

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230707

# 多断层影响下某水库三维渗流数值模拟分析

俞扬峰<sup>1</sup>, 于家傲<sup>2</sup>, 叶伟<sup>1,3</sup>, 李子阳<sup>1,3</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;  
3. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 某水库库区及坝址地质条件复杂, 存在多条贯穿性断层, 为分析库区渗漏及坝体渗流情况, 采用有限元法对大坝及库区开展三维渗流场数值模拟, 针对实际运行工况进行参数反演, 并根据大坝水头分布、渗流量计算结果对大坝防渗安全性进行分析评价。结果表明, 库区断层渗透系数的变化对左岸及坝体段渗流量的影响最明显, 左岸绕渗较为严重; 大坝坝体浸润线较高, 上游防渗面板裂缝造成高水位坝体出现射流, 廊道内积水较多, 大坝综合防渗排水体系设施不完善。坝址区全断面渗流量过大, 尤其以左岸单薄分水岭渗漏较为严重, 大坝存在严重的坝基渗漏与绕坝渗流问题, 应予以处理。

**关键词:** 断层影响; 库区渗漏; 三维渗流; 有限元法; 混凝土坝

**中图分类号:** TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)10-0086-05

## 1 工程概况

某水库位于黄河一级支流蟒河上, 大坝为碾压混凝土重力坝, 最大坝高 77.60 m, 上游坝踵处设置基础灌浆兼排水廊道, 廊道尺寸为 3.0 m × 3.5 m(宽 × 高)。大坝坝基与坝肩由于断层和张裂隙较发育, 岩体完整性差, 渗漏问题严重, 库区主要存在 3 条大断层, 其中 F18 断层自库区右岸穿坝基至下游。根据地质勘探及计算分析, 坝址区(含单薄分水岭)渗漏总量为  $7.3773 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 。大坝原设计在坝体上下游水位以下坝面均采用富胶凝二级配碾压混凝土防渗, 混凝土厚度为 2.00~8.70 m, 坝基采用帷幕灌浆防渗措施。由于蟒河天然来水量偏少, 渗漏量较大, 水库渗漏对供水影响较大, 后续增设左、右岸边坡防渗处理及帷幕灌浆防渗等。由于水库库区地质条件复杂, 经过 3 年的蓄水运行及观测, 仍存在严重的水库渗漏问题, 灌浆廊道常年被水淹没, 且高水位时廊道内存在射水现象。因此, 对其进行库区渗漏及坝体渗流情况分析迫在眉睫。在渗流场计算分析时, 首先需要确定坝体和基础材料的渗透系数。由于大

坝运行多年, 可能经过一些加固处理, 导致材料实际渗透系数与设计时相比存在较大差异<sup>[1]</sup>, 因此准确选取渗透系数参数是大坝渗流场分析中的首要问题<sup>[2-4]</sup>。传统方法是采用注水试验测得单位吸水率计算渗透系数, 其缺点是数据离散工艺复杂、费用高。随着反演方法的日臻完善<sup>[5-6]</sup>, 利用大坝渗流观测数据通过数值方法识别材料的渗透系数已具备条件<sup>[7-9]</sup>。与坝体材料渗透系数反演类似, 库区断层渗透系数同样也可通过反演方法获得, 但渗流参数的反演过程一般需要建立在长序列监测数据的基础上, 对于无监测资料或监测数据异常的工程, 参数反演需结合工程运行实际情况, 把握工程运行特征开展参数反演工作, 随后根据大坝渗透系数的识别结果, 利用有限元方法计算大坝的渗流场, 进一步分析大坝的渗流状态和影响大坝渗流场的主要因素, 旨在为大坝的防渗加固设计和坝体抗滑稳定性分析提供参考。

## 2 有限元计算模型及计算条件

### 2.1 计算模型

构建三维有限元模型计算坐标系, 原点取坝

**收稿日期:** 2023-05-04, **修回日期:** 2023-06-05

**基金项目:** 国家自然科学基金黄河水科学研究联合基金项目(U2243244); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y721008)

**作者简介:** 俞扬峰(1989-), 男, 工程师, 研究方向为大坝安全运行与管理, E-mail: yfyu@nhri.cn

**通讯作者:** 叶伟(1992-), 男, 博士、高级工程师, 研究方向为水工建筑物健康诊断, E-mail: 1079053235@qq.com

轴线与桩号 0+067.0 断面的交点处; $x$  方向为垂直坝轴线方向,以指向上游为正;在混凝土重力坝和坝址区内, $y$  方向为顺坝轴线方向,以指向右岸为正; $z$  轴垂直向上,以高程为坐标,最深取到高程 80.0 m 处。根据工程地质和水文地质情况,将坝址区岩体按水文地质条件分区,对水库工程坝址区岩体按不同岩性和渗透系数分层,分为弱风化、强风化层和微新鲜岩体。计算区域内主要考虑的断层见表 1。偏于安全考虑断层的延伸深度,假定为从地表直至无限深,即贯穿计算模型。

表 1 计算区域内主要断层

Tab. 1 Main faults in the calculation area

分布位置	断层编号	宽度 /m	出露长度 /m	断距 /m	断层性质
左岸与坝体段	F18	0.3~0.8	430	5~13	正断层
	F19	0.1~0.5			
中间段	F49	1.0~1.1	623	1~9	正断层
	F16	0.05~0.3	483	8~15	
右岸段	F4	0.4~0.5		5~15	正断层
	F50	0.3~0.6	295	6~10	

根据表 1 中断层构造信息,对三维有限元模型进行对应网格剖分。将研究区的主要断层分别作为一定宽度的条带进行剖分,即在断层带中心线两边设置节点,使断层位于两排节点所决定的均衡区内,将其作为单独水文地质参数分区。采用“控制断面超单元有限元网格自动剖分法”进行有限元网格剖分,生成有限元法计算信息。主要流程为分析计算区域内各种地质结构和建筑结构,建立典型的控制断面;利用这些控制断面构成超单元;根据分析要求,控制网格的精细程度;用自编网格自动剖分程序对超单元进行加密剖分;最终生成有限元网格。在建成的三维有限元网格中选取 22 个控制断面,各控制断面见图 1,相关断层渗流情况根据对应控制断面进行分析。

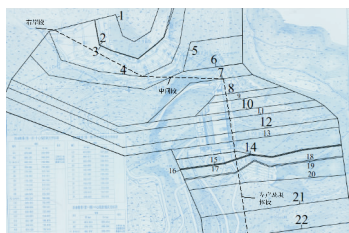


图 1 三维有限元网格控制断面

Fig. 1 3D finite element mesh control section

在综合分析计算区域内的地形、岩层等特征的基础上形成三维超单元网格。计算模型生成的有限元网格节点总数为 166 553 个,单元总数为 166 168 个。计算模型三维有限元网格及主要结构有限元网格见图 2。

2.2 模型边界条件

计算模型的边界类型包括已知上下游水头边

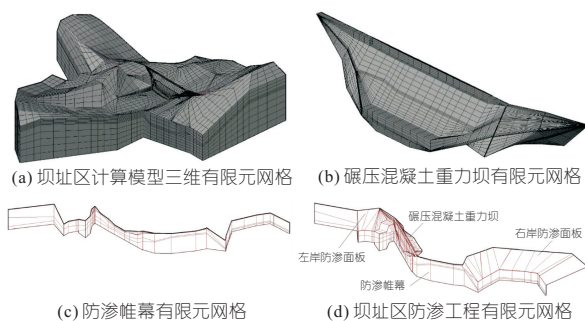


图 2 计算模型三维有限元网格及主要结构有限元网格图

Fig. 2 Calculation model 3D finite element mesh and main structural finite element mesh diagram

界、出渗边界和不透水边界三种:①已知水头边界包括水库蓄水位及下游河道水位以下的重力坝上游面、库岸山坡面及下游河岸、河床表面边界,以及给定地下水位的地下分水岭、截断边界;②出渗边界包括水库蓄水位以上的重力坝上游面、库岸山坡面,下游河道水位以上的两岸山坡面,所有与大气接触的边界,以及地下水位以上的截断边界;③不透水边界包括模型底面及模型四周(上下游及两侧)截断边界,除已知地下水位以外的部分边界。模型四周截断边界的类型需根据计算的地下水位与原地下水位比较确定,可以为不透水边界,也可以为给定地下水位边界。

3 计算参数反演

3.1 反演分析工况

反演分析所需的分区渗透系数初始值主要根据工程设计资料选取。根据工程实际经历的运行工况,渗流场反演分析共考虑 2 种计算工况,具体见表 2。这 2 种工况分别按稳定渗流和非稳定渗流考虑。计算时以工况 GK1 为反演工况,用以确定计算参数和模型边界条件;以工况 GK2 为验证工况,模拟水库水位降落过程,用以验算反演分析所需计算参数和边界条件是否符合实际情况,即计算模拟的水库水位降落过程是否与实际降落过程吻合。

表 2 反演分析计算工况

Tab. 2 Inversion analysis and calculation of working conditions

工况	渗流状态	计算工况说明
GK1	稳定渗流	上游水位 281.23 m 的稳定渗流场,下游水位为河床面高程 230.0 m
GK2	非稳定渗流	上游水位自 309.05 m 下降至 296.77 m (2016 年 7 月 29 日~8 月 29 日数据)

3.2 工况反演分析结果

3.2.1 GK1 工况

根据 GK1 的水力条件,经三维有限元反演分

析计算,确定各材料分区的渗透系数见表3。

表3 反演分析确定的坝址区各分区材料渗透系数

Tab.3 Permeability coefficient of materials in various zones of the dam site area

材料名称	计算值	材料名称	计算值
	$/(m \cdot s^{-1})$		$/(m \cdot s^{-1})$
碾压混凝土(表层)	$9.10 \times 10^{-8}$	断层及裂缝	$6.00 \times 10^{-3}$
碾压混凝土(内部)	$3.60 \times 10^{-7}$	强风化岩层	$1.16 \times 10^{-3}$
变态混凝土	$4.70 \times 10^{-8}$	弱风化岩层	$1.74 \times 10^{-5}$
面板混凝土	$2.70 \times 10^{-9}$	微新岩层	$8.10 \times 10^{-7}$
帷幕灌浆	$2.50 \times 10^{-7}$		

从反演分析计算结果看,GK1 工况下坝体浸润线从底层灌浆廊道与上层交通廊道之间通过,灌浆廊道完全被淹没,廊道部分坝体水位约为 250 m。这与现场勘察所得的坝体渗流状况(GK1 工况的已知条件)相吻合。此外,计算坝体和坝基范围的渗流量,约为  $1.44 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据资料,水库坝址区 8、9 月份天然来水流量约为  $1.49 \text{ m}^3/\text{s}$ ;另一方面,水库坝址区年平均天然来水流量约为  $0.46 \text{ m}^3/\text{s}$ ,而 GK1 工况渗流稳定情况下全断面渗流量约为  $0.46 \text{ m}^3/\text{s}$ 。可见,计算时段内坝体和坝基范围的渗流量与天然来水量大致相当,达到渗流稳定后渗流总量也与年平均天然来水流量相当,故水库渗漏量基本符合实际情况。

### 3.2.2 GK2 工况

GK2 工况的水力条件描述了水库由高水位降落的全过程。为方便计算,将坝址区全断面渗流量的计算断面划分为左岸及坝体段、中间段和右岸段,具体分区见图 1,其中虚线代表渗流量计算断面,分区以转折点为界。根据 GK2 工况所述库水位变化过程,将库水位降落过程划分为 10 个时段,模拟坝址区非稳定渗流场。经过坝址区岩体和各种渗透系数组合与调整,以及非稳定渗流场大量模拟计算,得到各时段库水位和渗流量见表 4;水库库容和水位随时间的变化曲线见图 3。

表4 库水位降落过程中各时刻渗流量

Tab.4 Leakage rate at various times during the process of reservoir water level decline

时刻 $t/d$	上游 水位/m	分区渗流量 $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$			总渗流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	
		左岸及坝体段		中间 段		
		坝体内部	坝基与左岸			
0	309.05	0.09	1.20	0.11	0.85	2.25
3	307.36	0.08	1.05	0.10	0.75	1.97
6	305.84	0.07	0.94	0.09	0.67	1.76
9	304.30	0.06	0.83	0.08	0.59	1.56
12	303.04	0.06	0.74	0.07	0.53	1.39
15	301.87	0.05	0.67	0.06	0.47	1.25
18	300.64	0.05	0.61	0.06	0.43	1.14
21	299.53	0.04	0.55	0.05	0.39	1.03
24	298.49	0.04	0.50	0.05	0.36	0.94
27	297.52	0.03	0.46	0.04	0.33	0.87
30	296.61	0.03	0.45	0.04	0.32	0.84

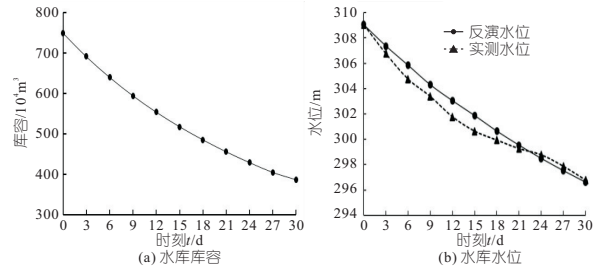


图3 30 d内水库库容和水位变化

Fig.3 Change of reservoir capacity and water level within 30 days

由计算结果可看出,30 d内水库库容由  $7.4918 \times 10^6 \text{ m}^3$  降至  $3.8668 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,初始渗流量约为  $2.25 \text{ m}^3/\text{s}$ ,而后随时间逐渐减小,在 21 d 后约为  $1.03 \text{ m}^3/\text{s}$ ,故库容减小的速度亦随时间的增加逐渐放缓;相应库水位将从 309.05 m 降至 296.61 m。而库水位降落的情况是在 30 d 内由 309.05 m 降低至 296.77 m 后基本保持稳定,可见水位的反演结果与实测数据基本吻合,故认为计算结果较符合实际,较为准确。

## 4 坝址区渗流计算与分析

### 4.1 坝址区渗流计算

渗流计算工况为 3 个工况(表 5),水力条件均为稳定渗流。各工况下,计算域地下水水位等值线图、部分典型剖面渗流位势分布见图 4、5。

表5 水库渗流安全评价计算工况

Tab.5 Reservoir seepage calculation conditions

工况	特征水位	工况说明
GK3	正常蓄水位	上游水位 313.00 m、下游水位 230.00 m 的稳定渗流场
GK4	设计洪水位	上游水位 315.16 m、下游水位 230.00 m 的稳定渗流场
GK5	校核洪水位	上游水位 317.45 m、下游水位 230.00 m 的稳定渗流场

### 4.2 断层影响分析

根据现场勘察数据,水库上游水位 281.23 m,廊道内水位约 250.00 m,廊道部位坝体浸水饱和高程约 275.00 m。由坝址区渗流场分析结果,在 3 种不同上游水位的工况下,坝体溢流坝段和非溢流坝段廊道部位的浸润线较高,与廊道部位坝体饱和和高程、坝基灌浆廊道积水淹没的实际情况吻合,在上游防渗面板防渗效果较差、坝体排水系统失效或排水能力不足的情况下,导致坝体内帷幕灌浆廊道积水较深。

根据计算结果,判别断层渗透性对渗漏量的影响,选取右岸段、中间段、左岸及坝体段进行对

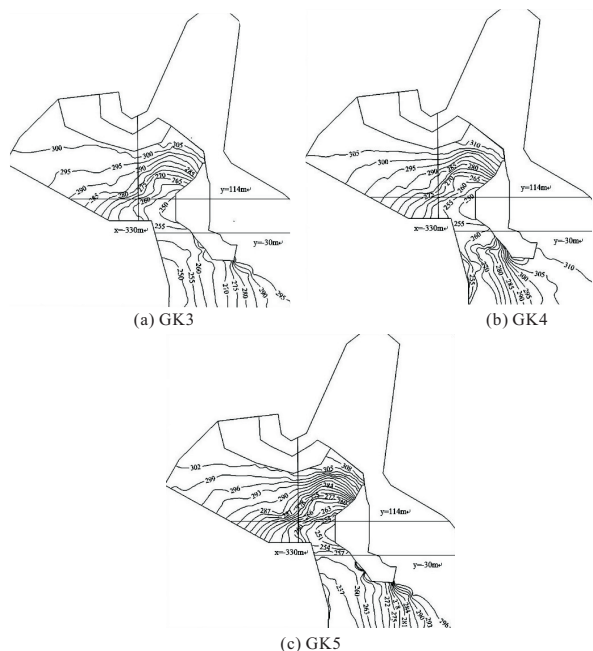


图 4 各工况下计算域地下水位等值线图

Fig. 4 Contour map of groundwater level in the calculation domain under various working conditions

比分析,选取 3 种不同渗透系数值,以分析其敏感性。渗流量计算结果见表 6、图 6。根据模型划分,右岸段有宽度 0.4~0.5 m 的 F4 断层,中间段为宽度 0.05~0.3 m 的 F16 断层,坝体段为宽度 0.3~0.8 m 的 F18 和宽度 0.1~0.5 m 的 F19 断层,左岸段为宽度 1.0~1.1 m 的 F49 断层,从参数上看,断层宽度越大对应的渗漏量越大。将断层处渗漏量单独进行分析,在 GK3 工况下,F4 断层渗漏量为 0.82 m<sup>3</sup>/s,右岸段超 1/2 的渗漏由该断层造成;F16 断层渗漏量为 0.12 m<sup>3</sup>/s,由于该区域上游设有防渗面板,断层造成的渗漏占中间段总渗漏量的 54.5%;F18 断层渗漏量为 0.15 m<sup>3</sup>/s,占总渗漏量的 5.4%,F19 断层渗漏量为 0.08 m<sup>3</sup>/s,占总渗漏量的 2.9%,F49 断层渗漏量为 1.93 m<sup>3</sup>/s,占总渗漏量的 69.1%,断层总渗漏量占比 74.5%,综合看来,断层渗漏量占总渗漏量的 68.0%,可见断层渗漏对坝址区总体渗漏影响巨大。

根据敏感性分析结果,断层渗透系数的变化对左岸及坝体段渗流量的影响最为明显,对中间段和右岸段渗流量影响较小,两岸存在绕渗现象,其中左岸绕渗较为严重。坝址区全断面渗流量过大,正常蓄水位情况下渗漏量约为 3.93 m<sup>3</sup>/s,其中左岸段占 57.3%,中间段占 4.8%,右岸段占 37.9%;坝体渗漏量较大,但渗漏量占比不大,两岸单薄分水岭渗漏较为严重。在正常蓄水位情况下,计算域内总渗流量不应大于天然来水径流量

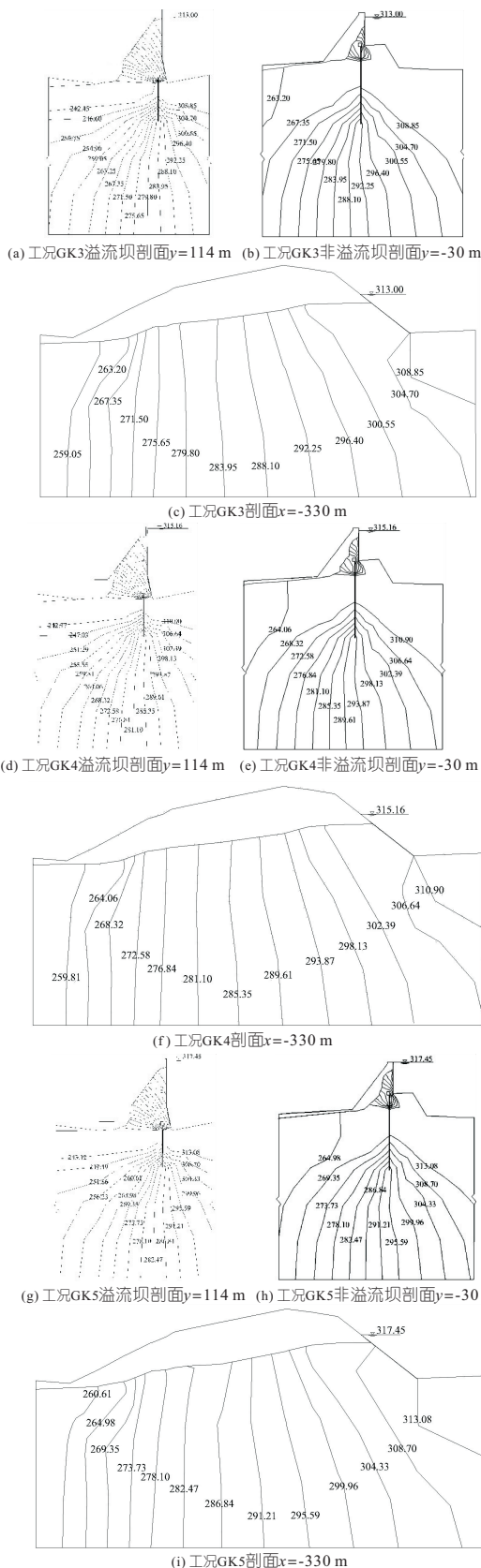


图 5 工况 GK3、GK4、GK5 计算结果

Fig. 5 Calculation results of working condition GK3, GK4 and GK5

的 5%。水库在上游水位稳定在 281.23 m 的条件下,总渗流量为 0.49 m<sup>3</sup>/s,与多年平均天然来水径流量较为接近;在正常蓄水位的稳定渗流情

表 6 GK3 工况坝址区各部位的渗流量

Tab. 6 Leakage amount of various parts of the dam site area under condition GK3

断层渗透系数 $/(m \cdot s^{-1})$	渗流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$			总渗流量
	左岸及坝体段	中间段	右岸段	
$6.50 \times 10^{-3}$	2.79	0.22	1.55	4.56
$6.00 \times 10^{-3}$	2.25	0.19	1.49	3.93
$5.50 \times 10^{-3}$	1.83	0.18	1.40	3.41

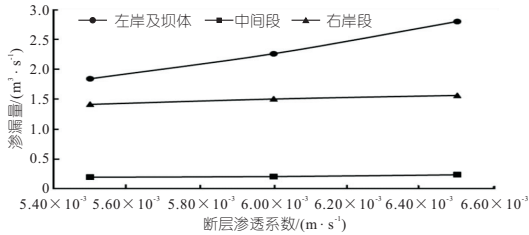


图 6 断层渗透系数对坝址区各部位渗流量的影响

Fig. 6 Influence of fault permeability coefficient on the seepage flow rate of various parts of the dam site area

况下,总渗流量为  $3.93 m^3/s$ ,大于天然来水径流量,因此水库总渗流量过大,造成水库常年水位较低。

### 5 结论

a. 根据水库工程地质和水文地质资料,采用正常运行工况与水库遭遇的特殊工况进行参数反演分析对比验证,数值模拟的渗流过程与实际情况较为近似,两种工况的验证结果均表明材料渗透系数反演值较准确,为后续坝址区断层渗漏影响分析奠定了基础。

b. 通过三维渗流计算分析明确了坝址区全断面渗流量过大,坝内浸润线较高,积水较多,大坝综合防渗排水体系设施不完善,上游迎水面防渗面板防渗性能较差,坝体渗漏量较大,但渗漏量占比不大,两岸单薄分水岭渗漏较为严重,计算渗漏量大于天然来水径流量,造成水库常年水位较低,

大坝及库区存在严重渗漏问题。

c. 右岸段、中间段、坝体段及左岸段断层渗漏占比依次为 53.0%、54.5%、74.5%,断层总渗流量占 68.0%,断层渗漏是造成区域渗漏的主要原因,大坝及左右岸的防渗措施对库区整体渗漏效果甚微。根据敏感性分析结果,断层渗透系数的变化对左岸及坝体段渗流量的影响最为明显,进一步反映断层对左岸及坝体段渗流影响巨大。

### 参考文献:

[1] 李守巨,刘迎曦,李政国,等. 丰满混凝土重力坝渗流特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4):477-480.

[2] 李皓璇,沈振中,张文兵. 基于 PSO-GRNN 的混凝土面板堆石坝渗透系数反演方法及应用[J]. 水电能源科学, 2023, 41(5):67-70,80.

[3] 徐丽,沈振中. 基于 ELM-GA 的复杂土石坝渗透系数反演模型及其应用[J]. 水电能源科学, 2021, 39(9):86-90.

[4] 沈宇扬,沈振中,李佳杰,等. 基于思维进化算法优化 BP 神经网络的渗透参数反演研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(2):102-105,121.

[5] 闵江涛,杨杰,马晨原. 基于改进 GA-BP 网络算法的边坡力学参数反演分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(11):152-155.

[6] MIKO SHOJI. Two-dimensional consolidation back-analysis[J]. Soils and foundations,1990,30(2):60-78.

[7] 余红玲,王晓玲,王成,等. 贝叶斯框架下大坝渗流参数反演组合代理模型研究[J]. 水利学报,2022,53(3):306-315,324.

[8] 张升,兰鹏,苏晶晶,等. 基于 PINNs 算法的地下水渗流模型求解及参数反演[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(2):376-383.

[9] 何一洋,黄耀英,费大伟,等. 王甫洲水利工程复合土工膜渗透系数时变特性反演分析[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(8):112-120.

## Numerical Simulation and Analysis of Three-dimensional Seepage in a Reservoir Under Influence of Multiple Faults

YU Yang-feng<sup>1</sup>, YU Jia-ao<sup>2</sup>, YE Wei<sup>1,3</sup>, LI Zi-yang<sup>1,3</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The geological conditions of a certain reservoir area and dam site are complex, with multiple penetrating faults. In order to analyze the seepage situation in the reservoir area and the dam body, the finite element method was used to conduct three-dimensional numerical simulation of the seepage field in the dam and reservoir area. Based on the actual operating conditions, parameter inversion was conducted, and the anti-seepage safety of the dam was analyzed and evaluated based on the distribution of water head and the calculation results of seepage flow. The results indicate that the change of permeability coefficient of faults in the reservoir area has the most significant impact on the seepage flow rate of the left bank and dam section, and the left bank seepage is more severe. The seepage line of the dam body is relatively high, and there are cracks in the upstream anti-seepage panel, causing jet flow in the high water level dam body. There is a lot of accumulated water in the corridor, and the comprehensive anti-seepage and drainage system facilities of the dam are not perfect. The overall seepage flow in the dam site area is too large, especially in the thin watershed on the left bank, where leakage is more severe. There are serious problems with dam foundation leakage and seepage around the dam, and it should be treated.

**Key words:** fault influence; reservoir leakage; three-dimensional seepage; finite element method; concrete dam