

文章编号:1673-9469(2020)02-0065-11

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.02.011

# 基于数值模拟及反分析研究施工因素对渗流特性的影响

曾乾坤<sup>1,2</sup>, 林日东<sup>2</sup>, 倪小东<sup>1,2\*</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 福建省水利水电科学研究院, 福建 福州 350000)

**摘要:** 通过现场调研大量病险水库大坝防渗加固案例, 结合文献介绍, 归纳总结了勘察设计及施工阶段可能影响防渗墙防渗效果的诸多因素, 并对其可能导致的不良效果进行合理归并分类。基于上述分类, 建立简化物理模型, 采用 Geostudio 中 seep/w 模块开展渗流模拟, 评估土石坝防渗墙加固后的防渗效果。最终以某水库防渗加固的效果为例, 针对存在质量缺陷、防渗结构形式差异、水位变动引起非稳定渗流等工况进行分析, 通过出逸点水力坡降、渗流量等要素评估各工况因素对防渗效果的影响程度, 结合浸润线形态开展防渗体防渗效果不良原因初判, 并对稳态下不同库水位水平及库水位变动工况进行数值模拟, 比较分析其浸润线形态差异, 结果显示贯穿缺陷严重削弱了防渗墙防渗效果, 不同库水位骤升骤降速率下的浸润线变化与稳态库水位相比在上游出现了“延缓上升”与“延缓下降”现象, 通过以上研究为病险水库防渗加固整治提供参考。

**关键词:** 防渗墙; 施工因素; 数值模拟; 浸润线; 非稳定渗流; 反分析

**中图分类号:** TU45

**文献标识码:** A

## Study on the Influence of Construction Factors on Seepage Characteristics Based on Numerical Simulation and Back Analysis

ZENG Qiankun<sup>1,2</sup>, LIN Ridong<sup>2</sup>, NI Xiaodong<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Fujian Institute of Water Resources and Hydropower Research, Fuzhou, Fujian 350000, China)

**Abstract:** Based on the field investigation of a large number of cases of seepage control and reinforcement of dangerous reservoir dams, combined with the introduction of literature, this paper sums up many factors that may affect the seepage control effect of the seepage control wall in the stage of survey, design and construction, and reasonably classifies the possible adverse effects. Based on the above classification, a simplified physical model was established, and seep / W module in GeoStudio was used to carry out seepage simulation, so as to evaluate the seepage control effect after the anti-seepage wall of earth rock dam was strengthened. Finally, taking the effect of seepage control and reinforcement of a reservoir as an example, the paper analyzed the existing quality defects, the difference of seepage control structure form, unstable seepage caused by water level change and other working conditions, evaluated the influence degree of each working condition factor on seepage control effect through the hydraulic gradient at the escape point, seepage flow and other factors, and carried out the preliminary judgment of the adverse causes of seepage control effect of seepage control body combining with the shape of seepage line, and does not. The numerical simulation was carried out under the same reservoir water level and reservoir water level fluctuation conditions, and the difference of the phreatic line shape was compared and analyzed. The results show that the penetration defects seriously weaken the seepage control effect of the anti-seepage wall. Compared with the steady-state reservoir water level, the change of phreatic line

收稿日期: 2019-12-30

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1502602); 国家自然科学基金资助项目(面上)(51779083)

作者简介: 曾乾坤(1995-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 从事堤坝渗流研究。

\* 通讯作者: 倪小东(1981-), 男, 江苏靖江人, 博士, 副研究员, 从事岩土工程渗流理论的教学与研究工作。

under the different rate of sudden rise and fall of reservoir water level shows the phenomenon of “delayed rise” and “delayed fall” in the upstream. Through the above research, the seepage control of the dangerous reservoir is realized. It can provide reference for reinforcement and renovation.

**Key words:** impervious wall; construction factors; numerical simulation; phreatic line; unsteady seepage; back analysis

防渗墙因其防渗效果明显、质量可靠、经久耐用,在病险水库除险加固工程中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。防渗墙位于坝体内或夹于深厚覆盖层,为隐蔽工程,且多为水下浇筑,施工质量受施工工艺、施工场地、人员设备诸多因素影响<sup>[2]</sup>,防渗墙体极有可能存在质量缺陷,从而大大削弱防渗效果,对堤坝安全运行产生危害<sup>[3]</sup>。目前,国内二十世纪中叶建设的中小型水库相当部分存在渗漏问题,相当部分水库土坝通过施作防渗墙进行防渗加固。当前针对完成防渗加固的水库土坝开展其防渗效果评价研究较少见于文献。通过大量文献和现场调研,许多学者结合实际工程对影响防渗墙成墙质量的施工因素进行了浅析,但涉及施工因素系统调研且归并分类的研究较少,施工因素对防渗墙成墙质量至关重要,进而决定了坝体的防渗性能,直接影响整个工程安全性,因此系统调研影响防渗墙质量的施工因素很有必要<sup>[4-18]</sup>。在数值模拟正分析层面,相关研究很多<sup>[19-27]</sup>,证实了利用 Geostudio 软件模拟坝体渗流的可行性与优越性。在通过相关数值、数学方法或结合实测数据开展反演分析层面<sup>[28-31]</sup>,对于施工因素系统调研与归类研究较少,导致数值模拟中工况参数缺乏理论依据,且涉及非稳定渗流库水位变动下浸润线的研究鲜见与实际工程结合,反演分析大多停留在坝体渗透系数确定层面,很少涉及通过浸润线形态进行防渗墙不良原因判别,据此进行了本文研究工作<sup>[32-36]</sup>。

本文通过现场调研及查阅施工日志,结合专家访谈,并参考相关文献阐述,归纳影响防渗墙防渗效果的相关因素。基于上述分类,建立相应简化物理模型,通过比对不同工况下的渗透参数,评估各因素对防渗效果的影响程度,结合实测浸润线形态开展防渗体防渗效果不良原因初判,并对稳态下不同库水位水平及库水位变动工况进行数值模拟,比较分析其浸润线形态差异,对土石坝防渗加固效果做出综合分析。

## 1 防渗墙防渗效果影响因素分类

通过开展相关现场调研及资料分析,结合收

集数次专家咨询讨论会意见,并参考相关文献,总体得出影响防渗墙防渗效果的因素存在于工程各个阶段,具体分为事前(勘察设计)、事中(施工)、事后(运行),通过归并分类可知,事前阶段,主要是勘察设计阶段存在勘察不足,导致防渗体结构设计形式与需求存在差异影响整体防渗效果;施工阶段,诸多施工因素的影响最终基本体现在防渗墙质量缺陷这个关键点;在运行阶段,台风过境等不利因素往往导致库水位瞬升,引起非稳定渗流,导致局部水力梯度超允许值,从而影响防渗墙的防渗效果。最终以鱼骨图形式展示影响混凝土防渗墙防渗效果的诸多因素,具体如图 1 所示。

## 2 相关影响因素下渗流场分析

通过对图 1 展示的相关影响因素进行合理归并,构建系列简化物理模型,并建立相应的数值模型开展分析。具体依托某一工程,针对各数值模型开展稳定-非稳定渗流模拟,评估各影响因素下土石坝防渗加固效果。

### 2.1 工程概况

某均质土坝,如图 2 所示。坝顶高程 240.0 m,坝顶宽 25 m,防渗墙顶高程 240 m,坝轴线长 208.0 m,防渗墙厚 1 m,设计正常蓄水位 32 m,枯水位 12 m。坝体填筑材料主要成分为粘性土,填土的成分均匀性较好,填土时经分层压实。坝基从上至下分别为细砂层、泥质粉砂岩,层厚分别为 10 m 和 5 m。水库大坝防渗加固前存在的主要问题是坝体填筑土的压实度偏低,含水率偏高,呈弱中等透水性。水库高水位运行时,大坝背水坡出现大面积湿坡。

### 2.2 有限元分析模型

#### 2.2.1 土坝物性参数

根据防渗加固前开展的地质勘测报告描述的土工试验成果及其建议值选取工程各部位参数,详见表 1,坝身土非饱和和渗透系数参考类似工程选取。

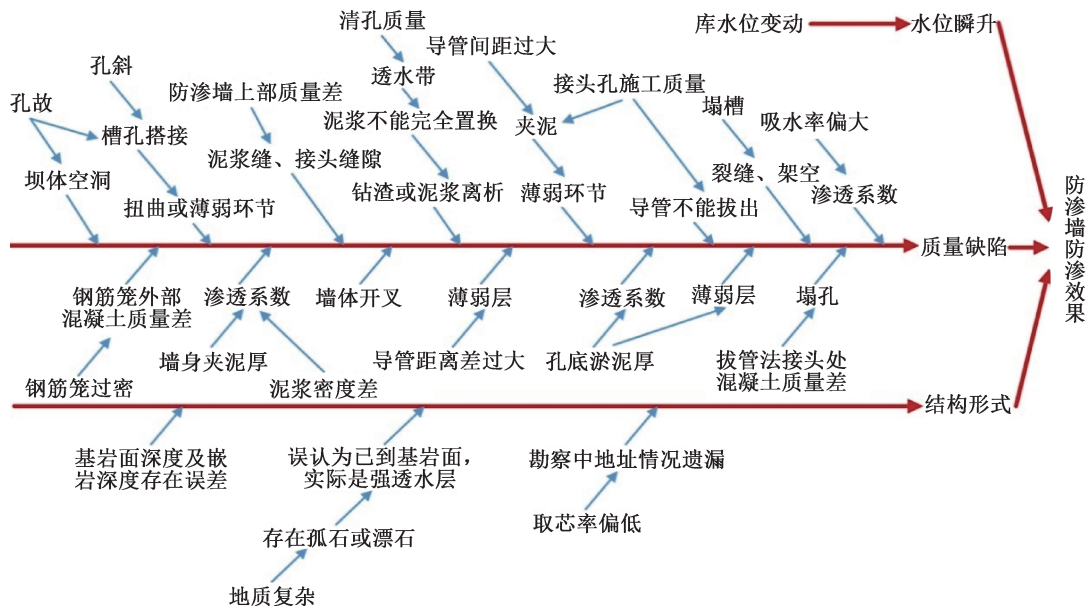


图 1 防渗效果影响因素

Fig.1 Influencing factors of seepage control effect

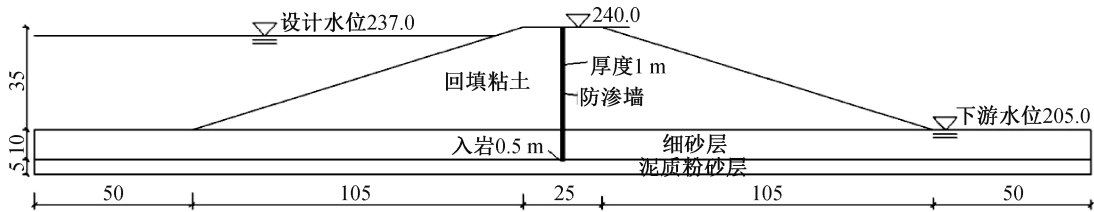


图 2 典型断面图(单位:m)

Fig.2 Typical section

表 1 坝体不同分区计算参数  
Tab.1 Calculation parameters of different zones of dam body

部位	材料类型	渗透系数/( $m \cdot s^{-1}$ )	允许渗透坡降
堤身	回填黏土	$2 \times 10^{-6}$	0.8
防渗墙	混凝土	$5 \times 10^{-8}$	-
强透水层	细砂	$1 \times 10^{-4}$	0.4
基岩层	泥质粉砂岩	$5 \times 10^{-7}$	0.8

由勘察报告可知,该坝体各部分渗透系数较高,特别其下卧细砂层,其渗透系数为  $1 \times 10^{-4} m/s$ ,为高渗透性,显然不利于坝体防渗,是水库渗漏的重要通道。

### 2. 2. 2 分析模型

依据图 2 所示断面形态,建立图 3 所示分析模型,模型边界设置如下:坝体上游水位面以下设置为等水头边界,  $H = 32 m$ ;坝体下游水位面位于细砂层顶面,  $H = 0 m$ ;坝体下游坡面设置为潜在渗流面,出溢点通过自动搜索获得;模型底面及左右均设置为不透水边界。网格划分时,防渗墙体单元尺寸设置为  $0.25 m \times 0.25 m$ ,其余区域单元尺寸设置为  $1 m \times 1 m$ 。

### 2. 2. 3 防渗墙的有限元渗流模拟

依托第一部分开展的相关工作,在考虑施工影响因素时,细分为不同缺陷位置及缺陷程度对

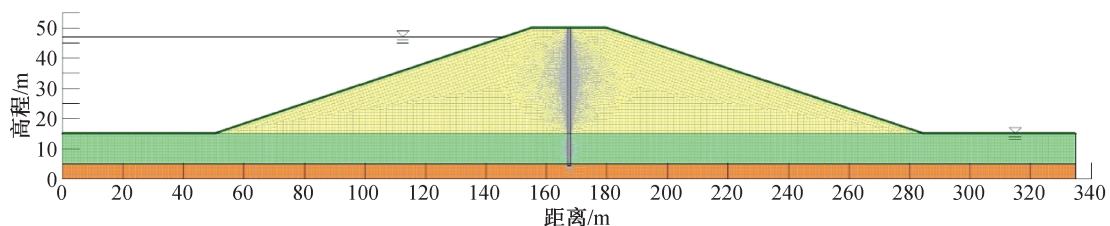


图 3 有限元网格及边界条件设定

Fig.3 Finite element mesh and boundary condition setting

土坝防渗的影响,最终考虑防渗墙缺陷、防渗墙结构形式和水位瞬升等将对流场产生重要影响,进而影响防渗墙防渗效果的因素共设置 11 种工况,如图 4 所示,图中空白部分表征缺陷,表 2 为各工况设置参数表。

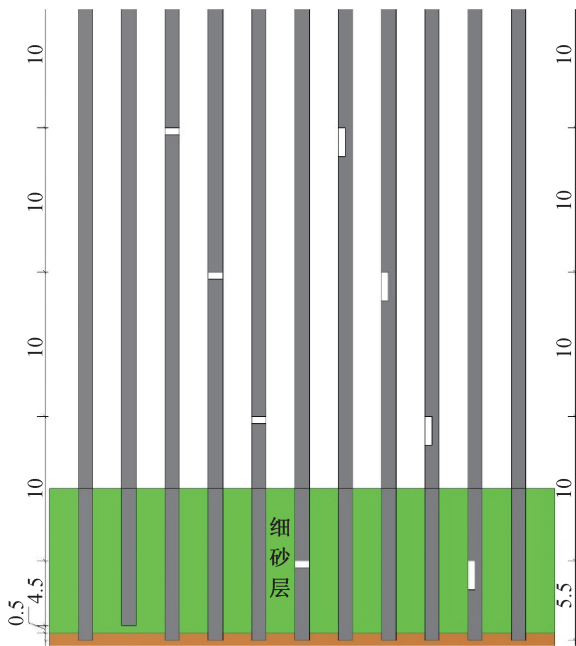


图 4 各分析工况简化示意图(单位: m)

Fig.4 Simplified diagram of each analysis condition

表 2 各工况设置参数

Tab.2 Setting parameters of each working condition

工况	渗流形态	结构形式	防渗体			
			入岩深度/m	缺陷形式	缺陷顶部距坝顶距(长×高)离/m	缺陷尺寸/m
1	稳定渗流	全封闭式	0.5	无	无	无
2	稳定渗流	悬挂式	-0.5	无	无	无
3	稳定渗流	全封闭式	0.5	水平贯穿	10	1×0.5
4	稳定渗流	全封闭式	0.5	水平贯穿	20	1×0.5
5	稳定渗流	全封闭式	0.5	水平贯穿	30	1×0.5
6	稳定渗流	全封闭式	0.5	水平贯穿	40	1×0.5
7	稳定渗流	全封闭式	0.5	垂直非贯穿	10	0.5×2
8	稳定渗流	全封闭式	0.5	垂直非贯穿	20	0.5×2
9	稳定渗流	全封闭式	0.5	垂直非贯穿	30	0.5×2
10	稳定渗流	全封闭式	0.5	垂直非贯穿	40	0.5×2
11	非稳定渗流	全封闭式	0.5	无	无	无

表 3 不同防渗墙结构形式下工程渗流参数变化

Tab.3 Variation of engineering seepage parameters under different seepage control wall structures

工况类型	防渗墙结构形式	防渗墙深度/m	墙前浸润线高度/m	墙后浸润线高度/m	出逸处 $i$	坝体渗流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	下游坝基渗流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$
工况 1	全封闭式	45.5	24.06	10.51	0.079	$1.21 \times 10^{-5}$	$4.56 \times 10^{-5}$
工况 2	悬挂式	44.5	23.4	16.62	0.155	$9.08 \times 10^{-6}$	$1.29 \times 10^{-4}$

采用 Geostudio 中的 seep/w 模块开展上述工况模拟,获取土石坝浸润线(形态、防渗体上游侧、下游侧水头高度)、出逸点水力坡降、坝基渗流量、坝体渗流量等渗流参数,通过比对各工况下的渗流参数,确定各因素对防渗效果的影响程度。

## 2.3 有限元分析结果

### 2.3.1 防渗墙不同结构形式对渗透特性的影响

在基础覆盖层不厚的土石坝加固工程中,混凝土防渗墙一般直接嵌入基岩以形成封闭式防渗体系。然而,实际工程中由于勘察原因导致防渗墙嵌入基岩深度不够甚至未入岩等情况,相应地,防渗墙结构形式从全封闭式变为悬挂式。为探讨防渗墙结构形式的改变对防渗墙防渗效果的影响,进行了工况 1 及工况 2 的数值模拟。

表 3 显示,当入岩深度从 50 cm 变到 -50 cm 时,即防渗墙的结构形式从全封闭式变为半封闭式时,坝体渗流量减小到原来的 0.75 倍,下游坝基渗流量增大到原来的 2.8 倍,渗流量变化显著,这是因为在防渗墙底部存在强透水层,未有效截渗,将形成优势渗流通道,导致坝体渗流量减小,坝基渗流量增加。显然,形成全封闭式防渗结构能显著降低下游坝基渗流量、坝基出逸坡降和上下游水头差,因此,如因勘察、设计及施工某一方导致防渗墙深部不够,未形成全封闭式防渗结构将称为防渗工程的隐患,不容忽视。由图 5 可知,防渗墙的结构形式的变化对流场产生重要的影响,对于浸润线形态及各部位水力梯度均影响显著。

### 2.3.2 防渗墙不同缺陷形式对渗流特性的影响

由于防渗墙施工工艺形式多样,且是隐蔽工程,墙体质量难以监控,可能存在空洞、薄弱区等缺陷,为此设置多种缺陷工况,对应模拟图 1 中墙体各部位存在施工缺陷的渗流状况,与正常情况对比,分析不同部位、不同程度的墙体缺陷对防渗效果的影响。具体设置时考虑两种缺陷类型:一种为水平施工缺陷,该缺陷贯通防渗墙左右两侧,另一种为垂直施工缺陷,该缺陷沿防渗墙厚度方向呈现,划分网格时对防渗墙及缺陷部位进行加密处理。

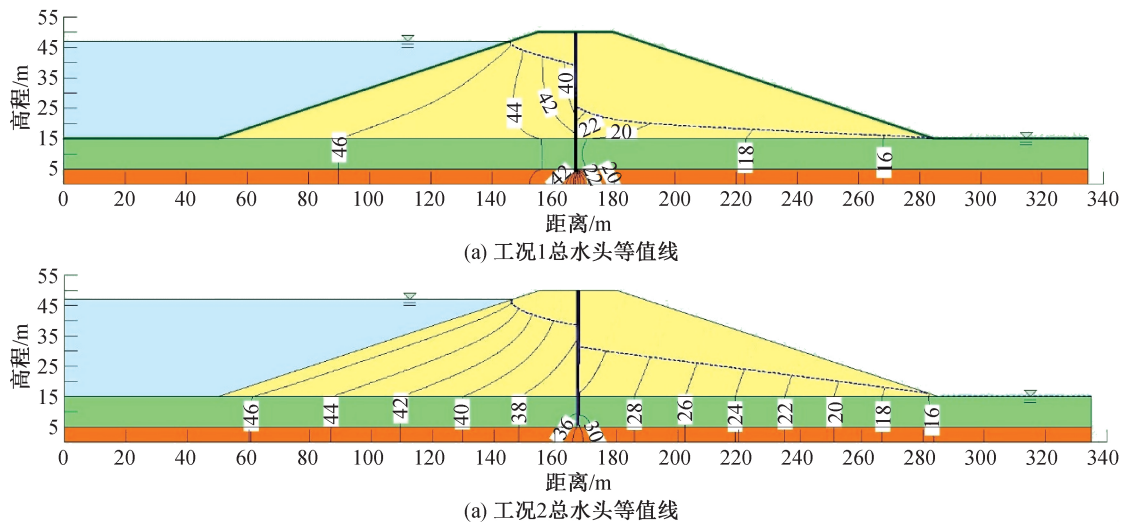


图 5 各工况下总水头等值线云图

Fig.5 Cloud chart of total head isoline under various working conditions

表 4 不同防渗墙缺陷形式下工程渗流参数变化

Tab.4 Variation of seepage parameters under different impervious wall defects

工况类型	缺陷形式	缺陷顶面距坝顶距离/m	墙前浸润线高度/m	墙后浸润线高度/m	出逸处 <i>i</i>	坝体渗流量 / (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	下游坝基渗流量 / (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
工况 1	无	无	24.06	10.51	0.079	1.21×10 <sup>-5</sup>	4.56×10 <sup>-5</sup>
工况 3	水平缺陷	10	22.75	10.85	0.082	2.70×10 <sup>-5</sup>	4.74×10 <sup>-5</sup>
工况 4	水平缺陷	20	23.52	12.25	0.083	2.72×10 <sup>-5</sup>	4.83×10 <sup>-5</sup>
工况 5	水平缺陷	30	23.88	11.46	0.087	2.60×10 <sup>-5</sup>	5.03×10 <sup>-5</sup>
工况 6	水平缺陷	40	23.35	16.91	0.164	8.91×10 <sup>-6</sup>	1.36×10 <sup>-4</sup>
工况 7	垂直缺陷	10	23.37	10.42	0.080	1.31×10 <sup>-5</sup>	4.64×10 <sup>-5</sup>
工况 8	垂直缺陷	20	23.94	10.73	0.080	1.31×10 <sup>-5</sup>	4.66×10 <sup>-5</sup>
工况 9	垂直缺陷	30	24.03	10.58	0.081	1.23×10 <sup>-5</sup>	4.71×10 <sup>-5</sup>
工况 10	垂直缺陷	40	24.05	10.56	0.084	1.20×10 <sup>-5</sup>	4.84×10 <sup>-5</sup>

由表 4 可见,工况 3—工况 5 中,坝基渗流量、坝基出逸渗透坡降、下游坝基渗流量基本相同,防渗效果接近,但上述各工况与正常工况相比:墙后浸润线的位置存在明显变化,坝体渗流量变化较大,这是因为在坝体内存在的水平缺陷形成贯穿通道,形成渗流的优势通道,增加了水流量;工况 6 由于缺陷位于强透水层,水流优先从缺陷内通过,与正常相比,坝基渗流量明显增加,坝体渗流量明显减小,防渗效果显著降低,在所有水平施工缺陷工况中防渗效果最差,因此防渗墙水平施工缺陷所处地层对其防渗效果有显著影响;通过工况 7—

工况 10 的对比分析,各渗流参数基本接近,由于缺陷设置并未贯穿,与无缺陷工况 1 相比,各垂直缺陷工况防渗墙防渗效果影响不大。

### 2.3.3 防渗墙水位骤升对渗流场的影响

库水位变化与土石坝坝坡稳定密切相关,汛期蓄水时这种不利因素更加明显,随着库水位急剧抬升,坝体内将产生对坝坡稳定不利的非稳定渗流。为此设置了工况 11:上游水位 5 d 从 217 m 匀速抬升至 237 m,分析刚达到稳定时防渗墙工程渗流参数,并与工况 1 比对,如表 5,分析水位骤升对防渗效果的影响。

表 5 不同渗流种类工程渗流参数变化

Tab.5 Variation of seepage parameters of different seepage types

工况类型	渗流种类	防渗墙左侧浸润线高度/m	防渗墙右侧浸润线高度/m	坝基出逸渗透坡降	坝体渗流量 / (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	下游坝基渗流量 / (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
工况 1	稳定渗流	24.06	10.51	0.079	1.21×10 <sup>-5</sup>	4.56×10 <sup>-5</sup>
工况 11	非稳定渗流	6.4	1.28	0.010	2.40×10 <sup>-8</sup>	4.28×10 <sup>-6</sup>

表5可见,与稳定渗流相比,非稳定渗流中,防渗墙两侧浸润线高度差、浸润线高度,有明显降低,防渗墙底部平均渗透坡降、坝基出逸渗透坡降、坝体渗流量、下游坝基渗流量均有明显降低,这是因为水位骤升时浸润线在上游出现了“延缓上升”现象,表现为从上游坝坡到防渗墙处浸润线的上升速率逐渐减小,防渗墙内部及上下游边界处浸润线有明显突降,水流充满坝体时间不足,进而产生此结果。

### 3 数值模拟结果分析

#### 3.1 渗流量分析

根据工况1—工况11的数值模拟结果绘制各个工况的渗流量图,如图6所示。

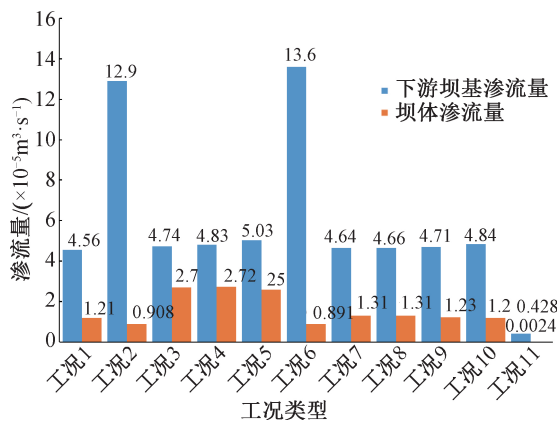


图6 各个工况渗流量

Fig.6 Seepage flow under various working conditions

图6显示,于坝体渗流量而言,与工况1相比,工况2有所减小,是由于在防渗墙底部形成渗流通道的结果,工况3—工况5明显增加,是因为在坝体内存在水平施工缺陷,形成贯穿通道,工况6有所降低是由于在强透水层存在的水平缺陷形成优势通道,工况7—工况10与其接近,是没有形成渗流通道的缘故,工况11为非稳定渗流,坝体渗流量明显降低;于下游坝基渗流量而言,工况1渗流量最小,工况2的渗流量是工况1的近2.8倍,防渗墙高度变化不大,防渗墙由全封闭式变为悬挂式时,坝基渗流量大大增加,表明防渗墙结构形式是影响防渗墙防渗效果的重要因素之一。

由工况3—工况6可知,渗流量与施工缺陷的位置有关,缺陷处于强透水层时防渗效果最差;工况7—工况10渗流量较为接近;工况11为非稳定渗流下的工况,渗流量与正常工况相比明显降低,这是因为水位骤升时浸润线在上游出现了“延缓

上升”现象,坝体内充水不足导致渗流量产生明显差异。综合分析,各个因素影响下游坝基渗流量的程度:水平施工缺陷(缺陷处于强透水层)>结构形式(悬挂式)>水平施工缺陷(缺陷处于坝体)>垂直施工缺陷>非稳定渗流(水位骤升);各个因素影响坝体渗流量的程度排序为:水平施工缺陷(缺陷处于坝体)>垂直施工缺陷>结构形式(悬挂式)>水平施工缺陷(缺陷处于强透水层)>非稳定渗流(水位骤升)。

#### 3.2 防渗墙降低水头值分析

根据工况1—工况11的数值模拟结果绘制各个工况的防渗墙降低水头值图,如图7所示。

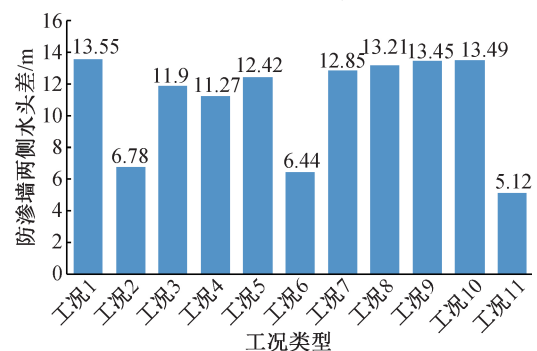


图7 各个工况中防渗墙降低水头值

Fig.7 Reduced water head value of impervious wall under various working conditions

图7显示,防渗墙无缺陷时防渗墙降低水头值最大,防渗效果最好;当防渗墙由全封闭式变为悬挂式时,降低水头值减小了原来的50%;防渗墙存在水平施工缺陷时,防渗墙降低水头值与缺陷的位置有关,缺陷处于强透水层时防渗效果最差;防渗墙存在垂直缺陷时,防渗墙降低水头值与缺陷位置关系不大;防渗墙无缺陷在非稳定渗流情况下防渗墙降低水头值最小,这是由于水位骤升导致浸润线在坝体内出现了“延缓下降”现象,与防渗墙本身防渗效果无关。综合分析,各个因素影响防渗墙降低水头值的程度排序为:水平施工缺陷(缺陷处于强透水层)>结构形式(悬挂式)>水平施工缺陷(缺陷处于坝体)>垂直施工缺陷>非稳定渗流(水位骤升)。

#### 3.3 坝基出逸渗透坡降分析

根据工况1—工况11的数值模拟结果绘制各个工况坝基出逸渗透坡降图,如图8所示。

图8显示,防渗墙无缺陷时坝基出逸渗透坡降最小,防渗效果最好;当防渗墙由全封闭式变为悬

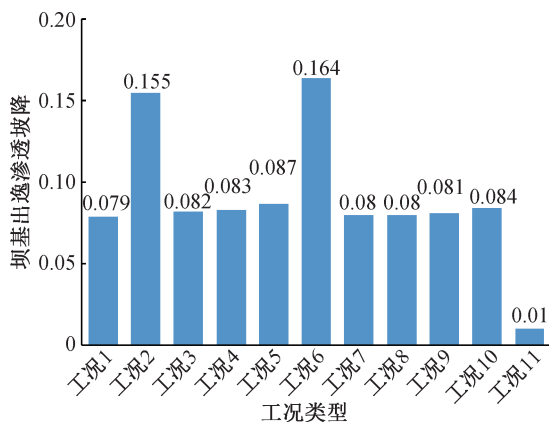


图8 各工况坝体下游面出逸渗透坡降

Fig.8 Seepage gradient of downstream face of dam body under various working conditions

挂式时,坝基出逸渗透坡降增大了0.96倍;防渗墙存在水平施工缺陷时,坝基出逸渗透坡降与缺陷的位置有关,缺陷处于强透水层时防渗效果最差,另外3种工况中坝基出逸渗透坡降变化不大;防渗墙存在垂直施工缺陷时,坝基出逸渗透坡降与缺陷的位置无明显关系,与正常情况相比,坝基出逸渗透坡降变化不大;防渗墙无缺陷在非稳定渗流情况下坝基出逸渗透坡降与正常情况相比,坝基出逸渗透坡降明显降低。综合分析,各个因素影响坝基出逸渗透坡降的程度排序为:水平施工缺陷(缺陷处于强透水层)>结构形式(悬挂式)>水平施工缺陷(缺陷处于坝体)>垂直施工缺陷>非稳定渗流(水位骤升)。

### 3.4 浸润线分析

#### 3.4.1 各工况浸润线分析

根据数值分析结果绘制出各个工况的浸润线,如图9所示。

实际工况中,分别选取防渗墙前、防渗墙后以及坝体出逸点作为代表点,将现场实际测得的代表点孔压计读数在图9中以折线表示出来,通过对比分析,实际工况的浸润线与工况2和工况6的浸润线很接近,比对代表点位置发现,实际工况的浸润线与工况6的浸润线基本重合,且曲线走势相同,可初步判别实际工况的缺陷形式与工况6接近,再结合现场资料及施工记录综合判别,这种通过结果反演分析的方法可以初判实际情况中大坝防渗墙所发生的质量问题,类似的反演分析方法推广至更多工程中,对大坝隐蔽工程防渗墙的缺陷进行整治。

#### 3.4.2 补充工况浸润线分析

为深入研究贯穿缺陷和非贯穿缺陷不同尺寸的渗透规律,在工况7基础上补充工况12—工况15,设置参数如表6,图10为浸润线详图。

从图10可知,工况12—工况14的浸润线基本重合,工况14差异较大,由表6可见,工况12—工况14的缺陷位置最大 $i$ 、坝基出逸渗透坡降 $i$ 、坝体渗流量和下游坝基渗流量基本接近,说明当缺陷非贯穿时,缺陷沿水平方向的长度差异对渗流影响不大,这是因为未在缺陷处形成渗流通道,当缺陷贯穿时,工况15与其他工况相比,渗流参数和浸润线均有较大差异,这是因为贯穿缺陷在缺陷处形成渗流通道,严重削弱了防渗体的防渗效果,因此,实际施工过程中,应严格避免贯穿施工缺陷的出现,以防在防渗体内部形成渗流通道造成坝体的渗流破坏。

#### 3.4.3 非稳定渗流浸润线分析

对稳态下不同库水位水平及库水位骤升、骤降工况下的坝体内部浸润线变化情况进行分析。本文给出了坝体在稳定渗流、不同库水位水平及库水位不同骤升速率、骤降速率工况下的内部浸润线变化情况,稳定时间均为60d,如图11—图13。

图11显示:不同库水位在稳定渗流下,浸润线变化较为平缓,变化趋势一致,均在防渗墙处有一折减效应,表示防渗墙起到了阻水效应;随着库水位下降,坝体内部浸润线相应地降低,防渗墙两侧浸润线高度差也相应地减小,出逸点位置下移,表明水位越低,防渗墙需要承担的水头降低值越小,对下游坝坡的稳定越有利。

图12显示:不同库水位骤升速率下的浸润线变化与稳态库水位相比有很大差异,即浸润线在上游出现了“延缓上升”现象,表现为从上游坝坡到防渗墙处浸润线的上升速率逐渐减小,防渗墙内部及上下游边界处浸润线有明显突降,高水位情况下的浸润线与低水位下的浸润线在防渗墙内聚拢,坝体内部浸润线较之稳态相同库水位情况有明显降低。不同速率骤升条件下的浸润线均比较密集地分布,坝体骤升达到稳定所需时间近乎相同,稳定后浸润线与稳态渗流结果相同,随着骤升速率降低,坝体各部分浸润线均有所抬升,浸润线分布越来越稀疏,这是因为上升速率的减小使得在相同库水位情况下水流进入坝体的时间延长,浸润线结果也就越来越接近稳态渗流。

图13显示:不同库水位骤降速率下的浸润线

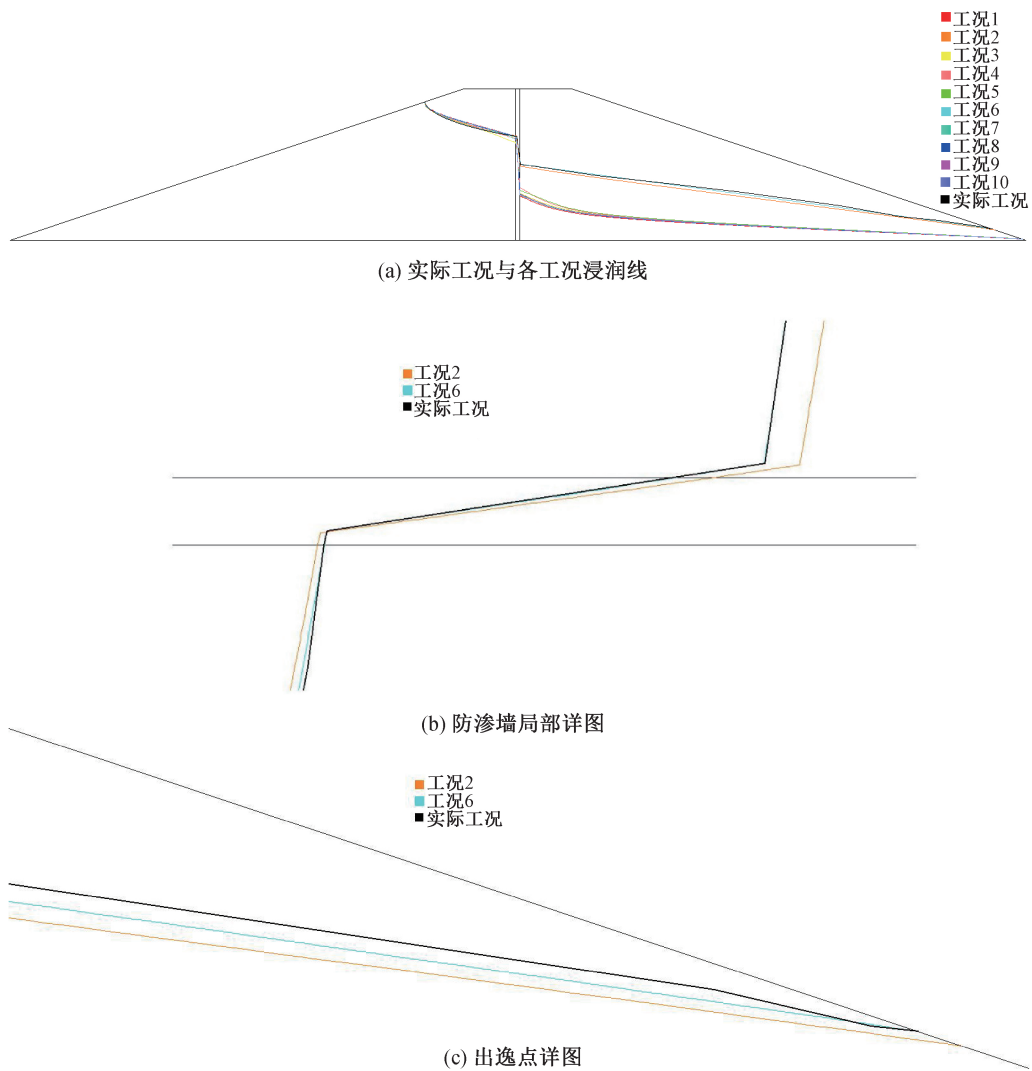


图9 实际工况与模拟工况浸润线

Fig.9 Saturation line of actual and simulated conditions

表6 工况12—工况15设置参数  
Tab.6 Setting parameters of condition 12—15

工况	防渗体		缺陷位置 最大 $i$	坝基出逸渗 透坡降 $i$	坝体渗流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	下游坝基渗流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$
	缺陷形式	缺陷尺寸(长×高)/m				
12	垂直非贯穿缺陷	0.25×2	0.86	0.079	$1.22 \times 10^{-5}$	$4.58 \times 10^{-5}$
13	垂直非贯穿缺陷	0.5×2	0.72	0.08	$1.31 \times 10^{-5}$	$4.64 \times 10^{-5}$
14	垂直非贯穿缺陷	0.75×2	0.88	0.08	$1.27 \times 10^{-5}$	$4.67 \times 10^{-5}$
15	垂直贯穿缺陷	1×2	3.39	0.17	$2.48 \times 10^{-5}$	$4.91 \times 10^{-5}$

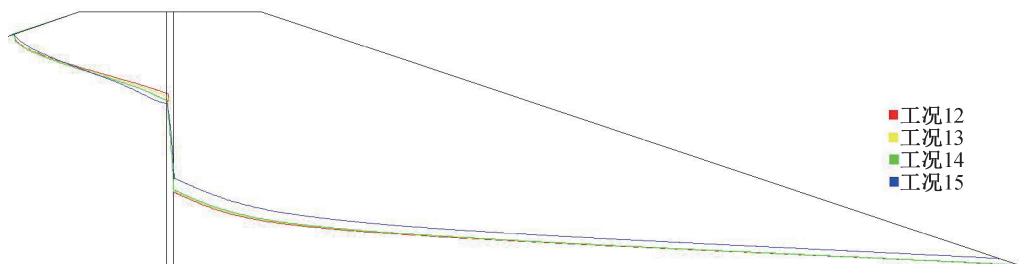


图10 工况12—工况15浸润线详图

Fig.10 Detail drawing of saturation line under working condition 12—15

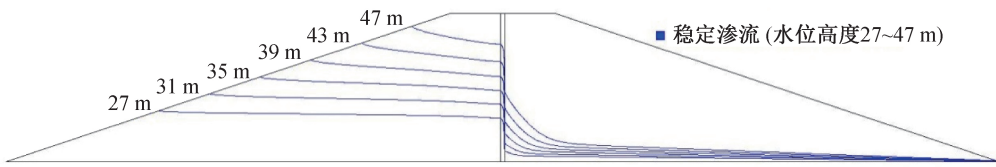
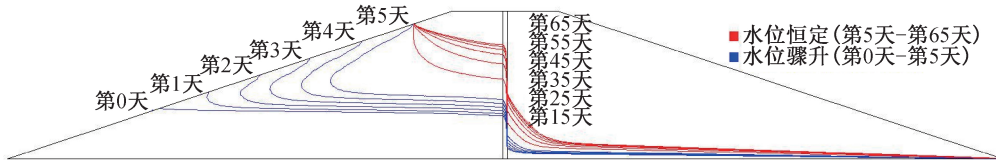
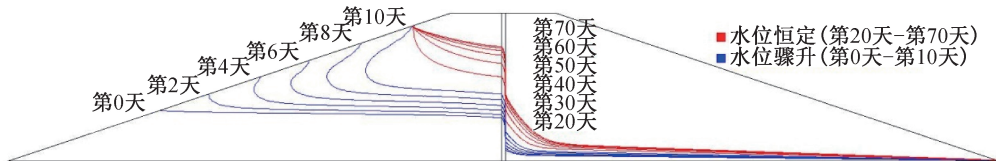


图 11 防渗墙不同库水位水平下的浸润线变化

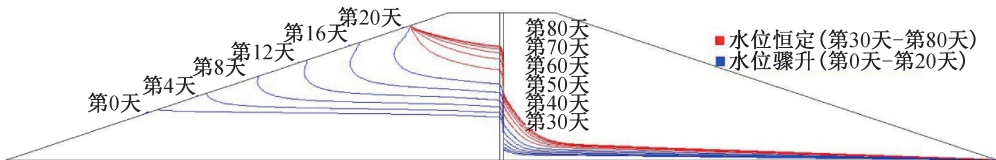
Fig.11 Change of phreatic line under different water level of impervious wall



(a) 库水位骤升速率4 m/d



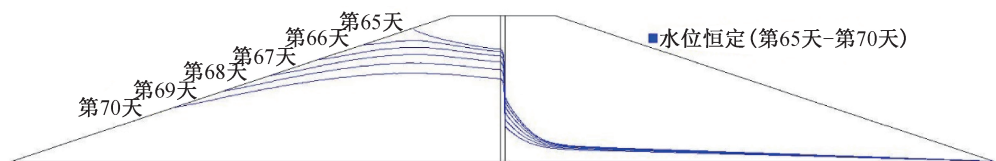
(b) 库水位骤升速率2 m/d



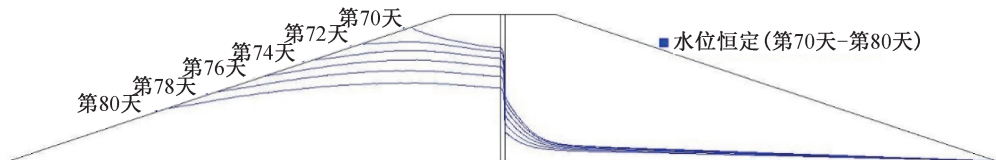
(c) 库水位骤升速率1 m/d

图 12 防渗墙库水位骤升工况下的浸润线变化

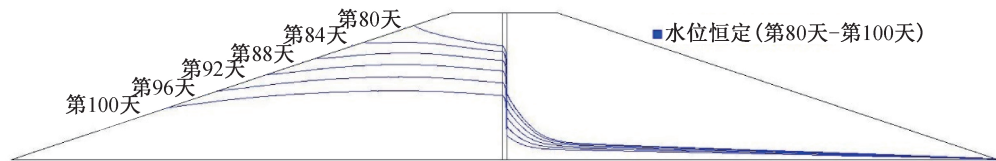
Fig.12 Change of phreatic line under sudden rise of water level in impervious wall reservoir



(a) 库水位骤升速率4 m/d



(b) 库水位骤升速率2 m/d



(c) 库水位骤升速率1 m/d

图 13 防渗墙库水位骤降工况下的浸润线变化

Fig.13 Change of phreatic line under sudden drop of water level in impervious wall reservoir

变化与稳态水位相比有很大差异,即浸润线在坝体内出现了“延缓下降”现象,表现为上游坝坡到

防渗墙处浸润线的下降速率逐渐减小,这是因为防渗墙的渗透系数是坝体的 1/50,库水位下降时,

上游坝坡下降得快,而防渗墙下降得较慢,因而形成了浸润线在防渗墙内部的“滞留”。不同速率骤降工况下,浸润线形态一致,库水位的下降速率越小,库水位降低至最低水位时防渗墙下游边界浸润线越低,坝体内浸润线越稀疏,这是因为下降速率的减小使得在相同库水位情况下渗流达到稳定的时间延长,浸润线结果也就越来越接近稳态渗流而向下变动。

#### 4 结论

1)开展坝体防渗结构缺陷要因分析,对影响防渗效果因素进行分类。进而通过设置模拟工况开展数值分析,结合坝体埋设孔压计及水位计等监测设备可进行防渗缺陷初步探究,结合浸润线形态及出溢点位置开展防渗体防渗效果不良原因初判,如有渗漏量监测,则可进一步进行验证,从而为土坝隐蔽工程防渗墙的缺陷整治提供初步预判。

2)非贯穿缺陷对渗流效果影响不大,而贯穿缺陷由于在缺陷内形成渗流通道,严重削弱了防渗体的防渗效果,这尤其表现在防渗墙两侧水头值和出逸点位置的差异上,所以实际施工过程中,应严格避免贯穿施工缺陷的出现,以防在防渗体内部形成渗流通道造成坝体的渗流破坏。

3)不同库水位骤升速率下的浸润线变化与稳态库水位相比在上游出现了“延缓上升”现象,不同速率骤升条件下的浸润线均比较密集地分布,坝体骤升达到稳定所需时间近乎相同。不同库水位骤降速率下的浸润线变化与稳态水位相比在坝体内出现了“延缓下降”现象,不同速率骤降工况下,浸润线形态一致。显然,利用上述特征,结合实测数据,可为防渗体缺陷检测提供系列动态数据,进一步明确缺陷形态。

#### 参考文献:

[1]石春莉.水工建设中混凝土防渗墙施工技术分析[J].科技创新与应用,2015(10):188.  
 [2]孙金库,李晓红.黄金坪水电站消力池防渗墙施工难点及对策[J].人民长江,2016(11):40-42.  
 [3]刘长春.小川水库坝体渗漏成因与渗流计算[J].水科学与工程技术,2017(4):9-12.  
 [4]刘林,于幸成,舒畅.混凝土防渗墙的施工与影响质量因素浅析[J].科技信息:科学教研,2008(5):107.  
 [5]李书锋,周爱山.混凝土防渗墙施工中影响进度的原因浅析[J].西部探矿工程,2004(8):32-33.

[6]侯丽和,李书锋,刘彦肖,等.影响防渗墙成墙质量的因素分析及对策探讨[J].水利建设与管理,2004(5):40-41.  
 [7]王辉.影响混凝土防渗墙施工质量的因素分析[J].科技创新导报,2010(28):50.  
 [8]喻伯良,肖乾.大型水库主坝混凝土防渗墙施工技术及其质量控制探讨[J].广东建材,2009(4):114-117.  
 [9]邓舜民.混凝土防渗墙施工技术应用分析[J].河南水利与南水北调,2017(2):68-69.  
 [10]段正强.简析混凝土防渗墙施工质量控制[J].科技与创新,2017(1):124-126.  
 [11]王天星.混凝土防渗墙在土石坝防渗加固中的应用研究[D].合肥:合肥工业大学,2010.  
 [12]张刚刚.浅析混凝土防渗墙施工工艺[J].建筑工程技术与设计,2016(12):1266.  
 [13]谭进轩.水库大坝混凝土防渗墙施工技术探究[J].中国水能及电气化,2015(8):18-21.  
 [14]闫沛贤.水利工程地基处理中混凝土防渗墙施工技术要点分析[J].农业科技与信息,2016(20):156-156.  
 [15]王正哲.水利建筑工程施工防渗墙技术研究[J].技术与市场,2015(9):157-158.  
 [16]谭运吉.水利水电工程中混凝土防渗墙施工技术应用分析[J].山东工业技术,2018(3):99.  
 [17]苏迎春.影响混凝土防渗墙施工质量的因素统计分析[J].建筑,2015(7):61-62.  
 [18]张正荣.影响水泥土搅拌桩防渗墙质量因素分析及控制措施[J].陕西水利,2015(5):150-151.  
 [19]李林,冯明珩,朱化鹏,等.凤亭水库黏土心墙坝库水位变动渗流特性分析[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2019(3):72-78.  
 [20]马明瑞,张继勋,郁舒阳,等.库水位变动对心墙坝渗流特性影响及防渗措施研究[J].三峡大学学报:自然科学版,2019(4):10-15.  
 [21]王亚月.水位下降对均质土石坝坝坡稳定的影响分析[D].新疆:石河子大学,2014.  
 [22]王曙光.土石坝防渗加固效果的有限元分析[D].天津:天津大学,2006.  
 [23]高江林,严卓.土石坝加固工程中缺陷防渗墙渗流特性研究[J].人民黄河,2017(9):125-134.  
 [24]安元,唐雷彬.基于数值模拟的土石坝渗流计算及防渗措施分析[J].水利规划与设计,2018(3):91-93.  
 [25]陈洪凯,汪叶萍.库水位升降变化对巫山宁江岛造地型护岸工程稳定性影响的数值模拟研究[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2015(3):54-58.  
 [26]刘婵玉.库水位骤降期深圳水库坝坡稳定分析[J].陕西水利,2018(3):174-177.  
 [27]刘翔,胡尧.木桥河水库面板坝缺陷渗透稳定性数值模拟研究[J].水科学与工程技术,2019(2):8-12.  
 [28]夏甜,杨文滨,袁明道,等.基于有限元法的土石坝渗

- 流安全问题分析[J].广东水利水电,2019(1):11-14.
- [29]张德举.密云水库九松山副坝渗流反演计算及安全评价[J].北京水务,2017(5):40-43.
- [30]周鑫.平原水库渗漏成因分析及其防止对策研究[D].扬州:扬州大学,2015.
- [31]黄珊,秦卫星,黎峰,等.石牛水库防渗加固后大坝渗透系数反分析[J].吉林水利,2014(2):1-2.
- [32]唐洪波.浅谈水库大坝浸润线的观测[J].科技风,2014(22):156.
- [33]位敏,周和清,章赢.大竹河水库沥青混凝土心墙坝渗漏分析及处理方案研究[J].大坝与安全,2014(5):45-50.
- [34]唐波华,简鸿福,杨霞,等.某水库大坝渗流原型监测数据分析[J].江西水利科技,2018(5):350-355.
- [35]颜文健.浅析库水位骤升骤降对岩滩电站大坝的影响[J].企业科技与发展,2014(9):96-98.
- [36]夏冰,刘海华,熊国文,等.三溪浦水库防渗墙下游侧水位偏高的成因分析[J].水利与建筑工程学报,2018(5):190-193.
- (责任编辑 王利君)

### 投稿须知

- 1.本刊来稿要求:选题新颖,观点明确,逻辑清晰,结构完整,数据真实可靠;具有省部级及以上科研项目支撑,对于有国家自然科学基金及以上科研项目支撑的来稿,优先刊登;综述类来稿第一作者须为领域内知名专家或学科带头人,且内容要具有较强的学术前瞻性和指导性。
- 2.本刊严禁一稿两投、重复内容多次投稿(包括以不同文种分别投稿)以及抄袭他人论文等现象。一旦发现上述情况,该作者的稿件将作退稿处理。
- 3.电子稿件请以WORD(\*.doc)文档上传投稿系统。所投稿件如果有照片和曲线图,则需要尽量提供彩色图片,且做到层次分明、清晰,线条粗细均匀、比例合理美观(建议曲线图用Origin、化学结构式等用Chemi Bio Draw制图,再拷贝到文档中)。
- 4.稿件的作者必须是直接参与研究工作或对其有重要指导作用的成员(如研究生导师等),协助做实验的人员可放入致谢中。
- 5.请务必在稿件首页页脚处依次注明:收稿日期(格式为2015-02-20),基金项目(包括项目来源、项目名称及项目编号)和第一作者简介(包括姓名(出生年—)、性别、民族(汉族可不写)、籍贯、职称、学历及研究方向、E-mail和联系电话)。
- 6.通过审查后需要修改和补充实验的稿件,最晚不超过2个月将修改稿返回编辑部,如有困难需及时向编辑部说明情况,逾期按自动撤稿处理。
- 7.本刊编辑部对拟用稿有权作技术性和文字性修改,作者若不允许对其文稿作修改,务请在来稿时注明;论文发表后,版权即属编辑部所有。凡在投稿时未作特别声明的,本刊均认为作者已同意将其论文编入有关的数据库在网上传播。

投稿系统网址:<http://xuebao.hebeu.edu.cn/journal.htm>

通讯地址:河北省邯郸市经济技术开发区太极路19号 邮编:056038

联系电话:0310-3969121