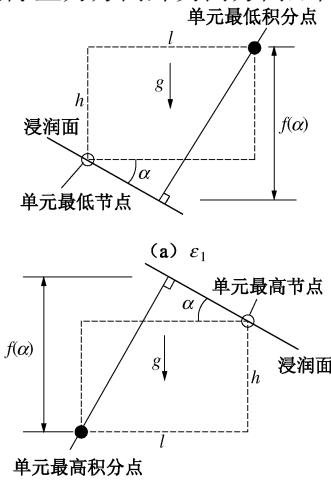


图3 罚参数 ε_1 和 ε_2 的取值

Fig. 3 Values of penalized parameters ε_1 and ε_2

2.2 密集排水孔的精细模拟法

在地下厂房周围的洞室群的坝基廊道底部或顶部, 通常布置有孔径小, 间距密集且数量众多的排水孔, 其在纵向形成的排水孔幕分布甚至达百米, 在进行有限元剖分时, 网格的生成和计算量间的协调难度较大, 因此需要严密的理论和算法对密集排水孔进行模拟。对此, 学者们提出了排水孔模拟的各种方法, 主要包括杂交元法^[19]、“以沟代井列”法^[20]、半解析法^[21]、“以管代孔”法^[22]、“以缝代井列”法^[23]、渗透特性等效模拟方法^[24-25]、空气单元法^[26]、复合单元法^[27]和排水子结构法^[28-29]等。但除了排水子结构法之外, 上述方法均或多或少对排水孔的边界条件进行了简化, 从而影响了解的严密性。但在处理大规模密集排水孔问题时, 子结构法显得极为繁琐, 反而降低了求解效率。文献[4]在子结构法基础上改进了排水孔的剖分模式, 提出了“弃孔算法”实现了排水孔的直接精细模拟。将排水孔根据其功用分为底排型和顶排型两类。底排型排水孔在结点虚流量法计算中, 作为二类边界(可能逸出边界)来处理, 然后逐步判别各结点是在实区或虚区。对于顶排型排水孔, 在每个孔顶口虚构一个数学开关器, 根据“等效节点流量法”, 其数学表述如下^[30]:

$$Q(x_i) = - \sum_e^{NPE} \sum_{i=l}^{k_j^e} k_j^e (h_i^e)^e \quad , \quad (19)$$

式中各符号意义、排水孔的具体求解详见文献[31]。

3 计算模型

3.1 工程概况

金川水电站位于四川省阿坝藏族羌族自治州金川县境内, 是大渡河干流规划 22 级方案的第 6 个梯级电站, 上游与双江口水电站相衔接、下游经金川县城接巴底水电站。正常蓄水位 2253.0 m, 库容 4.8775 亿 m³, 为日调节水库。枢纽建筑物主要由混凝土面板堆石坝、右岸泄洪洞及溢洪道和左岸地下引水发电系统等组成。混凝土面板堆石坝建造在深厚覆盖层上, 最大坝高为 112 m, 河床覆盖层最大厚度 65 m; 引水发电系统由引水洞、地下厂房、尾水洞等地下洞室群组成, 电站总装机容量 860 MW。

地下厂房位于左岸山体中, 主要由主副厂房、主变洞、尾水调压室等 3 大洞室组成, 其设计开挖尺寸(长×宽×高)分别为 226.80 m×28.80 m×68.50 m, 186.50 m×18.80 m×24.80 m, 178.00 m×25.50 m×78.00 m。地下厂房防渗排水工程由防渗帷幕、排水孔幕和排水廊道等组成。为利于联合防渗, 节约工程量, 在距厂房边墙 50 m 处设置厂前帷幕, 平行布置于厂房上游并延伸至尾水调压室下游侧, 与大坝坝主帷幕相连构成统一的防渗体系。排水廊道分 3 层布置,

上层排水廊道位于厂房顶部围岩中, 其底板高程为 2508.5~2514.0 m; 中、下 2 层排水廊道位于厂房四侧围岩中, 底板高程分别为 2474.5~2480.0 m 和 2444.5~2450.0 m。排水孔幕沿排水廊道轴线方向布置, 各层排水廊道通过垂直排水孔幕连接, 形成排水系统。在厂房顶部与上层排水廊道相连的围岩中布设有斜向孔, 依次分布在竖向孔两侧 45° 方向上。排水孔间距为 3 m, 竖向孔和斜向孔按 1.5 m 错距间隔布置, 地下厂房防渗排水系统示意如图 4 所示。

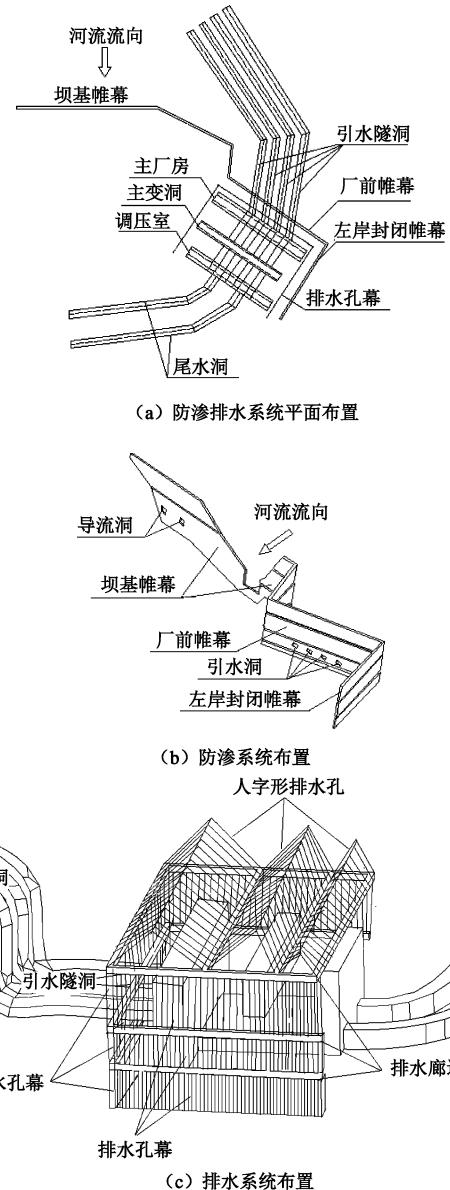


图 4 金川水电站厂房区防渗排水系统布置示意图

Fig. 4 Sketch of seepage-proof drainage system deployment of underground powerhouse of Jinchuan Hydropower Station

3.2 裂隙围岩渗透张量的计算

根据坝址区两岸和坝基过河平硐资料, 坝基共统计到 1585 条节理, 两岸坝肩共统计到 8559 条节理。经节理裂隙统计分析, 坝址区两岸、坝基岩体的优势节理裂隙可归为 8 组, 其中坝基 2 组, 左、右岸坝肩

各3组, 其分布及参数见表1。将表1中的数据代入式(1)~(4), 经裂隙统计换算可初步确定两岸、坝基岩体渗透系数张量, 再通过式(5)~(7)即可求得其主值和主轴方位。计算结果如表2所示。

以钻孔ZK101、ZK186和ZK125为例说明渗透系数张量求解过程, 先采用式(6)计算各试段渗透系数, 取其几何平均值作为等效渗透系数, 见表3; 其中钻孔ZK101(左岸)等效渗透系数为 7.29×10^{-5} cm/s, 修正系数为0.066; 钻孔ZK186(右岸)等效渗透系

数为 1.71×10^{-5} cm/s, 修正系数为0.029; 钻孔ZK125(坝基)等效渗透系数为 9.84×10^{-5} cm/s, 修正系数为0.012。修正后的渗透系数张量见表4。综合考虑研究区内各种因素, 用上述方法计算其他部位渗透张量, 将坝址区渗透张量相差不大的若干分区合并为一个分区, 渗透系数张量的主值见表5。

3.3 有限元模型

为了满足计算分析的需要, 建立了包括大坝、厂房区在内的三维整体有限元模型和厂房区有限元子模

表1 坝址区优势节理裂隙组分布参数

Table 1 Distribution parameters for dominant joints or fracture sets at dam site

分区	裂隙组号	倾向/(°)	倾角/(°)	张开度/mm	间距/m
左岸	1	205	82	6.34	8.6
	2	114	54	1.24	1.4
	3	198	66	10.10	7.2
右岸	1	352	79	5.32	8.7
	2	157	62	1.56	2.2
	3	218	76	8.18	6.5
坝基	4	152	40	4.30	8.8
	5	183	66	4.00	22.0

表2 统计学方法初步确定的渗透系数张量

Table 2 Hydraulic conductivity tensors preliminarily determined using statistical method

分区	渗透系数张量/(cm·s ⁻¹)		渗透系数主值/(cm·s ⁻¹)	主轴方位/(°)		综合渗透系数/(cm·s ⁻¹)
	指向	倾角		指向	倾角	
左岸	9.80×10^{-4}	-4.97×10^{-4}	1.74×10^{-4}	5.08×10^{-4}	121.35	62.92
	-4.97×10^{-4}	4.93×10^{-4}	1.70×10^{-4}	4.27×10^{-4}	203.14	4.18
	1.74×10^{-4}	1.70×10^{-4}	1.32×10^{-3}	6.09×10^{-3}	291.04	26.70
右岸	2.84×10^{-4}	-0.47×10^{-4}	0.70×10^{-4}	3.77×10^{-4}	131.49	79.71
	-0.47×10^{-4}	3.01×10^{-4}	0.18×10^{-4}	2.74×10^{-4}	130.92	58.02
	0.70×10^{-4}	0.18×10^{-4}	2.69×10^{-3}	2.03×10^{-3}	142.89	45.67
坝基	1.10×10^{-2}	2.80×10^{-4}	1.24×10^{-3}	6.65×10^{-3}	96.94	59.28
	2.8×10^{-4}	3.58×10^{-3}	3.56×10^{-3}	6.45×10^{-2}	26.79	11.41
	1.24×10^{-3}	3.56×10^{-3}	9.00×10^{-3}	1.39×10^{-3}	302.98	28.10

表3 钻孔压水试验成果及计算的修正系数

Table 3 Test results of water pressure and calculated modified coefficients

试段 编号	钻孔ZK101(左岸)		试段 编号	钻孔ZK186(右岸)		试段 编号	钻孔ZK125(坝基)	
	透水率 q/Lu	渗透系数 $/(cm \cdot s^{-1})$		透水率 q/Lu	渗透系数 $/(cm \cdot s^{-1})$		透水率 q/Lu	渗透系数 $/(cm \cdot s^{-1})$
1	5.62	7.33×10^{-5}	1	3.74	4.92×10^{-5}	1	12.0	1.22×10^{-4}
2	7.04	9.19×10^{-5}	2	1.22	1.59×10^{-5}	2	8.95	1.15×10^{-4}
3	8.18	1.15×10^{-4}	3	1.56	2.04×10^{-5}	3	7.32	9.51×10^{-5}
4	1.73	9.32×10^{-5}	4	1.13	1.47×10^{-5}	4	1.25	4.22×10^{-5}
5	2.98	3.89×10^{-5}	5	0.59	0.77×10^{-5}	5	8.92	1.22×10^{-4}
6	4.10	5.35×10^{-5}	6	1.06	1.38×10^{-5}	6	9.85	1.32×10^{-4}

表4 修正的渗透系数张量及其主值

Table 4 Modified hydraulic conductivity tensors and their principal values

分区	渗透系数张量/(cm·s ⁻¹)		渗透系数主值/(cm·s ⁻¹)	
钻孔ZK101 (左岸)	6.47×10^{-5}	-3.28×10^{-5}	1.15×10^{-5}	3.35×10^{-5}
	-3.28×10^{-5}	3.25×10^{-5}	1.12×10^{-5}	2.82×10^{-5}
	1.15×10^{-5}	1.12×10^{-5}	8.71×10^{-5}	4.02×10^{-4}
钻孔ZK186 (右岸)	8.24×10^{-6}	-1.36×10^{-6}	2.03×10^{-6}	1.09×10^{-5}
	-1.36×10^{-6}	8.73×10^{-6}	5.22×10^{-7}	7.95×10^{-6}
	0.70×10^{-4}	5.22×10^{-7}	7.80×10^{-5}	5.89×10^{-5}
钻孔ZK125 (坝基)	1.32×10^{-4}	3.36×10^{-6}	1.49×10^{-5}	7.98×10^{-5}
	3.36×10^{-6}	4.30×10^{-5}	4.27×10^{-5}	7.74×10^{-4}
	1.49×10^{-5}	4.27×10^{-5}	1.08×10^{-4}	1.67×10^{-5}

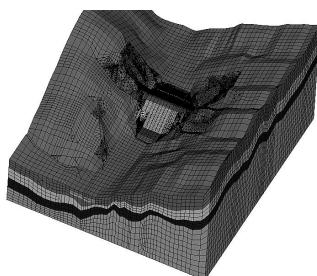
表 5 坝址垂向分区渗透系数张量的主值

Table 5 Principal values of hydraulic conductivity tensors for vertical layers at dam site

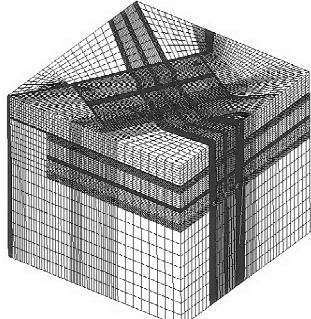
分区描述	透水率分段/Lu	渗透系数张量主值/(cm·s ⁻¹)		
中等透水带	$10 \leq q < 100$	3.54×10^{-4}	2.34×10^{-4}	1.43×10^{-4}
弱透水带1	$5 \leq q < 10$	1.26×10^{-4}	8.29×10^{-5}	5.08×10^{-5}
弱透水带2	$3 \leq q < 5$	7.39×10^{-5}	4.86×10^{-5}	2.98×10^{-5}
弱透水带3	$1 \leq q < 3$	3.26×10^{-5}	2.15×10^{-5}	1.31×10^{-5}
微—极微透水带	$q < 1$	7.77×10^{-6}	5.12×10^{-6}	3.13×10^{-6}

型, 模型的建立充分利用金川水利枢纽工程地形地质图、面板堆石坝设计资料、左岸地下厂房设计资料以及防排系统等基本资料, 较为严格地对面板堆石坝坝体各材料分区、坝基防渗体系、右岸泄洪洞、左岸厂房防排系统、控制断层及各主要地层渗透单元和河床覆盖层等进行了较为全面的模拟。本文计算采用的有限元模型是基于变分不等式求解渗流自由面和溢出点的算法和密集排水孔精细模拟的“弃孔算法”, 利用ADINA参数化设计语言编制了求解含复杂渗控结构的渗流问题的有限元程序, 并通过ADINA强大的前后处理模块进行有限元离散和结果后处理。

整体有限元模型如图5(a)所示, 共剖分283158个单元, 122003个节点, 模型大部份为六面体单元, 局部采用四面体过渡。模型的计算范围为: 垂直坝轴线方向(顺河向)自坝轴线往上游取6倍坝高左右, 往下游取7倍坝高, 总长1270 m; 平行于坝轴线方向(横河向)自河床中心分别至左、右两岸取6倍和5倍坝高, 总长1160 m; 沿高程方向(Z向)取为自坝基开挖面以下约为3倍坝高, 底部计算边界的海拔高程1850.0 m, 顶部地表最高高程为2371.8 m。



(a) 坝址区整体模型



(b) 左岸厂房区子模型

图 5 有限元网格

Fig. 5 Finite element meshes

子模型有限元网格如图5(b)所示, 共划分单元182720个, 节点243405个, 模型计算范围为: 厂房上游边墙到子模型上游边界的距离为166.5 m, 下游边墙到下游边界的距离为155.5 m, 向上取至地表, 下表面与整体模型一致。模型尺寸为垂直厂房轴线方向430 m, 平行轴线方向340 m, 最大高度为310 m。

3.4 计算参数及边界条件

为了对上述方法确定的裂隙围岩的渗透系数张量(表5)进行可靠性验证, 通过三维有限元整体模型对地下水位进行反分析, 并与钻孔实测水位进行比较。坝址其他分区的渗透系数如表6所示。

表 6 坝址其他分区的渗透系数取值

Table 6 Hydraulic conductivities for other regions at dam site

分区编号	介质	渗透系数/(cm·s ⁻¹)
1	混凝土面板	5.00×10^{-8}
2	垫层	7.83×10^{-4}
3	过渡层	3.12×10^{-1}
4	主堆石区	6.00×10^{-1}
5	次堆石区	3.40×10^{-1}
6	下游堆石区	2.20
7	混凝土防渗墙	5.00×10^{-7}
8	防渗帷幕	3.00×10^{-5}
9	覆盖层 Q_4^{al} - I	5.26×10^{-2}
10	覆盖层 Q_4^{al} - II	4.98×10^{-2}
11	覆盖层 Q_4^{al} - III	5.26×10^{-2}

模型的计算边界条件: 整体模型上、下游侧面边界和底部边界取隔水边界; 模型侧面边界取定水头边界, 根据水文地质条件插值确定; 大坝上游库水淹没区及引水隧洞混凝土衬砌部分取定水头边界, 水头值为2253 m; 大坝下游河道及尾水隧洞取定水头边界, 水头值为2145 m; 模型上表面除库水淹没区之外区域、各洞室、廊道的边界以及排水孔幕均设为潜在溢出边界。由于整体模型的目的是通过厂、坝区整体渗流分析, 为子模型提供边界条件, 因此在整体模型中, 对排水孔幕进行等效模拟。厂区子模型的边界水位条件利用整体模型的计算成果内插确定。子模型中的排水孔、排水洞以及厂房发电机层以上表面边界均取为Signorini型互补边界条件。表7给出了整体模型下钻孔水位计算值和实测值的对比结果。

从表7可以看出: 修正前, 钻孔实测水位与计算

水位的最大误差为 8.46 m, 标准差为 4.58 m; 修正后, 钻孔实测水头与计算水头最大误差为 7.44 m, 标准差为 3.61 m。渗透张量修正后最大误差和标准差均显著减小, 基本满足精度要求, 说明确定的渗透张量合理。

表 7 钻孔地下水位实测值与计算值的对比

Table 7 Comparison between calculated and observed values of groundwater level

钻孔 编号	实测 水位/m	计算水位 (修正前)/m	计算水位 (修正 后)/m	绝对误差 (修正 前)/%	绝对误差 (修正 后)/%
ZK51	2158.45	2159.61	2159.19	1.16	0.74
ZK52	2157.96	2159.97	2159.86	2.01	1.90
ZK54	2174.13	2182.59	2181.57	8.46	7.44
ZK101	2165.89	2170.32	2169.32	4.43	3.43
ZK125	2155.68	2159.54	2158.51	3.86	2.83
ZK134	2157.82	2155.42	2156.42	2.40	1.40
ZK156	2169.04	2174.58	2172.54	5.54	3.50
ZK186	2173.08	2178.62	2177.01	5.54	3.93
ZK195	2159.00	2164.53	2162.20	5.53	3.20
ZK206	2158.32	2159.98	2156.93	1.66	1.39
ZK235	2172.28	2177.65	2176.52	5.37	4.24
标准差			4.58	3.61	

4 计算成果分析

4.1 运行期渗流控制措施效果分析

水库正常运行工况下, 图 6 给出了整体模型下主厂房高程平切面水头等值线图。图 7~9 给出了厂区子模型计算得到的厂房区典型剖面的渗流场分布图。其中, 图 7 为厂房机组段横剖面水头等值线图; 图 8 为主副厂房中心纵剖面水头等值线图; 图 9 为上游竖向主排水孔幕中心纵剖面的压力水头等值线图。

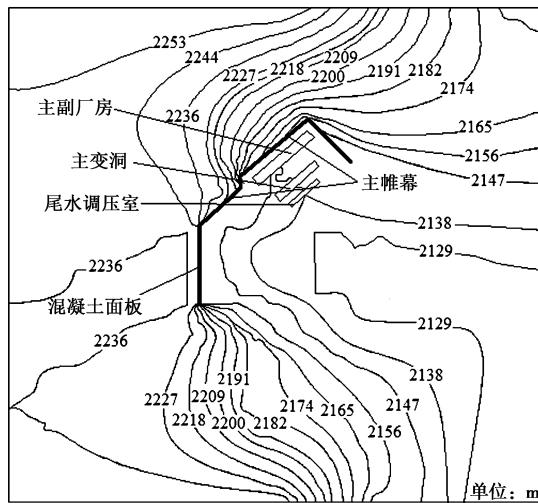


图 6 枢纽区 2156.0 m 高程平切面渗流等水头线

Fig. 6 Water head isolines of horizontal section of reservoir area at elevation of 2156.0 m

分析图 6 发现, 渗流场在厂房四周存在比较显著

的绕渗现象, 等水头线在上游帷幕处分布较为密集, 在防渗帷幕端部发生较大的弯曲, 而在帷幕后的厂房区以及远离地下厂房处分布较为稀疏, 并在厂房区洞室附近形成一个明显的低水头区。在大坝两岸山体地层中, 渗流的方向与坡面的倾向具有较好的一致性, 表明渗控措施对渗流场起到了控制作用, 水库绕坝渗漏主要通过坝肩山体向下游低洼地区进行。

图 7 中, 渗流自由面在上游侧经过主帷幕及排水幕后, 在厂房区大幅降低, 穿过厂房围岩上游侧底层排水廊道, 在机组段边墙底部溢出。在下游侧, 渗流自由面穿过尾水调压室, 并在机组段边墙底部溢出; 主变洞完全位于自由面之上, 不存在渗流溢出。

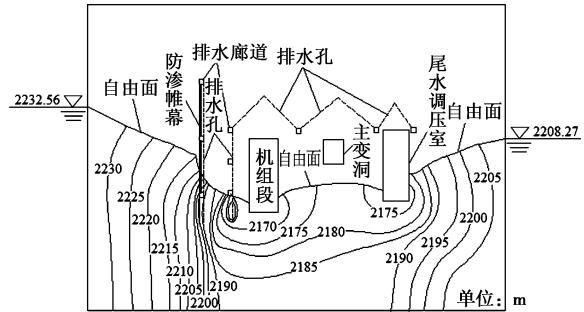


图8中,左岸山体侧的地下水和下游侧江水均向厂房区渗透,靠近山体侧渗透自由面在防渗帷幕处急剧下降,穿过厂房围岩山体侧的下层排水廊道,在安装场边墙底部溢出。靠近河道侧渗透自由面穿过厂房围岩河道侧中层排水孔幕,并在副厂房边墙底部溢出。图6~9表明整个渗流场的水头分布规律合理,水头等值线形态、走向和疏密程度都正确反映了相应区域防渗或排水渗控措施特点、渗流特性和边界条件,计算域内的主要防渗和排水措施都得到了精细的模拟,其渗控效果得到了正确反映。地下厂房区围岩在厂前帷幕排水系统、厂房四周排水孔幕和排水廊道作用下,坝基上、下游以及左右两岸的来水都得到了有效控制,自由面下降明显,在厂房区形成明显的地下水降落漏斗,厂房中上部围岩基本处于干燥或非饱和渗流状态,因此防渗排水系统等渗控措施设计合理,排水降压效果显著。此外,电站进入稳定运行期后,位于自由面上的排水孔及排水廊道对于以库区渗漏为主的渗流控制不起作用,但对降雨补给及厂区上部可能存在的局部承压水和上层滞水的疏导和排干仍起重要作用。由于这部分水量相对分散、流量较小,排水孔幕的间距可适当放宽,因此相应的渗控排水工程量可适当减少,存在一定优化空间。

4.2 运行期渗流控制措施效应敏感性分析

(1) 灌浆帷幕渗控措施效应敏感性分析

防渗帷幕的渗流控制效应取决于灌浆帷幕的渗透特性,其渗透特性能否达到设计要求受控于围岩的地质条件和施工过程中的灌浆质量等因素。该部分在水库正常运行工况下开展灌浆帷幕渗流控制效应的敏感性分析研究,主要针对帷幕渗透系数取值进行敏感性分析,得到的分区流量汇总结果对比如表8所示。表中,方案1帷幕渗透系数取运行期设计值,即 3.00×10^{-5} cm/s;方案2设定灌浆孔周围围岩破碎,灌浆质量不能保证,帷幕渗透性较大,渗透系数取为方案1的10倍,即 3.00×10^{-4} cm/s;方案3设定围岩灌浆孔周围围岩较好,灌浆质量严格控制,帷幕渗透性较小,渗透系数取为方案1的0.1倍,即 3.00×10^{-6} cm/s。

表8 厂房洞室群及排水廊道渗流量

Table 8 Flow rates into underground caverns and tunnels

(m³/d)

分区	方案1	方案2	方案3
主副厂房	229.9	231.5	226.3
主变洞	0	0	0
尾水调压室	2.5	3.6	2.2
上层廊道	0	0	0
中层廊道	132.4	57.6	171.6
下层廊道	992.4	943.8	1003.9
总量	1357.2	1236.5	1404.0

根据数值计算的结果,与设计方案(方案1)相

比,当帷幕灌浆的质量能够得到保证时(方案2),渗流自由面仅在帷幕上游侧的局部围岩中有小幅抬升,而在帷幕内下降明显,穿过帷幕后基本保持不变;相反,当帷幕灌浆的施工质量较差(方案3),渗透特性不能满足设计要求时,渗流自由面在主副厂房的上游侧围岩中有所降低,这是由于通过帷幕的渗流通过厂房前主排水孔幕进入厂房排水系统和厂房。表8中的分区流量对比也能反映这个结果,与设计方案相比(方案1),方案3进入排水系统的渗流量由1357.2 m³/d增大到1404.0 m³/d,增幅达3.4%;方案2减小到1236.5 m³/d,降幅达8.9%。

综上分析表明,灌浆帷幕渗控措施对于厂房区洞室群围岩的渗流场分布有一定影响,影响区有限。但降低帷幕的渗透性能大大减小进入厂房区的渗流量。因此,考虑到地下厂房围岩的复杂地质条件以及坝址区可能出现的集中渗漏情况,在进行帷幕灌浆施工时应该充分保证施工质量,确保防渗帷幕的完整性。

(2) 厂前辅助排水孔幕渗控敏感性分析

水库正常运行情况下,针对厂区主帷幕后设置与不设置辅助排水孔幕情况,开展排水孔幕渗控敏感性分析。厂房机组段横剖面自由面对比如图10所示。当防渗帷幕后不设置辅助排水孔幕时,渗流自由面在左岸山体围岩中有显著抬升,特别是在防渗帷幕之后、主排水孔幕之前,两者差距更加显著,穿过主排水孔幕后,两者差别减小,在厂房边墙底部溢出;在靠近河道侧的围岩中,渗流自由面略有抬升,但差别较小。

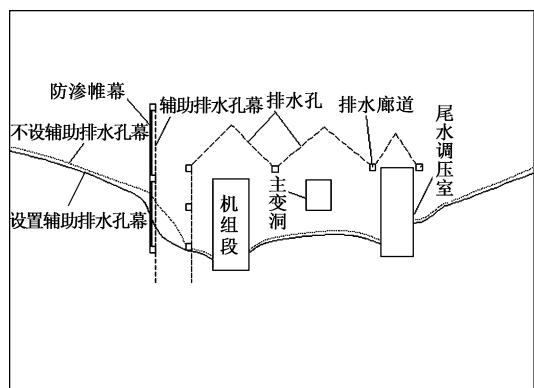


图10 厂房机组段横剖面自由面对比

Fig. 10 Comparison of phreatic surfaces of unit cross section of underground powerhouse

流入各洞室及排水廊道的渗漏量对比如表9所示。表中,方案1指防渗帷幕后设置辅助排水孔幕,方案2指防渗帷幕后不设置辅助排水孔幕。由表9可见,和方案1相比,方案2下流入中层和下层排水廊道的渗流量显著增大,中层廊道增大了133.1 m³/d,下层廊道增大了951.4 m³/d,增幅均接近一倍。分析其原因是,当防渗帷幕后未设置辅助排水孔幕时,厂房前主排水孔幕便成为防渗帷幕后首道排水屏障,来自

左岸山体和上游库区的地下水通过主排水孔直接汇入到中层和下层排水廊道中, 因此廊道中的入渗水量显著增大。此外, 主副厂房洞及尾水调压室的入渗水量也有所增大, 但增幅相对较小。综上分析, 辅助排水孔幕对于减小厂房各洞室及排水廊道的渗漏作用显著, 能够降低厂区围岩孔隙水压力。

表9 厂房洞室群及排水廊道渗流量统计表

Table 9 Flow rates into underground caverns and tunnels

分区	(m ³ /d)	
	方案1 (设置排水)	方案2 (不设置排水)
主副厂房	229.9	251.5
主变洞	0	0
调压室	2.5	10.2
上层廊道	0	0
中层廊道	132.4	265.5
下层廊道	992.4	1943.8
总量	1357.2	2471.0

一般而言, 水电工程地下厂房大多只设主排水孔幕, 辅助排水孔幕仅在围岩地质条件较差、围岩稳定性问题较为突出或工程区富水性强、山体地下水位较高时设置。对于金川电站地下厂房而言, 从工程的长期安全考虑, 其设置对地下厂房的安全、稳定运行是有必要的。

(3) 排水孔间距渗控敏感性分析

相关研究表明, 排水孔间距和孔径对于含复杂渗控结构的渗流场有显著影响, 当坝基中的排水孔布置越密集, 地下水水位降幅越明显。但是考虑到地下厂房周围围岩的复杂地质条件和岩体渗透性的空间变异性, 设计中对排水孔的间距和孔径不能随意增大或减小, 因此, 本节针对正常工况下的地下厂房围岩进行排水孔间距渗控敏感性分析。首先保持排水孔直径不变(孔径取 12.73 cm), 排水孔间距分别取 2.0, 3.0, 4.5, 6.0 m, 相应情况下的渗流自由面对比如图 11 所示。流入各洞室及排水廊道的渗漏量对比见表 10 所示。其中 3 m 为设计排水孔间距方案。

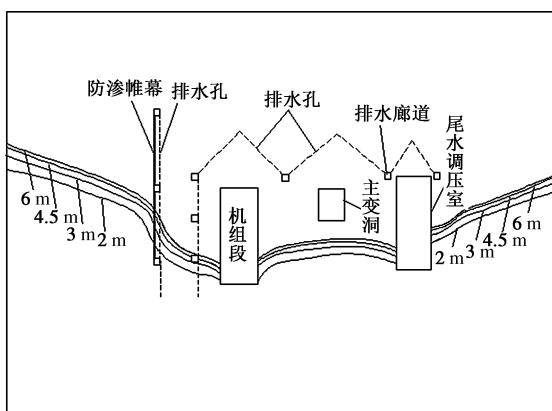


图 11 厂房机组段横剖面自由面对比

Fig. 11 Comparison of phreatic surfaces of unit cross section of underground powerhouse

表 10 厂房洞室群及排水廊道渗流量统计表

Table 10 Flow rates into underground caverns and tunnels

分区	(m ³ /d)			
	方案1 (3.0 m)	方案2 (2.0 m)	方案3 (4.5 m)	方案4 (6.0 m)
主副厂房	229.9	168.5	239.6	241.5
主变洞	0	0	0	0
调压室	2.5	2.2	2.6	2.6
上层廊道	0	0	0	0
中层廊道	132.4	145.8	121.6	128.2
下层廊道	992.4	1125.3	920.3	915.2
总量	1357.2	1441.8	1284.1	1287.5

图 11 表明, 排水孔的间距对自由面位置有一定的影响, 当排水孔间距小于 4 m 时, 随着排水孔间距的减小, 厂房区围岩渗流自由面的位置降低较为明显; 当排水孔间距大于 5 m 时, 排水孔间距对自由面的影响有所减弱。表 10 中的流量统计结果表明, 随着排水孔间距从 3 m 减小到 2 m, 厂房区总渗流量增大了 84.6 m³/d; 当排水孔间距由 3.0 m 增大 4.5 m 和 6.0 m 时, 厂房区总渗流量分别减小了 73.1 m³/d 和 69.7 m³/d, 可以看出, 随着排水孔间距的增大, 渗流量的变化受间距的影响在逐渐减小, 分析其原因是: 随着排水孔间距的增大, 排水系统周围渗透压力也随之增大, 从而使排水孔数量减小产生的排水量减小值和渗压增大引起的排水量增大值基本抵消。综合考虑工程安全性和经济性要求, 排水孔幕间距取 3.0~4.5 m 是合适的。建议对设在中层廊道以下的排水孔间距可以取为 3.0 m, 反之, 对于设在中层排水廊道以上的排水孔间距可以适当放宽取值, 可以取为 4.5 m。该工程中, 建议对于中层排水廊道以下的排水孔间距建议取设计值 3 m, 中层排水廊道以上排水孔间距建议取 4.5 m。

5 结 论

针对金川水电站左岸地下厂房区裂隙围岩的渗流场进行了计算分析, 论证了渗流场分布特征及渗流控制措施的有效性。并开展了运行期渗控措施效应敏感性分析。主要得出了以下 5 点结论。

(1) 采用裂隙样本统计法和现场压水试验法相结合确定裂隙岩体的渗透张量, 既能较好地反映裂隙岩体的各向异性, 又能减少因裂隙开度和间距测量不准所带来的误差。通过基于等效模拟的整体模型对坝区地下渗流场进行三维数值模拟计算, 进一步验证了该方法的可行性和有效性。

(2) 根据计算获得的岩体渗透张量, 基于排水孔精细模拟的厂房区子模型, 重点对左岸地下厂房区进行三维有限元渗流分析, 论证了防渗排水措施的有效性和合理性。在运行期工况下, 厂区排水系统作为渗流场的控制边界使得厂房区压力水头较低, 对厂房区

的渗流控制效果显著, 配合防渗帷幕措施使得地下水在厂区围岩内形成明显的降落漏斗, 主变洞和发电机层以上厂房围岩处于自由面之上, 厂房和调压室仅稍具有承压性。表明厂区防排系统的设计方案总体上合理、有效。

(3) 防渗帷幕的渗透性对渗流场的分布影响不甚明显, 但降低帷幕的渗透性能大大减小进入厂房区的渗流量。因此, 考虑到地下厂房围岩的复杂地质条件及坝址区可能出现的集中渗漏情况, 在进行帷幕灌浆施工时应该充分保证施工质量, 确保防渗帷幕的完整性。

(4) 辅助排水孔幕对于减小厂房各洞室及排水廊道的渗漏作用显著, 能够降低厂区围岩孔隙水压力。对于金川电站地下厂房而言, 从工程的长期安全考虑, 其设置对地下厂房的安全、稳定运行是有必要的。

(5) 排水孔间距在3.0~6.0 m范围内变化时, 对渗流场的分布影响不明显, 但对渗流量有较大影响。综合考虑工程安全性和经济性要求, 排水孔幕间距取3.0~4.5 m是合适的。建议对设在中层排水廊道以下的排水孔间距取为3.0 m, 反之, 对于设在中层排水廊道以上的排水孔间距可以适当放宽取值, 可以取为4.5 m。

参考文献:

- [1] 刘建刚, 陈建生. 基岩渗漏成因病险堤坝的两个典型实例[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 683~688. (LIU Jian-gang, CHEN Jian-sheng. Two typical examples of dykes with defects or in danger resulted from bed rock permeation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 683~688. (in Chinese))
- [2] XIAO C L, QI W B, LIANG X J. Research on reservoir leakage through the right-bank basalt of Hengshan hydro-project[C]// Proceedings of 2009 International Forum on Porous Flow and Applications. 2009: 877~881.
- [3] 徐瑞春, 段建肖. 水布垭枢纽地质研究与实践[J]. 人民长江, 2007, 38(7): 1~6. (XU Rui-chun, DUAN Jian-xiao. Geological research for Shuibuya hydropower station and practice[J]. Yangtze River, 2007, 38(7): 1~6. (in Chinese))
- [4] CHEN Y F, ZHOU C B, ZHENG H. A numerical solution to seepage problems with complex drainage system[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(3): 383~393.
- [5] ZHENG H, LIU D F, LEE C F, et al. A new formulation of Signorini's type for seepage problems with free surfaces[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 64(1): 1~16.
- [6] 田开铭, 万 力. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价[M]. 北京: 学苑出版社, 1989. (TIAN Kai-ming, WAN Li. Research and evaluation of anisotropic permeability fractured media[M]. Beijing: National Academy Press, 1989. (in Chinese))
- [7] 仵彦卿. 岩体水力学基础(七)——岩体水力学参数的确定方法[J]. 水文地质工程地质, 1998, 3(2): 42~48. (WU Yan-qing. Base of rock mass hydraulics(7): the method to determine hydraulic parameters[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1998, 3(2): 42~48. (in Chinese))
- [8] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 126~127. (ZHANG You-tian. Water Rock Mechanics and Engineering[M]. Beijing: Water Power Press, 2005: 126~127. (in Chinese))
- [9] HSIEH P A, NEUMAN S P. Field determination of the three dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media[J]. Water Resources Research, 1985, 21(11): 1655~1665.
- [10] 仵彦卿, 张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995. (WU Yan-qing, ZHANG Zhuo-yuan. Introduction to rock hydraulics[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995. (in Chinese))
- [11] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991. (MAO Chang-xi. Seepage computation analysis & control[M]. Beijing: Water Power Press, 1991. (in Chinese))
- [12] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1999. (LIU You-rong, TANG Hui-ming. Rock mechanics[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1999. (in Chinese))
- [13] PARK B Y, KIM K S, KWON S, et al. Determination of the hydraulic conductivity components using a three-dimensional fracture network model in volcanic rock[J]. Engineering Geology, 2002, 66(12): 127~141.
- [14] LEE C H, DENG B W, CHANG J L. A continuum approach for estimating permeability in naturally fractured rocks[J]. Engineering Geology, 1995, 39(102): 71~85.
- [15] SNOW D T. Anisotropic permeability of fractured media[J]. Water Resources Research, 1969, 5(6): 1273~1289.
- [16] 王 媛. 求解有自由面渗流问题的初流量法的改进[J]. 水利学报, 1998, 29(3): 69~74. (WANG Yuan. The modified initial flow method for 3D unconfined seepage computation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(3): 68~74. (in Chinese))
- [17] 陈益峰, 周创兵, 毛新莹, 等. 水布垭地下厂房围岩渗控

- 效应数值模拟与评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 308 - 317. (CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing, MAO Xin-ying, et al. Numerical simulation and assessment of seepage control effects on surrounding rocks of undergrounning powerhouse in Shuibuya hydropower project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 308 - 317. (in Chinese))
- [18] 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, 1987, 11(6): 585 - 601.
- [19] 朱伯芳. 渗流场中考虑排水孔作用的杂交元[J]. 水力学报, 1982 (9): 32 - 41. (ZHU Bo-fang. Analysis of the effect of draining holes in the seepage field by means of hybrid elements[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982(9): 32 - 41. (in Chinese))
- [20] 关锦荷, 刘嘉忻, 朱玉侠. 用排水沟代替排水井列的有限单元法分析[J]. 水力学报, 1984, 15(3): 11 - 18. (GUAN Jin-he, LIU Jia-xin, ZHU Yu-xia. Finite element analysis of an array of wells replaced by a drainage ditch[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 15(3): 11 - 18. (in Chinese))
- [21] FIPPS G, SKAGGS R W, NIEBER J L. Drains as a boundary condition in finite elements[J]. Water Resources Research, 1986, 22(11): 689 - 707.
- [22] 王恩志, 王洪涛, 邓旭东. “以管代孔”——排水孔模拟方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 346 - 349. (WANG En-zhi, WANG Hong-tao, DENG Xu-dong. “Pipe to represent hole”: numerical method for simulating single drainage hole in rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 346 - 349. (in Chinese))
- [23] 王恩志, 王洪涛, 王慧明. “以缝代井列”——排水孔幕模拟方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 98 - 101. (WANG En-zhi, WANG Hong-tao, WANG Hui-ming. “Fissure to represent line of holes”: numerical method for simulating the drainage hole curtain in rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 98 - 101. (in Chinese))
- [24] 周创兵, 熊文林, 骆雨文. 坝基岩体排水孔幕的等效模拟[C]// 水工结构研究与应用文集. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996: 217 - 230. (ZHOU Chuang-bing, XIONG Wen-lin, LUO Yu-wen. Equivalent simulation for drainage hole array in dam rock foundation[C]// Proceedings of Development and Application of Hydraulic Structures. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996: 217 - 230. (in Chinese))
- [25] CHEN S H, WANG W M, SHE C X, et al. Unconfined seepage analysis of discontinuous rock slope[J]. Journal of Hydrodynamics (Series B), 2000, 12(3): 75 - 86.
- [26] 胡 静, 陈胜宏. 渗流分析中排水孔模拟的空气单元法[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 281 - 287. (HU Jing, CHEN Sheng-hong. Air element method for modelling drainage holes in seepage analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 281 - 287. (in Chinese))
- [27] CHEN S H, XU Q, HU J. Composite element method for seepage analysis of geotechnical structures with drainage hole array[J]. Journal of Hydrodynamics(Series B), 2004, 16(3): 260 - 266.
- [28] 王 镛, 刘 中, 张有天. 有排水孔幕的渗流场分析[J]. 水力学报, 1992, 23(4): 15 - 20. (WANG Lei, LIU Zhong, ZHANG You-tian. Analysis of seepage field near a drainage holes curtain[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 23(4): 15 - 20. (in Chinese))
- [29] 朱岳明, 张燎军. 渗流场求解的改进排水子结构法[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 69 - 76. (ZHU Yue-ming, ZHANG Liao-jun. Solution to seepage field problem with the technique of improved drainage substructure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 69 - 76. (in Chinese))
- [30] 朱国盛, 崔浩东, 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. (ZHU Guo-sheng, CUI Hao-dong, ZHANG Jia-fa, et al. Seepage control measures for dam foundation and underground powerhouse caverns at right bank of Wudongde Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1722 - 1727. (in Chinese))
- [31] 崔皓东, 朱岳明, 吴世勇. 有自由面渗流分析的密集排水孔幕数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 440 - 444. (CUI Hao-dong, ZHU Yue-ming, WU Shi-yong. Numerical simulation for the densely-distributed drainage holes in seepage with free surface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 440 - 445. (in Chinese))