

基于敏感性分析的沥青心墙堆石坝 渗流观测布置及其改进分析

童广勤¹, 张海龙¹, 余成学², 王静云³, 汪昌港¹

(1. 中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心, 湖北 宜昌 443133;

2. 武汉大学 水资源与水电工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

3. 中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 为了给沥青混凝土心墙堆石坝渗流观测设施升级改造提供参考依据, 结合某已建沥青混凝土心墙堆石坝工程, 对现有观测设施进行分析, 并对渗流观测设施布置改进进行探讨。通过三维有限元渗流敏感性计算分析, 论证实测渗流量与计算渗流量存在很大差异与上游坝壳料、心墙等的渗透性变异与否相关; 分析现有渗流观测布置存在的不足。在此基础上, 针对上游坝壳材料和沥青混凝土心墙, 设计渗流观测布置改进方案, 并通过敏感性计算分析, 论证方案的可行性。该分析加深了对现有渗流观测设施监控功能的认识, 同时为改进现有渗流观测设施提供了理论参考, 也可为同类大坝渗流安全监控布置设计及安全管理提供参考。

关键词: 堆石坝; 渗透系数; 有限元; 敏感性; 沥青混凝土心墙

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)05—0099—06

Observation Scheme Arrangement and Improvement in Asphalt Concrete Core Rockfill Dam Based on Seepage Sensitivity Analysis

TONG Guangqin¹, ZHANG Hailong¹, SHE Chengxue², WANG Jingyun³, WANG Changgang¹

(1. China Three Gorges Corporation, Yichang, Hubei 443133, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management,

Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

3. Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China)

Abstract: With respect to an asphalt core wall rockfill dam project, the existing observation facilities are analyzed, and the improvement of the arrangement of seepage observation facilities is discussed, so as to provide reference for the upgrading of the observation facilities. Through the three-dimensional finite element seepage sensitivity calculation, it is proved that the great difference between the measured seepage flow and the calculation has nothing to do with the permeability variation of the upstream dam shell material and core wall. The shortcomings of the existing seepage observation arrangement are analyzed. On this basis, the seepage observation arrangement of the upstream dam shell and the asphalt concrete core wall is proposed, and the feasibility of the scheme is demonstrated through sensitivity calculation. The research deepens the understanding of the monitoring function of the existing seepage observation facilities, provides a theoretical reference for improving the existing seepage observation facilities, and also provides a reference for the layout design and safety management of the seepage safety monitoring of similar dams.

Keywords: rockfill dam; percolation coefficient; finite element method; sensibility; asphalt concrete core wall

我国修建了很多堆石坝,为了监控大坝安全,在坝体中埋设了大量的渗流观测设施。通过观测分析,往往会发现多个问题。有的大坝会发现实测渗流量与设计计算值相差甚远,其原因是否与大坝材料渗透性发生变异有关;上游坝壳材料在库水浸泡下渗透系数可能发生变化,心墙可能随裂缝的增加而渗透性发生变化,现有渗流观测设施能否反映这种变化,并能对坝壳料、心墙等的渗透性变化进行监控,以便掌握大坝的渗流安全状况;如果现有渗流观测设施不能够监控坝壳料、心墙的渗透性变化,则如何改进渗流观测布置以实现对其监控。这些问题与大坝渗流观测设计、完善及安全管理密切相关,迫切需要加以解决。

渗流敏感性计算,可以定量分析坝体、坝基材料渗透性变化与水位、渗流量等观测值之间的关系,是研究解决上述问题的一条有效途径。目前,敏感性计算分析方法在大坝渗流分析中应用较广,从应用情况看,可分为单因素分析法^[1-7]和多因素正交分析法^[8-12]。文献[13]结合某大坝渗流场分析,论证了单因素分析法与多因素正交分析法,所分析的材料渗流敏感性排序基本一致。

本文结合某沥青混凝土心墙堆石坝工程,通过单因素敏感性计算,分析其实测渗流量与计算渗流量差异的主要原因,论证现有观测设施监控上游坝壳料、心墙的渗透性变化的不足之处。进一步利用敏感性计算,针对上游坝壳料、沥青混凝土心墙,设计并分析渗流观测布置方案改进的可行性。

1 当前渗流观测布置的计算分析

1.1 工程基本情况

某水库工程大坝坝顶高程 185 m,最大坝高 104 m,大坝总长约 950.0 m,大坝及两岸防渗轴线总长约 1 800 m;大坝采用沥青混凝土心墙防渗,坝基及两岸山体采取了开挖清理、浇筑混凝土基座、混凝土防渗墙、固结灌浆及帷幕灌浆等工程措施,进行防渗处理,大坝典型剖面及防渗体系见图 1。

混凝土基座是沥青混凝土防渗心墙的基础,高度 10 m,上、下游宽 20 m,在其中布置有宽 2.0 m,高 2.5 m 的廊道,具体见图 2。

以大坝坝顶右端点为桩号起点,在 0+580、0+700 及 0+850 m 三个桩号位置,设置了 3 个渗流监测断面,布置了渗压计,以监测坝内水位状况;在大坝的下游坝趾位置,保留了施工围堰,在围堰与大坝之间形成一个集水塘,用于收集经由坝体、坝基及两岸山

体的渗流,通过量水堰,观测坝体、坝基的总渗流量。

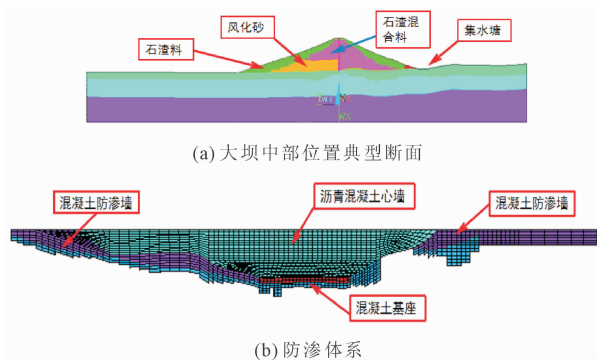


图 1 大坝典型断面及防渗设施

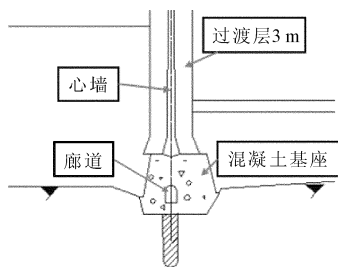


图 2 混凝土基座及廊道示意图

1.2 坝体坝基渗透系数敏感性计算分析

根据工程观测报告,水库蓄水至 175 m,大坝和坝基渗漏量约为 1 740.5 L/min,远小于设计计算渗流量 4 000 L/min。通过三维有限元敏感性计算分析,检查是否与上游坝壳料、心墙渗透性变异有关,以及分析现有渗流观测设施能否监控上游坝壳料、心墙等的渗透性变化。

(1) 有限元模型。围绕大坝、坝基及两岸山体,构建渗流计算有限元网格模型,见图 3,具体说明如下:

1) 渗流场计算模拟范围

左岸以排水箱涵为界,延伸至水库;右岸以下游侧的冲沟为界,在其端部向上游延伸,然后转折至水库;在上游区域,从坝踵起向库区延伸 1.5 倍坝高;下游则以溪沟为界;底部取至坝基以下 150 m。

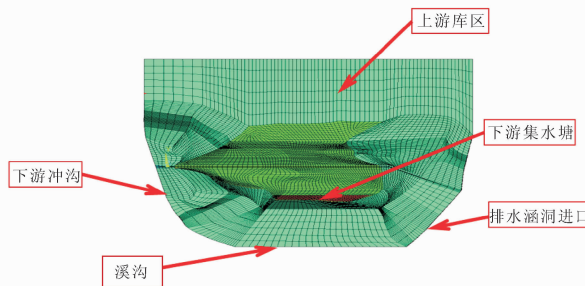


图 3 渗流有限元网格

2) 坝体、坝基及两岸山体各材料的模拟

在坝体中填筑了多种材料:沥青混凝土心墙、沥青混凝土心墙上下游两侧的过渡层、混凝土基座、石渣料、石渣混合料、风化砂等。在坝基及两岸中的材料有:混凝土防渗墙、灌浆帷幕、覆盖层以及全风化、强风化、弱风化及微风化岩层等。

3) 有限元网格及边界条件

有限元网格全部采用 8 节点等参单元,总单元数为 244 068,总节点数为 257 348。渗流边界条件为:在上游水库一侧的垂直边界,按不透水处理;库水淹没的库底、坝坡及山坡表面,均按等势面处理;在模型左右两侧,两岸山坡的竖直边界,按不透水边界处理;下游右岸侧的冲沟及下游溪沟,在冲沟或溪沟的上部出露边界,按渗流逸出边界处理,而在其下部的竖直边界,则按不透水边界考虑;在集水塘内处于水下的排水棱体表面、集水塘底面、两岸山坡面以及围堰上游侧表面等,按下游等势面处理;其余的下游山坡表面、大坝下游坝面以及集水塘下游原河谷所在位置的地表面,均按渗流逸出边界处理;模型底部边界按不透水边界处理。

(2) 渗流敏感性计算分析。根据设计报告,表 1 给出大坝及基础中各材料渗透系数取值,将其作为敏感性计算的基准值。

表 1 各材料渗透系数基准值					
编号	材料类别	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)	编号	材料类别	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)
1	沥青混凝土 防渗墙	1.0×10 ⁻⁷	7	风化砂	5.0×10 ⁻³
2	混凝土防渗墙	1.0×10 ⁻⁷	8	石渣混合料	5.0×10 ⁻³
3	混凝土基座	1.0×10 ⁻⁷	9	覆盖层及全、 强风化层	3.0×10 ⁻³
4	灌浆帷幕	2.0×10 ⁻⁵	10	弱风化层	1.1×10 ⁻⁴
5	过渡料	1.0×10 ⁻²	11	微风化层	4.8×10 ⁻⁵
6	石渣料	1.0×10 ⁻²			

将沥青混凝土防渗心墙、混凝土防渗墙、混凝土基座、灌浆帷幕、过渡层、石渣料、风化砂、石渣混合料、覆盖层及全强风化层材料、弱风化层、微风化层,共 11 种材料,以表 1 中的渗透系数值为基准,进行单因素敏感性计算分析。

按设计时采用的工况及上、下游水头,以表 1 渗透系数进行渗流场计算,得到进入下游集水塘的总渗流量约 4 292.0 L/min,与设计计算的渗流量 4 000.0 L/min 相当。考虑到计算流量远大于实测

流量,因此,在敏感性计算时,渗透系数向减小方向变化。根据渗透系数可能的最大变化范围,折减系数在 0~1 之间变化,一般可按一定间隔取值,本文具体取值为 0.05 和 0.1,分别以其逐个折减表 1 中渗透系数,进行渗流场计算。

按下式计算渗流流量差及水头差:

$$\Delta Q_j = |Q_j - Q_0| \tag{1}$$
$$\Delta H_{ij} = |H_{ij} - H_{0j}| \tag{2}$$

式中: Q_j 表示由第 j 个渗透系数折减后计算的汇入集水塘的渗流量; Q_0 为渗透系数基准值计算的汇入集水塘的渗流量,也即 4 292.0 L/min。 H_{ij} 表示由第 j 个渗透系数折减后计算的第 i 个测点的水头; H_{0j} 表示由表 1 渗透系数基准值计算的第 i 个测点的水头; ΔH_{ij} 为水头差。

对于渗流量,以下式计算渗流量变化百分率:

$$\eta_j = \Delta Q_j / Q_0 \times 100\% \tag{3}$$

利用式(1),计算各材料渗透系数在不同折减下计算的渗流量与 4 292 L/min 的流量差,列入表 2;以式(3)计算渗流量变化百分率,也列在同一表格中。在 0+580、0+700 及 0+850 观测断面中,选择距离沥青混凝土心墙最近的测点(其水头变化分别在各观测断面中最大),共三个测点,利用式(2),计算各材料渗透系数折减后计算的测点水头,与以基准渗透系数计算的测点水头相减,也列入表 2。

为减小计算工作量,将弱风化层、微风化层作为一个整体,同时进行渗透系数折减,计算结果在表中弱-微风化层一栏中列出。

从表中数据可以看到,混凝土防渗墙、混凝土基座、灌浆帷幕、过渡料、风化砂等材料,对应的渗流量差、水头差明显很小,且随折减系数增大,其流量值、测点水位变化值均不大,明显不敏感。

对于其余材料,诸如沥青混凝土、石渣料、石渣混合料、覆盖层及全-强风化层以及弱-微风化层,为更加直观显示其敏感性情况,将折减系数及对应的渗流量及水头变化值取出绘图,见图 4,其中对于水头变化,因规律大致类似,故以 0+850 观测断面的测点为代表绘图。

从图中可以明显看到:

1) 随渗透系数折减系数减小,渗透系数下降,渗流量、测点水头变化量都随着增加,但以弱-微风化层对应的变化量明显最大,覆盖层及全-强风化层的变化次之,其余材料与之相比,其数值相差甚远。

表 2 各材料渗透系数敏感性计算分析结果

材料类别	渗流量 /(L·min ⁻¹)		渗流量变化值 /(L·min ⁻¹)		0+580,0+700 及 0+850 测点水头差/m	
	折减系数 0.1	折减系数 0.05	折减系数 0.1	折减系数 0.05	折减系数 0.1	折减系数 0.05
沥青混凝土心墙	4214.8	4207.8	77.2 1.8%	84.2 2.0%	0.25,0.23,0.15	0.27,0.24,0.16
混凝土防渗墙	4279.1	4279.0	12.9 0.3%	13.0 0.3%	0.05,0.02,0.01	0.05,0.02,0.01
混凝土基座	4383.4	4383.3	8.6 0.2%	8.7 0.2%	0.03,0.01,0.01	0.03,0.01,0.01
灌浆帷幕	4383.3	4383.2	8.7 0.2%	8.8 0.2%	0.03,0.01,0.01	0.03,0.01,0.01
过渡料	4244.8	4239.6	47.2 1.1%	52.4 1.2%	0.11,0.09,0.10	0.12,0.10,0.12
石渣料	4205.0	4148.0	87.0 2.0%	144.0 3.3%	0.16,0.17,0.34	0.28,0.28,0.52
风化砂	4244.7	4197.4	47.3 1.1%	54.2 1.26%	0.11,0.10,0.18	0.12,0.11,0.19
石渣混合料	4176.0	4138.0	116.0 2.7%	154.0 3.6%	0.22,0.24,0.53	0.28,0.30,0.64
覆盖层及全、强风化层	3373.0	3113.0	919.0 21.4%	1179.0 27.5%	0.38,0.18,2.39	0.67,0.55,3.28
弱-微风化层	2005.0	1468.0	2287.0 53.3%	2824.0 65.8%	5.67,4.53,4.04	6.17,4.90,4.83

注:表中的百分比是以同框格中渗流量差值,根据式(3)计算的百分比。

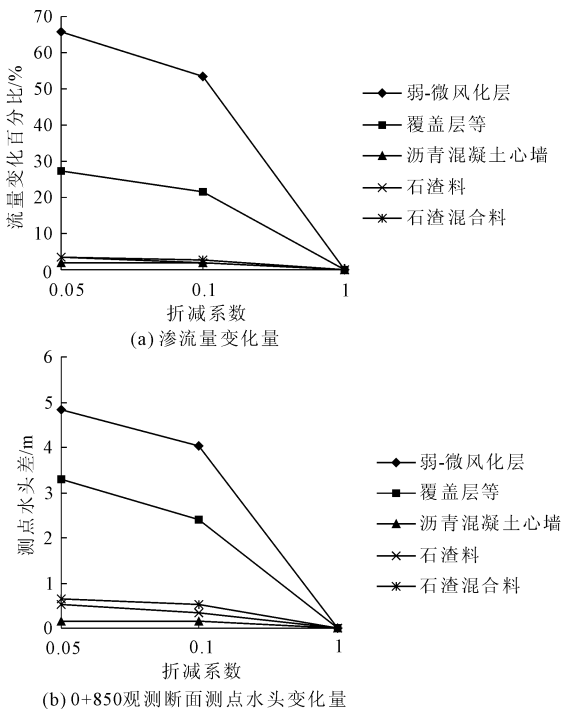


图 4 各材料不同折减系数下渗流量及测点水头变化值对比图

2) 从曲线的斜率变化情况看,随着折减系数减小,各材料对应的渗流量、水头差的变化率均逐渐降低,表现出类似的规律,但仍然是弱-微风化层、覆

盖层及全-强风化层的变化率相对较大。
从上述流量、测点水头变化量及变化率情况看,弱-微风化层、覆盖层及全-强风化层具有绝对的控制性影响,而其他材料与之差距甚远。显然,若进行渗透系数反演,则主要对这两种材料渗透系数反演。

1.3 渗透系数反演

为进一步了解覆盖层及全-强风化层、弱-微风化层的实际渗透系数,对两者渗透系数反演。选择库水位在较长时间范围内变化小,无降雨影响情况的库水位及渗流量观测值,用于反演。有两个数据可用:一是库水位 174.73 m,渗流量 1 502.6 L/min;二是库水位 155.43 m,渗流量 957.3 L/min。

采用神经网络-遗传算法进行反演计算,该法已有很多研究应用^[14-15],为大家所熟知,限于篇幅,反演具体过程不再详述。反演结果为:弱风化岩层的渗透系数 0.83×10^{-5} cm/s,微风化岩层的渗透系数 0.36×10^{-5} cm/s,覆盖层及全-强风化层的综合渗透系数 0.28×10^{-2} cm/s。以此渗透系数计算上游库水位 174.73 m 和 155.43 m 对应的渗流量,分别为 1 521.0 L/min 和 975.0 L/min。分别与实测流量对比,差值分别为 18.4 L/min 和 17.7 L/min,计算值和实测值很接近。

1.4 讨论分析

通过上述敏感性计算分析及反演计算,可以看到:

(1)实测渗流量与计算渗流量的差异,是由于覆盖层及全-强风化层、弱-微风化岩层,也即基础的渗透性差异导致的,与上游坝壳材料、防渗心墙的渗透性变化与否关系不大。

(2)现有的观测布置,无论从测点水头变化角度,还是从渗流量变化角度,对上游坝壳材料、防渗心墙的渗透性变化反应不敏感,也即现有的观测布置,无法监控上游坝壳堆石料、心墙等在大坝运行过程中的渗透性变化情况。

对于上游坝壳材料,特别是心墙,在运行过程中的渗透性变化,与大坝安全密切相关,是工程中非常关心的监控内容,因此,有必要寻找新的途径,完善大坝渗流观测布置,以便对其进行监控。

2 渗流观测布置改进及可行性分析

若要改进渗流观测设施的布置,则必须要使新的观测布置与上游坝体材料、心墙的渗流状况密切相关,从而使观测的渗流量或测点水头变化,随坝体材料、心墙的渗透性变化敏感。可以构想渗流观测完善布置方案,然后通过渗流敏感性计算,分析所构想的渗流观测完善布置方案的可行性,这样一条技术路径进行。

(1)上游坝壳料的渗流观测完善布置方案及可行性

在现场考察中,发现在混凝土基座廊道的施工接缝中有渗流渗出,随着上游水位变化而流量变化明显。该渗流量与上游坝壳材料渗透性密切相关,因此,能否利用该渗流量观测,监控上游坝壳材料渗透系数的变化,值得深入探讨。

由于接缝中的渗流量大小,与接缝进口位置,也即混凝土基座上游侧的水头有关,因此,对渗流量的考察,可以转化为对基座上游侧水头变化的考察,如果水头变化随坝壳料渗透系数变化敏感,则这种观测布置具有可行性。

如前所述,上游坝壳材料主要为石渣料、风化砂及石渣混合料。在运行过程中,由于堆石颗粒破碎等原因,孔隙减小,渗透性下降,因此,在敏感性计算时,其渗透性按下降考虑,将其渗透系数折减,进行敏感性计算。渗透系数折减系数分别取 0.8、0.1,分别代表堆石体渗透系数降低较小、较大两种情况。同前,采用单因素敏感性计算方法,分析石渣

料、风化砂及石渣混合料渗透系数变化对混凝土基座上游侧点水头的影响情况。在基座上游侧中间高度位置,设置三个观测点,桩号分别在 0+590、0+700 和 0+800 m,可用于考察这种敏感性及沿着廊道是否具有 consistency。

在不同折减系数情况下,各观测点水头变化情况见表 3 所示。其中,在敏感性计算时,覆盖层及全-强风化层、弱-微风化层的渗透系数,按前面反演计算得到的渗透系数值参与计算。

表 3 上游坝壳料渗透系数敏感性计算分析结果		
材料类别	0+590、0+700、0+800 桩号位置基座 上游侧点水头变化值/m	
	折减系数 0.8	折减系数 0.1
石渣料	0.47, 0.44, 0.86	0.85, 1.03, 2.01
风化砂	0.52, 0.46, 0.99	0.93, 1.24, 3.56
石渣混合料	0.49, 0.46, 0.95	1.03, 1.24, 3.07

从表 3 数据变化情况可以看到:
1) 三种材料随渗透系数折减系数减小,观测点水头差异均相应增加,数值变化比较大,因此,可以确定,测点水头变化随渗透系数的变化是敏感的。

2) 在廊道中,不同位置测点的水头变化尽管有差异,都具有相同的变化规律,因此,测点布置在廊道中不同位置,都是可行的。

(2) 沥青混凝土心墙渗流观测布置改进方案及可行性

对于沥青混凝土心墙,则考虑在其下游侧过渡层内布设测压管,使测压管与心墙比较靠近。其中下游过渡层位置参见图 2。

在运行过程中,沥青混凝土心墙往往因开裂而使其渗透系数增加,因此,敏感性计算时,渗透系数向大的方向变化。设定其渗透系数放大系数 1.05 和 1.5,分别代表其渗透系数放大较小、较大两种情况。同样,分别在桩号 0+590、0+680 和 0+780 m 位置,设置三个观测点。敏感性计算结果见表 4。

表 4 沥青混凝土心墙渗透系数敏感性计算分析结果		
材料类别	0+590、0+680、0+780 桩号位置 侧点水头变化值/m	
	放大系数 1.05	放大系数 1.5
心墙	0.472, 0.364, 0.960	0.772, 0.613, 1.337

从表 4 可以看到:
(1) 随心墙渗透系数放大倍数增加,观测点水头差均相应增加,数值变化比较大,且变化率也比较大,因此,可以确定,测点水头变化随渗透系数的变

化是敏感的。

(2) 不同位置测点的水头变化尽管有差异,也即敏感性有差异,但敏感性都比较强,反映了从桩号 0+590 至 0+780 桩号水头变化敏感性变化状态。在实际工程中,可根据具体布置需要,在此桩号范围内的下游过渡层中布置测压管。

3 结 论

通过上述计算分析,得到如下结论:

(1) 渗流实测流量远小于设计计算流量,这种差异与上游坝壳料、心墙的渗透性是否发生变化没有关系,而与基础的渗透性差异密切相关。

(2) 现有渗流观测布置,不能有效反映上游坝壳料、沥青混凝土心墙的渗透性变化,因而无法以观测数据对其变化进行有效监控。

(3) 为实现监控上游坝壳料、心墙的渗透性变化情况,需要改进现有渗流观测布置。在混凝土基座廊道中布置渗流量观测,以及在心墙紧邻下游侧过渡层内布置测压管,对于其渗透系数变化进行监控,理论上可行。

(4) 对于沥青或沥青混凝土心墙堆石坝,若基础渗透性相对较强,则常规的渗流监测布置,往往难于监控上游坝壳料、心墙的渗透性变化情况,而需要探索特殊的渗流观测布置,才能够对其变化进行监控。

参考文献:

- [1] 周邠鹏,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.
- [2] 汪伟伟,丁祖德,任志华,等. 库区碎石土边坡稳定性及其参数敏感性分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2021,38(1):71-78.
- [3] 王睿星,王瑞骏,赵 叶. 深覆盖层上高土石围堰渗流场的敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28

(6):215-218.

- [4] 张顷顷,王来贵,张华宾,等. 台阶边坡非饱和渗流随机场及参数敏感性分析[J]. 安全与环境学报,2022,22(2):665-672.
- [5] 邓 伟,师文豪,王 源,等. 基坑坑底隔渗体局部缺陷下渗流量计算及敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(3):193-200.
- [6] 魏 海,杨升友,张国辉,等. 天然地应力作用下不同产状岩体裂隙渗流特性研究[J]. 水文地质工程地质,2023,50(2):54-62.
- [7] 周先祥,徐 良. 水电站地下厂房渗控效应的敏感性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2017,40(11):1543-1546.
- [8] 王亮明,张 录,谢利云,等. 横山岭水库黏土斜心墙土石坝渗透参数敏感性分析[J]. 水利科技与经济,2018,24(7):31-36.
- [9] 金洪杰,甘 磊,沈振中,等. 某船闸枢纽主要分区渗透参数敏感性反演分析[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(3):149-155.
- [10] 郝 忠,周 峰,付 操,等. 基于正交实验的库水位骤降边坡渗透稳定敏感性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2019,41(5):29-35.
- [11] 姜宇航,戴妙林,刘晓青,等. 某土工膜堆石坝帷幕后水位偏高成因初步分析[J]. 人民黄河,2020,42(7):95-99.
- [12] 张亚琦,彭文庆. 非等压偏应力下多因素对煤体渗透率影响的敏感性分析[J]. 煤矿安全,2020,51(9):16-19.
- [13] 冯亚新,王润英,孙 丹,等. 深厚覆盖层上面板堆石坝渗流敏感性分析[J]. 中国农村水利水电,2023(3):191-198.
- [14] 唐少龙,熊 威,万小强,等. 基于 GA-BP 的大坝渗透系数多目标反演分析方法[J]. 中国农村水利水电,2020(9):213-216.
- [15] 高培培,章 光,胡少华,等. 基于 GA-BP 的渗透系数多目标反演分析模型研究[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(8):12-18.