

某船闸枢纽主要分区渗透参数敏感性反演分析

金洪杰¹, 甘磊¹, 沈振中^{1,2}, 杨金孟¹, 孙一清¹, 张文兵¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 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)

摘要: 渗透参数的确定是水利工程渗流分析的前提,而渗透参数反演是确定材料渗透系数的有效手段之一。为定量分析某船闸枢纽主要分区材料渗透系数对枢纽渗流场的影响,建立某大型船闸三维渗流有限元分析模型。以不同测点水头值为指标,设计以混凝土闸体、基岩、防渗帷幕和排水孔幕渗透系数为因素的三水平正交试验,开展各区渗透系数对船闸渗流场的敏感性分析,采取可变容差法反演确定主要分区材料渗透系数。结果表明:各分区渗透系数对测点水头的敏感性从高到低依次为帷幕、基岩、孔幕和混凝土,其中帷幕、基岩和孔幕的影响较为显著;反演时需重点关注帷幕和基岩等影响程度较大的分区渗透系数;反演计算值和实测值最大误差为2.37%,帷幕和基岩的渗透系数分别为 3.04×10^{-6} 和 5.51×10^{-6} cm/s,反演参数可用于该船闸枢纽渗流稳定分析,研究成果可为类似工程提供借鉴。

关键词: 船闸; 渗透系数; 反演分析; 正交试验; 敏感性分析

中图分类号:TV61

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)03-0149-07

Sensitivity and inversion analysis of permeability parameters in main zones of a ship lock hub

JIN Hongjie¹, GAN Lei¹, SHEN Zhenzhong^{1,2}, YANG Jinmeng¹, SUN Yiqing¹, ZHANG Wenbing¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The determination of permeability parameters is the basis of seepage analysis in hydraulic engineering, and the inversion of them is one of the effective means to obtain the material permeability coefficient of the project. In order to quantify the influence of permeability coefficient of the main zone of a ship lock on the seepage field of the hub, a three-dimensional seepage finite element analysis model of the large ship lock was established. The waterhead values of different measuring points were taken as indicators, and the three-level orthogonal tests with the permeability coefficient of the concrete lock body, bedrock, anti-seepage curtain and drainage hole as factors were designed to carry out the sensitivity analysis of permeability coefficient of each zone to the ship lock seepage field. Then, the material permeability coefficient of the main zone was inversely determined by variable tolerance method. The results show that the sensitivity of the permeability coefficient of each zone to the waterhead of the measuring points was curtain, bedrock, hole curtain and concrete from high to low, among which the influence of curtain, bedrock and hole curtain were more significant. So, the inversion should focus on the permeability coefficient of the zones of high influence such as the curtain and bedrock. The maximum error between the calculated and measured values of inversion was 2.37%, and the permeability coefficients of the curtain and bedrock were 3.04×10^{-6} and 5.51×10^{-6} cm/s, respectively. The inversion parameters can be used for the seepage stability analysis of the ship lock, and the research results can provide some reference for similar projects.

Key words: ship lock; permeability coefficient; inversion analysis; orthogonal test; sensitivity analysis

收稿日期:2021-08-12; 修回日期:2022-01-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51609073);江苏省自然科学基金项目(BK20201312)

作者简介:金洪杰(1997-),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要从事工程渗流分析等方面的研究。

通讯作者:甘磊(1987-),男,江西抚州人,博士,副教授,主要从事工程渗流分析等方面的教学与科研工作。

1 研究背景

渗流问题是水利工程设计和建设中需重点研究的问题之一,水工程渗流安全不容忽视^[1-2]。船闸是水利枢纽中的主要通航建筑物,其服役期间,闸门前后水位升降、地下水位变化、潮汐、洪峰、泄洪等过程均会对船闸及岸坡的渗流稳定及结构安全产生影响^[3]。此外,在长期水头差的作用下,船闸地基及岸坡岩土体中会产生渗透水流,从而增大基底扬压力,影响船闸闸基的稳定^[4]。研究船闸渗流特性具有重要的工程价值和理论意义^[3-5],而各分区材料渗透参数的确定是渗流分析的前提。目前,渗透参数的获取方法主要有3种:地质勘测、试验测定和反演分析。近年来,反演分析方法已成为确定材料渗透参数的有效手段之一^[6]。

渗流参数反演按求解问题不同,可分为解析法、图解法和数值法^[7]。其中数值法应用最为广泛^[7-10],如:何吉等^[7]采用渗流有限单元法,开展了单孔压水试验的数值模拟,结合BP神经网络的非线性映射能力,提出了单裂隙岩体渗透张量的反演分析方法;Gan等^[8]基于等效连续渗流介质模型,提出了一种反演破碎裂隙岩体渗透系数的新方法,并将反演所得岩体渗透系数应用于甘肃省上磨水库坝区渗流场分析;黄铭等^[9]基于ANSYS软件进行二次开发,采取分层搜索法反演得到材料渗透系数,实现了海堤工程的渗流仿真。

参数反演过程中涉及的参数组合及监测数据较为繁杂,定量研究各参数变化对监测指标的影响具有重要意义。敏感性分析是一种定量表征相关因素影响程度的有效方法,其在工程渗流领域被广泛采用^[10-13],如:王学武等^[11]以某高坝上游土石围堰为研究对象,分析了两岸岩体和防渗墙渗透系数对基坑渗流量的影响,结果表明两岸岩体和防渗墙渗透系数对基坑渗流量的敏感性较高;周青等^[12]结合阿青水电站心墙坝工程,对坝壳料、覆盖层和心墙的渗透系数进行了单因素敏感性分析,明确了各主要坝料渗透系数对坝体渗流场的影响程度;周邻鹏等^[13]针对黑河金盆水库工程,开展了心墙、帷幕及两岸岩体等材料渗透系数敏感性分析,结果表明帷幕和两岸岩体的渗透系数对坝区渗流场的敏感性较高,在渗流控制及优化设计时需重点关注。本文以某大型船闸为研究对象,建立该船闸三维渗流有限元分析模型,针对船闸混凝土闸体、基岩、防渗帷幕和排水孔幕的渗透系数开展正交试验设计,研究各分区材

料渗透系数对船闸渗流场的影响程度,据此进一步开展船闸主要分区材料渗透系数反演分析,以期为类似工程渗流分析评价提供借鉴。

2 渗流分析的基本原理

2.1 渗流计算

本文采用三维渗流有限元计算分析程序^[14-16]对所研究的船闸的渗流性态进行计算分析,渗流有限元微分控制方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c) \right] - Q = [C(h_c + \beta S_s)] \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (1)$$

式中: x_i, x_j 为坐标值($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$); k_{ij}^s 为饱和渗透张量, m/s; k_r 为相对透水率, 饱和状态下取1; h_c 为压力水头, m; k_{i3}^s 为第3坐标轴的渗透系数, m/s; Q 为计算区域内的源汇项, m³/s; C 为比容水度, m⁻¹, 其计算公式为 $C = \partial \theta / \partial h_c$, 当 $C = 0$ 时为正压; β 为选择常数, 饱和状态下取1; S_s 为弹性贮水率, 其值为常数, m⁻¹; t 为时间, s。

该微分方程的定解条件可分为两种:

(1) 初始条件:

$$h_c(x_i, 0) = h_c(x_i, t_0) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

(2) 边界条件:

$$h_c(x_i, t) |_{\Gamma_1} = h_{c1}(x_i, t) \quad (3)$$

$$- \left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c) \right] n_i |_{\Gamma_2} = q_n \quad (4)$$

$$- \left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c) \right] n_i |_{\Gamma_3} \geq 0 \text{ 且 } h_c |_{\Gamma_3} = 0 \quad (5)$$

式中: t_0 为初始时刻, s; h_{c1} 为已知水头, m; n_i 为外法线方向余弦; Γ_1 为已知水头边界; Γ_2 为已知流量边界; q_n 为已知流量, m³/s; $h_c(t_0)$ 为初始 t_0 时刻的渗流场水头, m; Γ_3 为逸出边界。

2.2 参数敏感性分析

通过计算获得船闸渗流场的水头分布, 得到各节点计算水位 H 。由于地下水水位分布在一定程度上可反映船闸渗流性态, 因此将其作为指标进行船闸渗流场的敏感性分析。

本文采取“正交试验设计”的方法进行因素组合设计^[17], 开展不同方案下船闸三维有限元渗流反演分析。通过对试验结果的极差和方差分析, 筛选出对船闸基础地下水水位敏感性较高的分区渗透系数作为后续反演分析的重点对象, 以提高反演效率。

(1)极差分析。采用极差大小衡量关键指标对相关因素的敏感程度,其具体计算公式如下:

$$K_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Y_k - \bar{Y}) \tag{6}$$

$$R_j = \max\{K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{nj}\} - \min\{K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{nj}\} \tag{7}$$

式中: K_{ij} 为因素 j 在 i 水平下试验结果的平均值; n 为试验次数; Y_k 为第 k 次试验值; $\bar{Y}$ 为所有试验结果均值; R_j 为极差值。

(2) 方差分析。方差分析主要用来研究因素和指标之间的相关性,判断其影响是否显著。 F 值为方差分析中评判显著性水平的统计量值。通过比较 F 值,可得到各因素对指标影响程度的大小;查询 F 检验表,可判断该因素对指标的影响是否显著。具体公式如下:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^r n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 / df_A}{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 / df_e} \tag{8}$$

式中: $\bar{x}_i$ 为 i 水平下试验结果的均值; $\bar{x}$ 为所有试验结果的均值; r 为水平总数; n_i 为 i 水平下的试验次数; df_A 、 df_e 分别为组间和组内自由度。

3 工程实例

3.1 工程概况

某船闸布置于枢纽左侧宽阔的弓形凸岸。船闸基岩为新鲜花岗岩,无风化层及软弱地基;闸墩之间及两侧强风化和弱风化岩体均已被挖除,并以回填混凝土加固。船闸上游面水库属于典型季节型调节水库,水位变化较为频繁,2019 年 10 月 28 日至 2019 年 12 月 31 日期间,库水位变化较为稳定,平均库水位为 174.35 m,最大变幅为 1.15 m。从左岸山体段经左侧挡水坝段、两线船闸及右侧挡水坝段的基础灌浆廊道至右侧的中间山体连接段,布置有 1 个监测横断面,横断面位于帷幕和孔幕之间,共布置 17 支测压管,可实现船闸及边坡山体地下水水位的实时监测。

3.2 有限元模型

结合该船闸工程的水文地质条件和监测点分布情况,建立三维渗流有限元计算模型。选取模型边界范围如下:下边界截取至闸室底板建基面向下延伸 60 m;下游边界截取至与闸室段连接处;左、右两

岸从闸室外侧开始,分别向两侧延伸 3 倍闸室宽度,即 100 m。模型采用笛卡尔坐标系,具体定义如下: x 轴平行于闸轴线,由左岸指向右岸; y 轴顺河流方向,指向下游,取船闸与水库交界处为 y 轴零点; z 轴垂直于地平面,指向上方,与实际高程一致。

综合船闸计算区域内地形地质和建筑物结构等特征,建立船闸及地基三维有限元渗流分析模型。沿模型 y 轴方向选取了 11 个控制断面,包含闸室、防渗帷幕和排水孔幕结构体断面等。模型结点总数为 21 644 个,单元总数为 19 875 个。船闸整体有限元模型及网格剖分如图 1、2 所示。

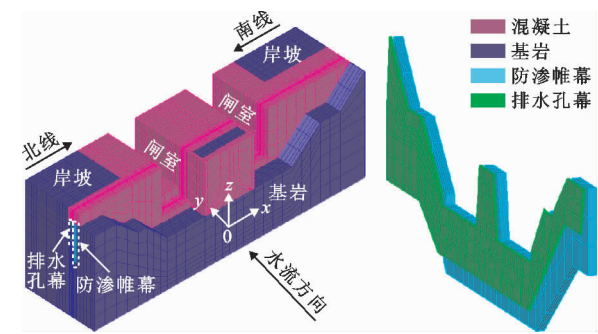


图 1 船闸三维有限元模型及网格剖分示意图

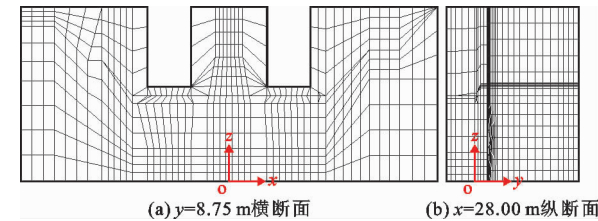


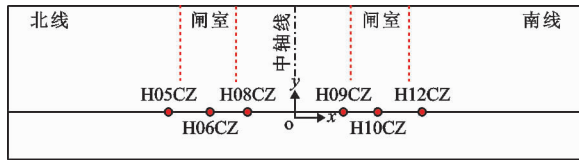
图 2 船闸三维有限元模型横、纵断面网格剖分示意图

3.3 反演参数及边界条件

结合水文、地质勘测数据及监测资料,初步设定船闸模型各分区(混凝土、基岩、防渗帷幕、排水孔幕)渗透系数 k 的数值反演范围,具体见表 1。设定左、右边坡地下水水位分别为 200.00、220.00 m,反演库水位为 174.35 m,该水位所处时间段水库水位变化幅度较小,船闸渗流场较为稳定,反演结果更准确。从渗流监测纵断面中选取 6 个典型测点在反演时段的平均水位为约束条件,测点钻孔分布于南、北线边坡、闸室及闸墩 6 个不同的闸段,各测点监测数据稳定、完整。6 个典型测点分布及其反演时段测压管水头分别如图 3 和表 2 所示。

表 1 船闸模型各分区材料渗透系数数值反演范围

分区材料	混凝土	基岩	防渗帷幕	排水孔幕
渗透系数 k	$(0.5 \sim 5.0) \times 10^{-7}$	$(5.0 \sim 9.0) \times 10^{-6}$	$(1.0 \sim 4.0) \times 10^{-6}$	$(1.0 \sim 5.0) \times 10^{-4}$



H05CZ: (-72.00, 8.75) H06CZ: (-49.00, 8.75) H08CZ: (-28.00, 8.75)
H09CZ: (28.00, 8.75) H10CZ: (46.00, 8.75) H12CZ: (72.00, 8.75)

图3 6个渗流监测典型测点分布示意图(单位:m)

表2 库水位为174.35 m时6个典型测点的测压管水头

测点编号	测压管水头/m	测点位置
H05CZ	130.01	北线边坡
H06CZ	128.58	北线底板基岩
H08CZ	124.84	北线闸墩间隙
H09CZ	124.64	南线闸墩间隙
H10CZ	125.03	南线底板基岩
H12CZ	126.16	南线边坡

模型计算边界主要有3种,分别为已知水头边界、不透水边界和出渗边界。具体设置如下:已知水头边界为水库蓄水位和左、右岸地下水水位以下的给定水头边界,包括挡水面、闸室内的闸墩壁面和排水孔幕顶端;出渗边界主要为基岩内的排水廊道;不

透水边界为模型底边界。

4 敏感性分析

4.1 正交实验设计

选取上述6个典型测点水头值作为计算分析的考察指标,分别标记为 H_5 、 H_6 、 H_8 、 H_9 、 H_{10} 和 H_{12} ;以混凝土、基岩、帷幕和孔幕4种分区的渗透系数为因素,设计正交实验。结合地勘报告及相关工程经验,设定1组材料渗透系数基准值为 1.05×10^{-7} 、 6.75×10^{-6} 、 2.92×10^{-6} 和 2.49×10^{-4} cm/s,在此基础上分别增大和减小20%模拟高、中、低3个因素水平^[18];不考虑各因素之间的交互作用并剔除等比例的渗透系数组合。根据实验因素和水平数,选择 $L_9(3^4)$ 正交试验表,确定的因素水平次序见表3,正交试验方案及结果见表4。

表3 船闸渗流场敏感性分析的因素与水平

因素 水平	各分区的渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)			
	$k_{\text{混凝土}}$	$k_{\text{基岩}}$	$k_{\text{帷幕}}$	$k_{\text{孔幕}}$
1	0.84×10^{-7}	5.40×10^{-6}	2.34×10^{-6}	1.99×10^{-4}
2	1.05×10^{-7}	6.75×10^{-6}	2.92×10^{-6}	2.49×10^{-4}
3	1.26×10^{-7}	8.10×10^{-6}	3.50×10^{-6}	2.99×10^{-4}

表4 船闸渗流场敏感性分析 $L_9(3^4)$ 正交试验方案

方案 序号	$k_{\text{混凝土}}$ 水平	$k_{\text{基岩}}$ 水平	$k_{\text{帷幕}}$ 水平	$k_{\text{孔幕}}$ 水平	H_5/m	H_6/m	H_8/m	H_9/m	H_{10}/m	H_{12}/m
1	1	1	1	1	127.80	127.38	127.22	127.20	127.34	127.52
2	1	2	2	2	127.79	127.36	127.20	127.19	127.32	127.51
3	1	3	3	3	127.78	127.35	127.19	127.18	127.31	127.52
4	2	1	2	3	128.02	127.49	127.29	127.28	127.45	127.74
5	2	2	3	1	128.17	127.74	127.57	127.55	127.69	127.90
6	2	3	1	2	127.27	126.94	126.83	126.81	126.91	126.98
7	3	1	3	2	128.37	127.82	127.61	127.59	127.78	128.08
8	3	2	1	3	127.43	127.04	126.90	126.88	127.01	127.16
9	3	3	2	1	127.67	127.34	127.21	127.20	127.30	127.39

4.2 极差分析

各典型测点水头指标 H_i 的极差分析结果如图4所示。由图4可知,混凝土、基岩、帷幕和孔幕4种分区的渗透系数对6个典型测点水头值的敏感性高低排序相同,均为 $k_{\text{帷幕}} > k_{\text{基岩}} > k_{\text{孔幕}} > k_{\text{混凝土}}$;由此判断该4种材料中帷幕渗透系数的改变对船闸渗流场的影响最大,其次分别为基岩、孔幕和混凝土的渗透系数。

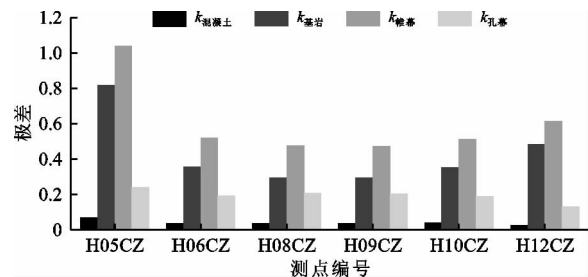


图4 船闸渗流场影响因素极差对比

为进一步研究各因素对不同测点地下水水位影响权重的变化规律,本文对极差计算结果进行归一化处理,结果见表 5。由表 5 可知,各测点帷幕和混凝土的渗透系数对船闸地下水水位的影响权重变化幅度较小,孔幕的渗透系数影响权重随测点位置的改变其变化幅度较为明显,呈现中轴线附近大两侧小的分布趋势。

4.3 方差分析

通过极差分析对各因素的敏感程度进行了排

序,结合方差分析进一步剖析试验结果,以验证极差分析结果的合理性,判断各因素对指标的影响是否显著。其分析结果见表 6。

由表 6 可知,各因素对 6 个指标的显著性水平分布规律相同。结合各因素 F_{ij} 值判断,其对 H_i 影响的显著性水平大小排序为 $k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$,其中 $k_{帷幕}$ 和 $k_{基岩}$ 对 H_i 的影响显著,敏感性较高; $k_{孔幕}$ 对于 H_i 的影响次之,敏感性一般; $k_{混凝土}$ 对于 H_i 的影响不显著,敏感性较低。

表 5 各典型测点指标 H_i 极差的归一化分析结果

指标	因素	各分区渗透系数权重 /%				敏感性
		$k_{混凝土}$	$k_{基岩}$	$k_{帷幕}$	$k_{孔幕}$	
H_5	R_{5j}	3. 19	37. 72	47. 96	11. 13	$k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$
H_6	R_{6j}	3. 35	32. 22	46. 97	17. 46	$k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$
H_8	R_{8j}	3. 47	29. 11	46. 92	20. 50	$k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$
H_9	R_{9j}	3. 48	29. 35	46. 97	20. 20	$k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$
H_{10}	R_{10j}	3. 57	32. 26	46. 94	17. 23	$k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$
H_{12}	R_{12j}	2. 08	38. 54	49. 00	10. 38	$k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$

表 6 各典型测点指标 H_i 方差分析结果

指标	因素	各分区渗透系数 F_{ij} 值				显著性水平
		$k_{混凝土}$	$k_{基岩}$	$k_{帷幕}$	$k_{孔幕}$	
H_5	F_{5j}	1. 43	221. 28	357. 48	19. 26	$k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$
H_6	F_{6j}	5. 84	530. 61	1126. 94	155. 76	$k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$
H_8	F_{8j}	7. 09	515. 30	1340. 46	254. 90	$k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$
H_9	F_{9j}	6. 98	485. 52	1241. 92	230. 55	$k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$
H_{10}	F_{10j}	7. 17	585. 46	1232. 89	165. 88	$k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$
H_{12}	F_{12j}	2. 79	939. 92	1521. 57	68. 58	$k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$

基于极差分析和方差分析获得的各因素敏感性和显著性分布规律相同,均为 $k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$ 。各因素对于南北线边坡、闸底板和闸墩间隙等 6 个典型测点水头值的敏感性趋势相同且各分区渗透系数影响权重随着测点位置的不同而变化,其中 $k_{基岩}$ 和 $k_{孔幕}$ 的影响权重随位置变化的幅度较大。综上所述,开展该船闸工程渗透系数反演分析时,应关注帷幕、基岩和孔幕的渗透系数,混凝土的渗透系数可根据经验或参考类似工程选取。

5 参数反演及成果分析

基于船闸枢纽各分区材料渗透系数的敏感性分析,采用可变容差法^[19]进行船闸渗透系数的反演计算。具体步骤如下:(1)基于地质勘测数据,初定各

分区材料渗透系数的反演范围及初始值;(2)计算船闸渗流场水头分布,提取测点水头计算值,分析与实测值之间的误差是否满足要求;(3)根据上一组误差,修正渗透参数,不断重复上述操作,直到误差满足要求,即可得到计算参数值。

各分区材料的渗透系数反演计算结果见表 7;6 个典型测点的地下水水位实测值与反演计算值分布趋势及误差分析如图 5 所示。

由图 5 可知,各典型测点地下水水位反演计算值与实测值的相对误差均小于 3%,平均相对误差为 0. 97%,最大相对误差为 2. 37%,满足工程应用要求^[20-21]。表明反演计算获得的船闸枢纽各分区材料的渗透系数与实际基本相符,可用于船闸三维渗流分析。

表 7 各分区材料渗透系数反演计算结果 cm/s

分区材料	混凝土	基岩	防渗帷幕	排水孔幕
渗透系数 k	1.21×10^{-7}	5.51×10^{-6}	3.04×10^{-6}	2.28×10^{-4}

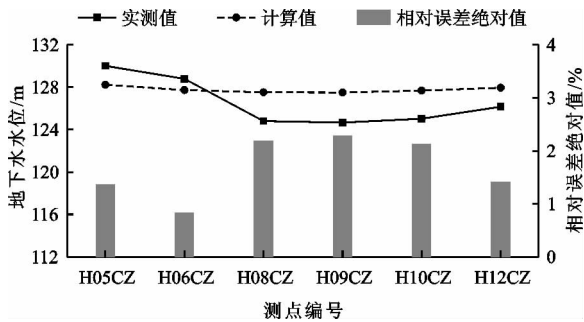


图 5 各典型测点地下水水位反演计算值与实测值对比

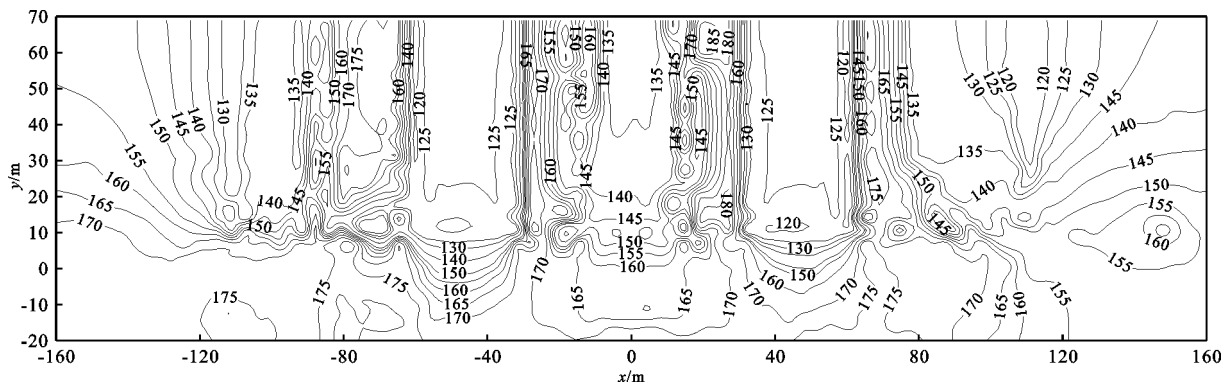


图 6 船闸基础地下水水位等值线分布(单位:m)

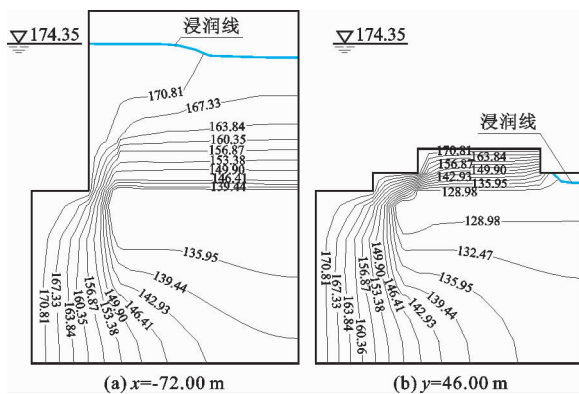


图 7 船闸段典型横断面水头等势线分布(单位:m)

6 结 论

本文针对某船闸枢纽混凝土闸体、基岩、防渗帷幕和排水孔幕的渗透参数开展了敏感性分析及渗透系数反演分析,主要结论如下:

(1)各分区材料渗透系数对船闸地下水水位的影响程度排序为: $k_{帷幕} > k_{基岩} > k_{孔幕} > k_{混凝土}$;帷幕、基岩和孔幕的渗透系数对船闸渗流场的影响较

图 6 为船闸基础地下水水位等值线分布图。由图 6 可知,船闸两岸岩体及闸前基岩水位趋向船闸方面逐渐下降,降幅均匀,两线闸墩处地下水水位等值线分布密集,浸润面变化剧烈,渗透坡降较大;两线船闸底板基岩的地下水水位约为 125 m,低于外围水位值。为进一步分析船闸渗流性态,绘制了库水位为 174.35 m 时水流方向典型剖面水头等势线分布图,如图 7 所示。由图 7 可知,船闸底板等部位混凝土结构等势线分布密集,走向趋近于水平,分布规律符合工程实际。综上可知,船闸地下水水位分布规律合理,采用反演得到的计算参数开展船闸三维渗流场模拟,其模拟结果可有效反映船闸混凝土结构、基岩及两岸岩体的渗流特性。

为显著,开展船闸各分区材料渗透系数反演分析时应重点关注影响程度较大的分区。

(2)采用可变容差法反演计算各分区材料的渗透系数时,应重点对帷幕和基岩的渗透系数进行反演,反演得到其渗透系数分别为 3.04×10^{-6} 和 5.51×10^{-6} cm/s。各典型测点地下水水位反演计算值与实测值的最大相对误差为 2.37%,反演结果合理,可作为该船闸枢纽渗流分析的计算参数。

(3)对船闸主要分区材料的渗透系数进行反演时,应结合敏感性分析筛选需重点反演的分区,以提高反演计算效率。本文的研究成果可为类似工程提供借鉴。

参考文献:

- [1] JANG Xianggang, ZHU Zhangyuan, CHEN Huayong, et al. Natural dam failure in slope failure mode triggered by seepage[J]. Geomatics Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 698-723.
- [2] 陈志恒,荣冠,谭尧升,等.白鹤滩大坝三维渗流场仿真与渗控效果评价[J].清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(7): 705-713+723.

- [3] 何良德,王晨晨,张成君,等. 船闸闸室灌泄水过程非稳定渗流特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):246-252.
- [4] 何良德,张成君,王晨晨,等. 考虑船闸闸室宽度影响的横向渗流阻力系数法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):146-152.
- [5] 侯晓萍,徐青,杨志明. 黄河山坪电站船闸地基渗控措施优化[J]. 武汉大学学报(工学版),2012,45(5):584-589.
- [6] BUKENYA P, MOYO P, BEUSHAUSEN H, et al. Health monitoring of concrete dams: A literature review[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2014, 4(4): 235-244.
- [7] 何吉,徐青,陈胜宏. 裂隙岩体渗透特性反演分析[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(S1):2730-2735.
- [8] GAN Lei, CHEN Guanyun, SHEN Zhenzhong. A new approach to permeability inversion of fractured rock masses and its engineering application[J]. Water, 2020, 12(3): 734.
- [9] 黄铭,陆迎寿,蓝祝光,等. 海堤非稳定渗流场渗透参数反演分析[J]. 上海交通大学学报,2016,50(3):443-447.
- [10] LI Changzheng, YANG Yong, WANG Rui, et al. Inversion of river-bottom sediment parameters using mechanically sampled specimens and subbottom profiling data[J]. Applied Geophysics, 2017, 14(2): 225-235.
- [11] 王学武,党发宁,蒋力,等. 深厚复杂覆盖层上高土石围堰三维渗透稳定性分析[J]. 水利学报,2010,41(9):1074-1078+1086.
- [12] 周青,王晓东,吴梦喜. 阿青水电站沥青心墙坝渗流分析与控制[J]. 岩土力学,2015,36(S2):469-477.
- [13] 周邻鹏,柴军瑞,雷艳. 黑河金盆水库坝区三维渗控效应评价与材料参数敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(1):207-215.
- [14] ZHANG Wenbing, SHEN Zhenzhong, CHEN Guanyun, et al. Optimization design and assessment of the effect of seepage control at reservoir sites under karst conditions: A case study in Anhui Province, China[J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29: 1831-1855.
- [15] 杨金孟,赵兰浩,沈振中,等. 某抽水蓄能电站上水库防渗帷幕深度优选研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(2):209-216.
- [16] 沈振中,江流,沈长松. 复合土工膜缺陷渗漏试验的饱和-非饱和渗流有限元模拟[J]. 水利学报,2009,40(9):1091-1095.
- [17] 张文兵,任杰,杨杰,等. 基于正交试验土石坝热-流耦合模型参数的敏感性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(1):147-154.
- [18] 李炎隆,张敬华,张再望,等. 基于正交试验法的高模量区E-B模型参数敏感性分析[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):34-38+45.
- [19] 沈振中. 三维粘弹塑性位移反分析的可变容差法[J]. 水利学报,1997,28(9):66-70.
- [20] XU Zengguang, LIU Yang, HUANG Jian, et al. Performance assessment of the complex seepage-control system at the Lu Dila Hydropower Station in China[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(3): 05019001.
- [21] 许增光,曹成,李康宏,等. 某抽水蓄能电站上水库局部防渗渗控分析[J]. 应用力学学报,2018,35(2):417-422+459.

(上接第148页)

- [17] WANG Ge, WANG Ni, XIU Yuan. Reasonable determination of the utilizable capacity of water conservancy project based on prediction[C]// The 5th International Conference on Water Resource and Environment, Macao. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 344: 012128.
- [18] 李顺新,杜辉. 动态规划-粒子群算法在水库优化调度中的应用[J]. 计算机应用,2010,30(6):1550-1551+1580.
- [19] SHI Yuhui, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer[C]// EGAN W, ALASKA A. The 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1998.
- [20] 张铭,李崇浩,范子武,等. 粒子群算法在梯级水库优化调度中的应用研究[J]. 水力发电,2010,36(12):60-64.
- [21] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
- [22] 贾小俊. 基于Tennant法的塔里木河河道基流生态需水量计算[J]. 水利科学与寒区工程,2021,4(3):49-53.
- [23] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers[J]. River Research and Applications, 2003, 19(5-6): 397-441.
- [24] 周华艳,周建中,何中政,等. 基于烟花量粒子群算法的水库群联合优化调度[J]. 水电能源科学,2018,36(10):84-87+38.
- [25] 丁根宏,曹文秀. 改进粒子群算法在水库优化调度中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(1):118-121.
- [26] 刘涵. 水库优化调度新方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2006.
- [27] 张忠波,何晓燕,耿思敏,等. 改进的粒子群算法在水库优化调度中应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2017,15(5):338-345.
- [28] 吴文惠. 乌江梯级水电站联合调度发电效益考核评价研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2016.