

立洲 RCC 拱坝坝址处天然渗流场反演分析

王 滔¹, 胡升伟², 陈建康^{1,3}, 裴 亮¹, 郭曙光¹

(1. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 中国水电顾问集团 成都勘测设计院, 四川 成都 610065;
3. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:立洲水电站坝址处地形和水文地质条件复杂, 岩体渗透性呈现分区明显、各向异性等特性, 且已知的地下水位特征点较少。根据坝区的工程地质与水文地质条件, 建立了拱坝与地基的三维渗流场有限元模型, 利用长观孔的实测水位, 设置合适的边界水位, 采用三维有限元方法对坝址处的渗流场进行反演分析。分析结果了解坝区天然地下水的分布情况, 并为坝址处施工期与运行期渗流分析以及渗控措施优化设计提供了依据。

关键词:渗流场; 反演分析; 有限元; 渗透系数; RCC 拱坝; 立洲水电站

中图分类号: TV642.2 **文献标志码:** A

由于拱坝具有受力条件好、承载能力高的优点, 近年来成为一种让受计人员青睐的坝型, 但据国内外对拱坝事故的统计, 相当部分事故与渗流有关, 因而弄清楚坝址的渗流规律对拱坝的稳定有着至关重要的作用。在拱坝建设前, 为了对整个坝区的地下渗流分布有较透彻的了解, 通常布置一定数量的钻孔来观测坝址区的地下水, 通过钻孔抽压水试验得出钻孔附近的岩体渗透系数。但是布置的钻孔数量有限, 不能全面的了解坝址区的地下水分布规律及岩体的渗透性, 需利用钻孔测值对坝址处的天然渗流场进行反演分析, 其结果成为将来设计渗控措施的重要依据^[1-3]。

1 工程地质及计算模型

1.1 工程地质条件

立洲水电站枢纽工程由碾压混凝土双曲拱坝、坝身泄洪系统、右岸地下长引水隧洞及右岸地面发电厂房组成。坝址位于立洲岩子灰岩峡谷内, 坝址区出露地层属于异地系统地层。坝址区地表共出露 4 条断层, 分别为 F₁₀、f₂、f₄、f₅。其中 F₁₀ 属 II 级结构面, f₂ 属 III 级结构面, f₄、f₅ 属 IV 级结构面。坝址区主要发育有 L1、L2、LP285 几条长大裂隙或裂隙带, 除 L1、L2 属 IV 级结构面外, 其余裂隙均属 V 级结构面。根据坝址区

平硐裂隙统计资料, 坝址区裂隙极为发育, 尤其以近 EW 走向裂隙最为发育。表 1 坝址区主要地质结构。

表 1 有限元模拟的坝址区主要地质结构

编号	高程/m	两岸情况	地质情况
F ₁₀	1680 ~ 2210	贯通	横跨左右岸、右岸与 D1yj 岩层相接、左岸与 Pk 岩层相接, 材料参数左岸为一类, 右岸与表层风化区为一类
f ₅	1860 ~ 2210	贯通、穿过坝体下方	左岸自 1860m 高程延伸至 2060m 高程
L1	1940 ~ 2060	位于左岸帷幕上游	在 2060m 高程与 L2 相接
L2	2020 ~ 2120	位于左岸, 由帷幕截断	高程 2020 ~ 2060m 位于帷幕下游, 高程 2060 ~ 2120m 位于帷幕上游, 与 L1 相接
LP285	2010 ~ 2060	位于左岸, 由帷幕截断	充填黄色黏土夹少量灰岩碎石, 粘土呈软塑状, 含量约占 80% ~ 90%。
LP4-1 ~ LP4-3 及 LX2 ~ LX4	2065 ~ 2110	位于右岸, 由帷幕截断	主要为卸荷裂隙, 张开宽 5 ~ 20cm。

1.2 渗流场计算模型

根据立洲水电站主要枢纽的布置、防渗帷幕、排水帷幕和左右两岸抗力体排水洞的布置情况以及地形地质条件, 考虑计算域的边界效应, 设定的三维有限元计算模拟范围为: 铅直向 (Z) 自建基面 (高程 1 960 m) 向下延伸 280 m (2 倍坝高) 至高程 1 680 m, 自坝顶 (高程 2 092 m) 向上延伸 118 m 至高程 2 210 m; 顺河向

(Y)自大坝向上游延伸 200 m(约 1.5 倍坝高),向下游延伸 450 m(约 3 倍坝高);横河向(X)自大坝中心向左右岸分别延伸 400 m(约 3 倍坝高)和 500 m(约 3.6 倍坝高),河床高程取为 1 980 m。图 1 为大坝典型渗控布置和地质结构模拟图。

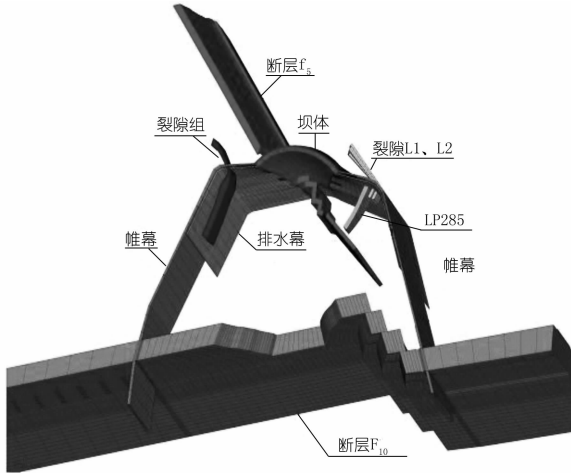


图 1 立洲水电站渗控布置及典型地质结构模拟

2 三维渗流场反演分析

2.1 渗流场反演理论

渗流反分析主要是考虑渗流区域地下水位的观测值与求解水位计算值之间的误差,通过不断的修正待求参数,从而实现对于地下渗流模型待求参数的识别,因此渗流反分析的主要问题是建立目标函数,求解最优参数。

渗流场反分析归结为:设渗透系数为 k_j ,待求的渗透参数共 m 个,即: $x_j = k_j$ ($j = 1, 2, \dots, m$),求 $\{x\} = [x_1, x_2, \dots, x_m]$,使加权误差平方和 $S = \sum_{i=1}^m \omega_i (\phi_i - \phi_i^*)^2$ 取到极小值,并满足条件 $\underline{x}_j \leq x_j \leq \overline{x}_j$ ($j = 1 \sim m$)。其中, ω_i 为加权系数; \underline{x}_j 为 x_j 的下限; \overline{x}_j 为 x_j 的上限; ϕ_i 为水头函数计算值; ϕ_i^* 为水头函数实测值; i 为测点编号。

其计算基本思想是,先等距划分各透水岩体渗透系数的范围,依次对每个变量逐一搜索,搜索出第一变量使目标函数取得最小值的相对最优解,固定该变量,然后再对其他变量逐一搜索。将通过此方法算得的渗透系数及边界初始值结果与钻孔水位进行对比,若计算值与测值相差较大,则改变边界水位,再对渗透系数逐一搜索,直到得到合理渗透系数和边界条件。

2.2 初始及边界条件

立洲水电站坝址处地下水的已知资料较少,已知

的地下水位特征点更少,这对于初始条件和边界条件的选取造成很大的难度,经过多次反复验算,在反演分析时采取以下处理:由于天然渗流状态下坝址区河水位变幅不大,模型范围内的上游河水位在 1 988 m 左右,下游河水位在 1 986 m 附近,在进行天然渗流场反演分析时,将上下游相应特征水位作为定水头边界。通过已获得的钻孔水位长观资料可以看出,在 F_{10} 断层(位置在坝址下游侧 200 m 左右)上游侧,天然地下水位较低平,几乎与河床水位持平,变化幅度很小,而在 F_{10} 断层下游侧,天然地下水位较高,变化幅度比较大。根据已知资料,并结合地形及天然地下水位的变化情况,选取 6 个特征点作为反演上下游及左右岸边界水位和岩体渗透参数的参考依据,得出对应的边界水位。

2.3 裂隙岩体渗透张量的计算

计算天然状态下渗流场时,岩体材料渗透系数的反演分析以设计建议的各渗透分区渗透系数范围为参考,其中,新鲜岩体、微风化、弱风化区以钻孔压水试验所得的透水率为依据,渗透系数见表 2。再结合计算域边界,通过大量的试算调整,经反复迭代,获得断层、裂隙分区的渗透系数,按(1)式计算各渗透分区对应的各向异性岩体的渗透张量^[4-5]:

$$K_{ij} = \frac{g}{12\nu} \sum_{l=1}^n \frac{b_{(l)}^3}{B_{(l)}} [\delta_{ij} - n_{i(l)} n_{j(l)}] \quad (1)$$

式中, K_{ij} 为渗透张量, m^2/s ; g 为重力加速度; $b_{(l)}$ 为 l 组裂隙张开度; $B_{(l)}$ 为 l 组裂隙发育间距; ν 为水的运动粘滞系数; δ_{ij} 为 Kronecker 记号,即 $\delta_{ij} = \begin{cases} 0, & (i \neq j) \\ 1, & (i = j) \end{cases}$; $n_{i(l)}$ 为 l 组裂隙法向方向余弦。

表 2 坝址新鲜岩体、微风化、弱风化岩体渗透系数

材料分区	透水率 范围值/ Lu	渗透系数 范围值/ ($cm \cdot s^{-1}$)	渗透系数反演 分析值/ ($cm \cdot s^{-1}$)	渗透系数反演 等效值/ ($cm \cdot s^{-1}$)
新鲜岩体	1~2	$(1 \sim 2) \times 10^{-5}$	2×10^{-5}	2×10^{-5}
微风化岩体	2~3	$(2 \sim 3) \times 10^{-5}$	3×10^{-5}	3×10^{-5}
弱风化岩体	3~5	$(3 \sim 5) \times 10^{-5}$	5×10^{-5}	5×10^{-5}

根据已知的坝址区裂隙统计资料,并通过试算调整,获得了一组比较可信的岩体材料分区各向异性渗透系数(表 3)。

3 渗流场反演结果

通过大量的试算和反复调整(主要调整边界水位和各岩体分区的渗透系数^[6]),以渗流场反分析方法为基础,并综合考虑坝址区的地形和地势变化,以天然地下水水位线为依据,采用各向异性岩体材料参数(渗

透系数见表2)的渗流计算模型对坝址区天然渗流场进行了反演分析^[7-8]。对比分析6个特征点的水头值(见表4)可以看出,反演分析得到的对应点水位值与实测值差别不大,计算结果差异较小。

表3 立洲水电站坝基断层、裂隙的渗透系数

材料分区	透水率范围 值/Lu	渗透系数范围 值 $K/(cm \cdot s^{-1})$	渗透系数等效值 $K/(cm \cdot s^{-1})$		
			K_{xx}	K_{yy}	K_{zz}
断层 F_{10}	50000 ~ 100000	$(5 \sim 10) \times 10^{-1}$	0.125	5.79×10^{-3}	0.125
断层 F_5	50000 ~ 100000	$(5 \sim 10) \times 10^{-1}$	1.53×10^{-2}	1.72×10^{-2}	2.30×10^{-2}
裂隙组 $LP_{4-1} \sim LP_{4-3}$ 及 $LX_2 \sim LX_4$	15000 ~ 30000	$(1.5 \sim 3) \times 10^{-1}$	2.31×10^{-5}	1.20×10^{-2}	1.20×10^{-2}
裂隙(LP285)	15000 ~ 30000	$(1.5 \sim 3) \times 10^{-1}$	1.34×10^{-3}	1.65×10^{-3}	2.0×10^{-3}
裂隙 $L1, L2$	15000 ~ 30000	$(1.5 \sim 3) \times 10^{-1}$	3.18×10^{-2}	3.18×10^{-2}	4.5×10^{-2}

注:表中 X 向表示横河向, Y 向表示顺河向, Z 向表示铅直向。

表4 钻孔的实测水位与计算水位对比

测点	测点位置	地面高程/m	测点水头值/m	各向异性计算水位值/m
G_1G_1 (左)	G_1G_1 与河中心线相交点向左200m	2330	1991	1990.28
G_1G_1 (右)	G_1G_1 与河中心线相交点向右165m	2290	1991.35	1990.31
LB(左)	ZLB与河中心线相交点向左260m	2370	1991.65	1991.08
LB(右)	ZLB与河中心线相交点向右233m	2360	1992.12	1992.11
WM(左)	F_{10} 断层左岸下游侧56m	2100	2018.15	2016.62
WM(右)	F_{10} 断层右岸下游侧70m	2153.56	2032.44	2030.49

由计算结果可看出,天然渗流场计算的水位线与地下实测水位线分布规律基本一致,表明本文反演分析获得的计算边界水位、各岩体分区材料渗透系数及天然渗流场比较合理,可以作为运行期各工况下渗流场分析的计算依据。

由等势线图(图2,3)可以看出,当岩体渗透系数为各向异性时,在 F_{10} 断层(位置在坝址下游侧200m附近)的上游侧,左右岸的地下水位总体是向河床补给并且偏向下游,且水位低平,变化幅度不大,大致与河床水位持平,这与开始所推测的地下水位线比较吻合。 F_{10} 断层下游侧水位比较高,但总体上还是向河床补给并且流向 F_{10} 断层处,最终通过断层流向河床。系数充分考虑了坝址区岩体和断层的空间分布特征和

由天然渗流场反演计算成果可以看出,渗流参数为各向异性时,渗流模型计算所获得的地下水位与设

计提供的地下水位推测线比较接近。各向异性的渗透

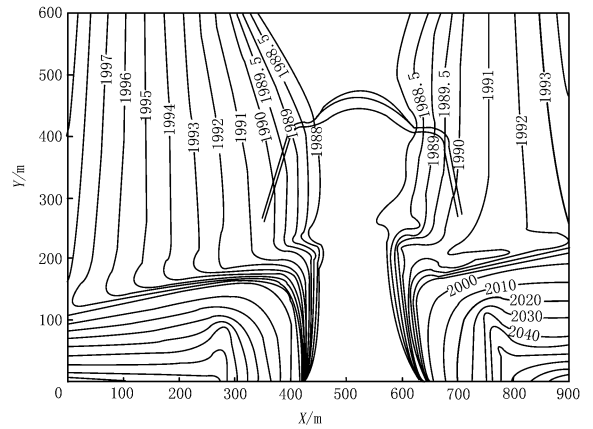


图2 各向异性天然渗流场1970m高程地下水位等势线(单位:m)

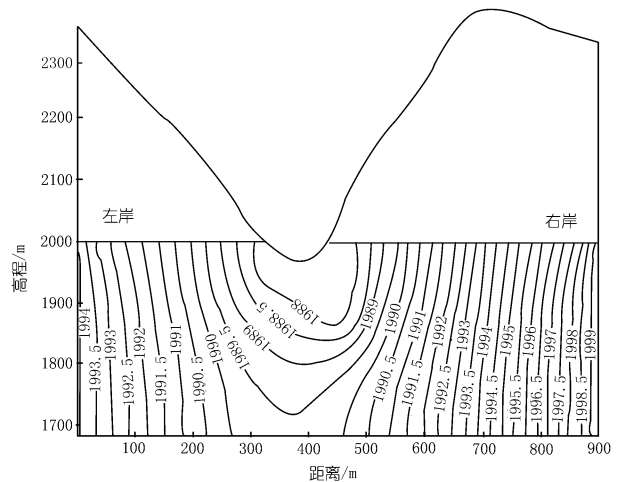


图3 各向异性天然渗流场SY-SY剖面地下水位等势线实际情况,能够较好地模拟坝址区渗流场的变化规律,基本上反映了坝址区的渗流场的变化规律,与实际情况比较吻合。

参考文献:

- [1] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制(第二版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [2] 杜延龄, 许国安, 韩连兵. 复杂岩基三维渗流分析方法及其工程应用研究[J]. 水利水电技术, 1991, (1): 2-9.
- [3] 王媛, 逮宝玉, 徐志英. 裂隙岩体渗流模型综述[J]. 水科学进展, 1996, 7(3): 276-282.
- [4] 肖裕行, 王泳嘉, 卢世宗, 等. 裂隙岩体水力等效连续介质存在性的评价[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 75-80.
- [5] 毛昶熙, 陈平, 李祖贻, 等. 裂隙岩石渗流计算研究[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(6): 1-10.
- [6] 许模. 渗流场反分析及其在多孔介质中的应用[J]. 地质灾害与环境, 1996, 7(2): 56-60.
- [7] 周敏, 代永新, 朱青山. 渗流参数的反分析及其工程应用[J]. 矿业快报, 2003, (4): 20-24.
- [8] 张俊霞, 李莉, 胡广伟, 等. 小浪底大坝渗控措施三维有限元计算分析[J]. 岩土工程界, 2005, (7): 62-64.

(编辑: 郑毅)