

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2019.05.011

# 混凝土面板堆石坝垂直缝止水劣化过程量水堰监测分析

章宇璟<sup>1,2</sup>, 郑东健<sup>3</sup>, 阮洪松<sup>4</sup>, 吴金荣<sup>4</sup>

(1. 江西省水利规划设计研究院, 江西 南昌 330029; 2. 江西省水工结构工程技术中心, 江西 南昌 330029;  
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 闽东水电开发有限公司, 福建 宁德 352000)

**摘要:**为研究混凝土面板堆石坝垂直缝接缝止水劣化引起的渗漏量和渗透坡降的变化规律,以某面板堆石坝为例,采用有限元计算方法,模拟了面板左岸垂直缝、面板中间垂直缝、面板中间垂直缝不同高程分别发生止水劣化过程中的渗流,计算了不同工况下通过面板渗漏量、量水堰渗漏量测值、浸润面分布,分析渗透坡降和量水堰测值的关系。计算结果表明,量水堰测值能够反映出面板垂直缝止水劣化程度及垫层区渗透坡降是否超出允许值;随面板止水劣化,面板中间垂直缝较面板左岸垂直缝引起的渗漏量更大、浸润线上升更为明显;面板中间垂直缝随高程降低,引起的渗漏量增加、浸润线上升更为明显。

**关键词:**混凝土面板堆石坝;垂直缝;渗流;渗透坡降;量水堰;渗漏量

中图分类号:TV641

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2019)05-0073-05

**Measuring weir monitoring analysis of water sealing deterioration process in vertical joints of a concrete faced rockfill dam**//ZHANG Yujing<sup>1,2</sup>, ZHENG Dongjian<sup>3</sup>, RUAN Hongsong<sup>4</sup>, WU Jinrong<sup>4</sup> (1. Jiangxi Provincial Water Conservancy, Planning & Designing Institute, Nanchang 330029, China; 2. Jiangxi Provincial Hydraulic Structures Engineering and Technology Center Institute, Nanchang 330029, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Mindong Hydropower Development Co., Ltd., Ningde 352000, China)

**Abstract:** To study the variation law of the leakage and seepage drop due to the deterioration of water sealing in the vertical joints, a concrete face rockfill dam (CRFD) was taken as an example to simulate the seepage in the vertical joints on the left bank of the face slab, the vertical joints in the middle of the face slab, and the middle sag of the face slab under different elevations in the process of water sealing deterioration based on finite element method. The leakage through the face slab, the leakage measurement value of the measuring weir and the distribution of the seepage surface were calculated and the relationship between seepage gradient and the measured value of the measuring weir behind the dam was analyzed. The calculation results show that the measured value of the weir can reflect the deterioration degree of the water sealing in the vertical joints of face slabs and it can also estimate whether the seepage slope in the cushion zone exceeds the allowable value. With the deterioration of the water sealing, the leakage caused by the vertical joint in the middle of the panel increases, and the rise of the seepage line is more evident than that of the left bank. In addition, with the decrease of elevation, the leakage caused by the vertical joint in the middle of the panel increases, and the rise of the seepage line is also obvious.

**Key words:** concrete face rockfill dam; vertical joints; seepage; seepage slope; measuring weir; leakage

混凝土面板堆石坝由于其具有工期短、投资省、安全性好、适应性强等优点<sup>[1]</sup>,逐渐受到工程界欢迎。面板堆石坝是以堆石作为主要支撑材料,以钢筋混凝土面板作为传递水压力和防渗的土石坝坝型<sup>[2]</sup>。堆石区主要通过人工或机械碾压而成,面板堆石坝的防渗体系主要由上游面板、趾板和防渗帷

幕构成<sup>[2]</sup>。由于面板堆石坝结构及施工方法等原因,面板上设置垂直缝、水平缝等<sup>[3]</sup>,这些面板缝的设置主要为了使面板易于伸缩以适应温度应力及主堆石区沉降引起的变形<sup>[4]</sup>,避免面板裂缝的产生<sup>[5-6]</sup>。这些接缝止水若不满足要求而发生劣化,将影响大坝正常运行,严重情况下会导致垫层、过渡层

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51739003);国家自然科学基金(51579085)

作者简介:章宇璟(1994—),女,硕士,主要从事水工结构安全监控及水工结构设计研究。E-mail:252569616@qq.com

通信作者:郑东健(1965—),男,教授,博士,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:353086795@qq.com

发生渗透变形,危及坝体安全<sup>[7]</sup>。自1895年美国建成54 m高的Morena混凝土面板堆石坝至今<sup>[8]</sup>,由于面板堆石坝防渗体系破坏导致的事故不在少数。鉴于混凝土面板堆石坝防渗体系的重要性,对面板接缝止水的研究成为一个重要的课题,盛金宝等<sup>[9]</sup>研究了面板与高挡墙底板间接缝止水劣化后面板的渗流变化规律;丁留谦等<sup>[10]</sup>对自愈型止水结构进行了研究;卢廷浩等<sup>[11]</sup>采用有限元方法模拟垂直缝失效后渗流,结果表明面板失效缝附近渗流偏离达西定律。前人在面板接缝止水劣化情况下渗流规律的研究中,对量水堰测值变化规律与面板接缝止水状态之间的关系认识不足。本文以某面板堆石坝为例,采用有限元计算方法,分析混凝土面板堆石坝垂直缝止水劣化对坝后量水堰测值的影响,建立渗透坡降与量水堰测值的关系曲线,可为应用量水堰测值反映大坝渗流安全提供基础参考。

## 1 渗流三维有限元分析原理

水电站工程区地质条件复杂,为了达到防渗的目的,在坝基和两岸山体均布置了防渗帷幕,以减少渗透流量,因此地下渗流场十分复杂<sup>[12-15]</sup>。在复杂的地质条件和渗控系统下,计算域内的渗流场具有以下显著的特点:①坝体及坝基构成一空间整体结构,其渗流场具有较强的三维流动特点<sup>[16]</sup>;②坝体及两岸山体渗流具有形态复杂的自由面,它既是求解渗流问题中必不可少的一个边界,同时又是一个需要求解的未知边界。鉴于上述特点,对于实际工程三维渗流问题研究的关键在于解决具有自由面渗流场的模拟求解方法。对不可压缩流体,连续方程为<sup>[17-18]</sup>

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$ 分别为沿 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的流速。

根据达西定律,稳定渗流的微分方程为<sup>[19]</sup>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $h$ 为水头函数; $k_{xx}$ 、 $k_{xy}$ 、 $k_{xz}$ 分别为沿 $x$ 方向的主渗透系数 $k_x$ 在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的投影; $k_{yx}$ 、 $k_{yy}$ 、 $k_{yz}$ 分别为沿 $y$ 方向的主渗透系数 $k_y$ 在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的投影; $k_{zx}$ 、 $k_{zy}$ 、 $k_{zz}$ 分别为沿 $z$ 方向的主渗透系数 $k_z$ 在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的投影。

当边界上的水头已知时,边界条件为<sup>[20-22]</sup>

$$h(x, y, z) \Big|_{\Gamma_1} = f(x, y, z) \quad (3)$$

式中: $f(x, y, z)$ 为已知水头; $\Gamma_1$ 为渗流区域边界面。

当边界上的法向流速 $v_n$ 已知时,边界条件为

$$\frac{\partial h}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Gamma_2} = -v_n/k = q_0 \quad (4)$$

考虑到各向异性,式(4)可以写为

$$\begin{aligned} & \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} + k_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \cos(\mathbf{n}, x) + \\ & \left( k_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} + k_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \cos(\mathbf{n}, y) + \\ & \left( k_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} + k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \cos(\mathbf{n}, z) \Big|_{\Gamma_2} = q_0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $q_0$ 为已知流量; $\mathbf{n}$ 为 $\Gamma_2$ 的外法线向量; $k$ 为渗透系数; $\Gamma_2$ 为第二类边界条件。

## 2 实例分析

### 2.1 工程概况

某水电站大坝为面板堆石坝,校核洪水位( $P=0.02\%$ ,其中 $P$ 为洪水频率)为366.93 m,设计洪水位( $P=0.5\%$ )为365.04 m,正常蓄水位为365.00 m。水电站量水堰设在距大坝下游坝趾30 m处,设左、右两个 $90^\circ$ 角的三角堰,量水堰截水墙墙顶高程约为284.00 m。

### 2.2 有限元模型及参数

该水电站工程区渗流三维有限元模型如图1所示,计算模型沿坝轴线方向的长度为391 m,顺河向的长度为466 m。模型在坝体四周分别取超出一倍坝高的区域作为岩体及地基,包括了可影响计算域渗流场的主要边界范围。该有限元模型主要模拟了面板、垂直缝、垫层、过渡层、主堆石区、次堆石区、周边缝、趾板、帷幕、挡墙、量水堰、岩体等。模型主要采用六面体八节点单元,并辅以三棱柱单元,共有110 197个单元,117 091个节点。

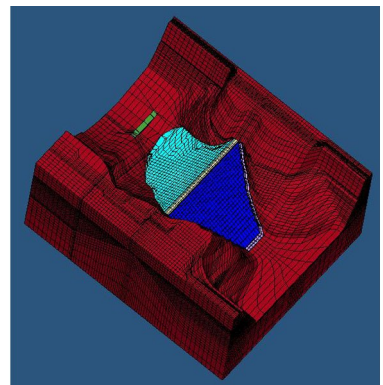


图1 该混凝土面板堆石坝渗流三维有限元模型

根据设计资料,面板渗透系数取为 $1 \times 10^{-10}$  m/s,垫层渗透系数取为 $1.5 \times 10^{-5}$  m/s,过渡层渗透系数取为 $5 \times 10^{-4}$  m/s,主堆石区渗透系数取为 $4 \times 10^{-3}$  m/s,次堆石区渗透系数取为0.04 m/s,趾板渗透系数取

为  $1 \times 10^{-10}$  m/s,帷幕渗透系数取为  $1.5 \times 10^{-7}$  m/s,岩体渗透系数取为  $3 \times 10^{-7}$  m/s。

### 2.3 计算工况

该水电站工程区渗流场的模拟中,分析区域基础底边界、上下游截取边界取为不透水边界,分析区域上游水位取正常蓄水位 365.00 m,下游水位取 284.00 m,上下游水位以下的坝面及河床均视为已知边界,量水堰外取 0 孔压边界。左右岸边界依照地下水水位取为地下水水头边界。坝体下游河床水位以上、左右两岸截取边界水位以下部分地表,均视为可能溢出边界,需经有限元软件迭代计算后确定真正溢出区域。

在该三维有限元模型的基础上,在 LL4、LL5 面板之间以及 LL0、LL1 面板之间设置一排宽度为 12 mm 的单元用来模拟垂直缝。并将 LL0 和 LL1 面板之间垂直缝按高程分为三等分,其中高程 276 ~ 305.2 m 之间为下部缝、高程 305.2 ~ 334.5 m 之间为中部缝、高程 334.5 ~ 363.7 m 之间为上部缝。为了分析不同位置、不同高程面板垂直缝止水发生不同程度劣化时,通过面板渗漏量、量水堰测得渗漏量及渗透坡降的变化规律,探究量水堰测值能否反映面板垂直缝止水劣化,拟定渗流计算工况如下:

a. 正常工况。根据埋在垂直缝内测缝计实测资料,得出正常运行情况下面板垂直缝开度,计算出垂直缝渗透系数,模拟正常工况下渗流情况。

b. 面板垂直缝止水劣化工况。通过分别增大 LL4 和 LL5 面板之间、LL0 和 LL1 面板之间垂直缝单元及上部缝、中部缝、下部缝单元的渗透系数(由混凝土完好情况下渗透系数逐渐增大至  $1 \times 10^{-4}$  m/s),模拟面板左岸垂直缝、中间垂直缝及不同高程的中间垂直缝止水劣化过程中的渗流。

## 2.4 计算结果与分析

### 2.4.1 正常工况

由布置在该面板堆石坝垂直缝内测缝计监测资料可知,从 2012 年 4 月 6 日至 2015 年 12 月 24 日,面板垂直缝开度随水位、温度发生变化,变化范围在  $-2.38 \sim 7.30$  mm 之间(张开为正,闭合为负)。裂隙开度与水力传导系数的关系式为<sup>[19]</sup>

$$k_f = \frac{\beta g b^2}{12\nu c} \quad (6)$$

式中: $k_f$  为水力传导系数; $g$  为重力加速度; $\beta$  为裂隙的连续性系数(裂隙的张开面积与总面积之比),取为  $6.005 \times 10^{-4}$ ;  $b$  为裂隙平均张开度,取为  $-2.38 \sim 7.30$  mm;  $\nu$  为水的运动黏滞系数,取为  $1.0299 \times 10^{-6}$  kPa · s;  $c$  为决定于裂隙相对粗糙度的系数,取为 0.5。

将上述各水力系数代入式(6)中计算可得,正

常运行情况下垂直缝渗透系数在  $5.40 \times 10^{-9} \sim 5.08 \times 10^{-8}$  m/s 范围内。经 ABAQUS 软件进行有限元计算得出,正常工况下,通过面板渗漏量在 0.62 L/s 左右,量水堰测值在 4.53 L/s 左右。垫层区渗透坡降为 0.520,过渡层区渗透坡降为 0.117,主堆石区渗透坡降为 0.018,次堆石区渗透坡降为 0.008。浸润线在面板内急剧下降,之后几乎保持水平,表明面板具有较好的防渗性能。

### 2.4.2 面板垂直缝止水劣化工况

#### 2.4.2.1 渗透坡降和浸润面

通过 ABAQUS 软件对垂直缝止水劣化过程进行渗流计算,计算垫层区、过渡层区最大渗透坡降。由于篇幅限制,只列出面板中间垂直缝止水劣化计算结果,图 2 显示了渗透坡降随垂直缝渗透系数变化曲线,图 3 给出了渗透坡降随量水堰测值变化曲线。

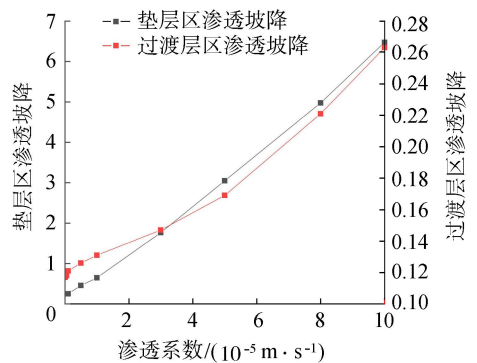


图 2 渗透坡降随垂直缝渗透系数变化曲线

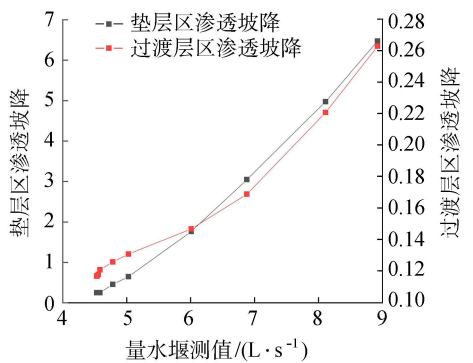


图 3 渗透坡降随量水堰测值变化曲线

由图 2 可知,当垂直缝渗透系数大于  $5 \times 10^{-5}$  m/s 时,垫层区渗透坡降超出允许值,垫层区可能发生渗透变形,危及坝体安全。为了能够更详细反映出由于垂直缝止水劣化导致坝体发生渗透破坏,在垂直缝渗透系数为  $5 \times 10^{-5}$  m/s、垫层区渗透坡降为 3.094 的基础上,模拟 LL0 和 LL1 面板之间垂直缝由高程 368 m 至高程 374.2 m 止水继续劣化,直至垂直缝渗透系数为  $1 \times 10^{-4}$  m/s。

由图 2 和图 3 对比可以看出,随渗透系数增大,垫层区、过渡层区最大渗透坡降逐渐增大,量水堰测



值也逐渐增大。量水堰测值能够反映出垫层区是否发生渗漏破坏,当垫层渗透坡降为 3.094 时,量水堰测值为 6.88 L/s。因此,在长期无降雨情况下,若量水堰测值超出 6.88 L/s,应当加以重视,及时检查,防止发生渗漏破坏。

由图 4 可知,相较于左岸垂直缝止水劣化,面板中间垂直缝止水劣化时浸润面上升范围较高,表明面板中间垂直缝止水劣化对渗流场影响较大。从面板中间垂直缝不同高程止水劣化对浸润面的影响可以看出,下部缝止水劣化时浸润面最高,上部缝止水劣化时浸润面最低,说明随止水劣化深度增加,止水劣化对渗流场影响逐渐增大。

#### 2.4.2.2 渗漏量

对垂直缝止水劣化过程进行模拟,计算出不同劣化情况下的渗漏量。图 5 显示了不同部位面板垂直缝止水劣化对量水堰测值和通过面板渗漏量的影响。

由计算结果可知,随面板垂直缝止水劣化,垂直缝渗透系数逐渐增大,当垂直缝渗透系数小于垫层渗透系数  $1.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  时,通过面板渗漏量及量水堰测值基本保持不变(图 5);当垂直缝渗透系数大于垫层渗透系数  $1.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  后,通过面板渗漏量增大较为明显,同时量水堰能够测出渗漏量的增大。由量水堰测值及通过面板渗漏量的比较可知,量水

堰不能完全测出通过面板的渗漏量。由面板左岸垂直缝和面板中间垂直缝止水劣化的计算结果比较可知,面板中间垂直缝止水劣化时引起渗漏量变化更为显著。由面板中间垂直缝不同高程止水劣化的计算结果比较可知,随高程降低,垂直缝止水劣化引起的渗漏量增大更为明显。因此可以判断面板中间垂直缝止水劣化较面板左岸垂直缝止水劣化对渗漏量影响更大,面板下部垂直缝止水劣化较面板上部和中部分垂直缝止水劣化对渗漏量影响更大。

### 3 结论

a. 随面板止水劣化,面板中间垂直缝较面板左岸垂直缝引起的渗漏量更大、浸润线上升更为明显;面板中间垂直缝随高程降低,引起的渗漏量增加、浸润线上升更为明显。

b. 当垂直缝渗透系数大于垫层渗透系数时,垫层区最大渗透坡降超出允许值,垫层区可能发生渗透变形,导致渗透破坏。通过建立渗透坡降与量水堰测值关系,可以由量水堰测值及时反映垫层区渗流规律。在长期无降雨情况下,若量水堰测值超出垫层发生渗透破坏时对应的量水堰测值时,应当加以重视,及时检查,避免发生渗漏破坏,保持坝体渗流安全。

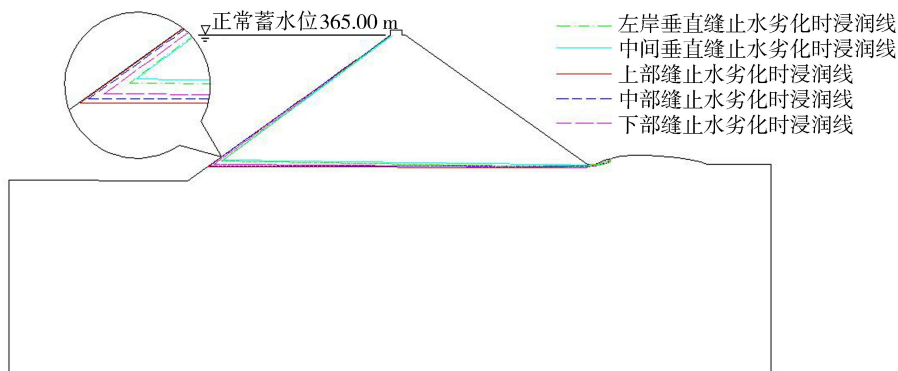


图 4 面板破坏情况下浸润面分布

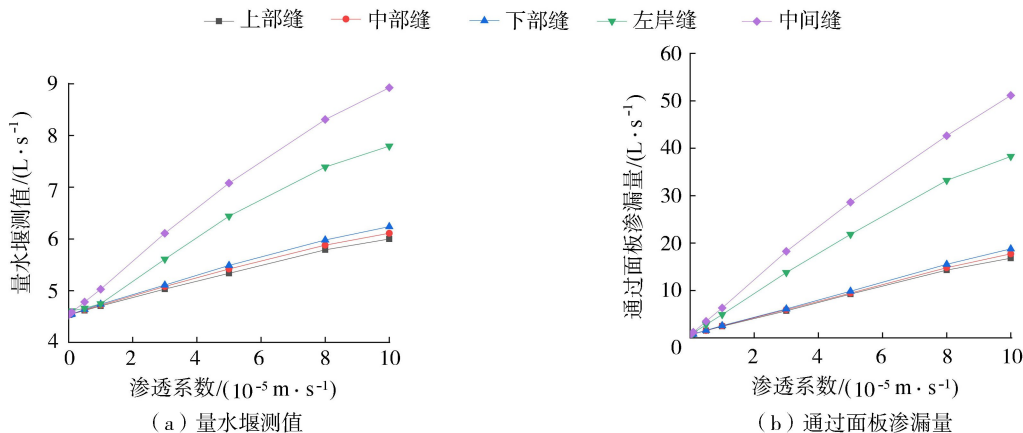


图 5 不同部位面板垂直缝止水劣化对量水堰测值和通过面板渗漏量的影响

## 参考文献:

- [ 1 ] WANG Renkun, CHEN Lin, ZHANG Chong. Seismic design of Xiluodu ultra-high arch dam[J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(4): 288-301.
- [ 2 ] 李海成. 砼面板堆石坝止水失效对坝后渗流场影响的研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2011.
- [ 3 ] 陈军强, 蔡新合, 党发宁. 混凝土面板堆石坝垂直缝止水失效后的集中渗流场分析[J]. 西北水电, 2009(1): 16-20. (CHEN Junqiang, CAI Xinhe, DANG Faning. Analysis of concentrated seepage field due to failure of CFRD vertical joint water stops [J]. Northwest Hydropower, 2009(1): 16-20. (in Chinese))
- [ 4 ] 潘少华, 毛新莹, 白正雄. 面板坝垂直缝止水失效渗流场有限元模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊): 145-148. (PAN Shaohua, MAO Xinying, BAI Zhengxiang. Seepage field finite element simulation of faced rockfill dam under cases of vertical joints and seal failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup): 145-148. (in Chinese))
- [ 5 ] 熊璐, 党发宁, 张海峰, 等. 某混凝土面板堆石坝止水失效后的渗流场分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 80-83. (XIONG Lu, DANG Faning, ZHANG Haifeng, et al. Seepage field analysis of concrete faced rockfill dam due to water stop system failure[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(6): 80-83. (in Chinese))
- [ 6 ] 孙玉莲, 兰驷东, 严俊, 等. 混凝土面板堆石坝运行期存在的渗流问题及成因研究综述[J]. 中国水利水电科学院院报, 2016, 14(6): 431-435. (SUN Yulian, LAN Sidong, YAN Jun, et al. Research on seepage problem and character of concrete face rock-fill dam under operating period[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016, 14(6): 431-435. (in Chinese))
- [ 7 ] ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, DENG Zhao. A simplified physically-based breach model for a high concrete-faced rockfill dam: A case study [J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(1): 46-52.
- [ 8 ] 陈守开, 严俊, 李健铭. 面板堆石坝垂直缝破坏下三维渗流场有限元模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3473-3476. (CHEN Shoukai, YAN Jun, LI Jianming. Seepage field 3D finite element simulation of concrete faced rockfill dam under failure condition of vertical fracture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3473-3476. (in Chinese))
- [ 9 ] 盛金保, 李雷. 混凝土面板坝渗流分析方法初探[J]. 水利水运科学研究所, 2000(2): 39-44. (SHEN Jinbao, LI Lei. Preliminary study on seepage analysis methods of concrete-face dams [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2000(2): 39-44. (in Chinese))
- [ 10 ] 丁留谦, 周晓光, 杨凯虹. 超高面板坝淤填自愈型止水结构可行性的初步研究[J]. 水利学报, 2001, 32(1): 76-80. (DING Liuqian, ZHOU Xiaoguang, YANG Kaihong. Study on siltation self-healing watertight structure for super-high CFRD [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(1): 76-80. (in Chinese))
- [ 11 ] 卢廷浩, 周爱兆, 刘尧. 高面板坝失效缝渗流模拟计算与讨论[J]. 四川大学学报, 2007, 39(增刊): 91-95. (LU Tinghao, ZHOU Aizhao. LIU Yao. Simulation and discussion on seepage analysis of CFRD joint failure[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 39(Sup): 91-95. (in Chinese))
- [ 12 ] CHEN Shoukai, HE Qidong, CAO Jigang. Seepage simulation of high concrete-faced rockfill dams based on generalized equivalent continuum model [J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(3): 250-257.
- [ 13 ] 王瑞骏, 吕东海, 李炎隆. 混凝土面板极端破坏情况下面板坝渗流特性研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(3): 37-40. (WANG Ruijun, LÜ Donghai, LI Yanlong. Study on seepage characteristics of CFRD under extreme condition of slabs being destroyed[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(3): 37-40. (in Chinese))
- [ 14 ] 李炎隆. 混凝土面板极端破坏情况下堆石坝渗流与应力变形特性研究[D]. 西安:西安理工大学, 2008.
- [ 15 ] 陈军强. 砼面板堆石坝止水失效机理研究及三维渗流场分析[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
- [ 16 ] 王子健, 刘斯宏, 李玲君, 等. 公伯峡面板堆石坝面板裂缝成因数值分析[J]. 水利学报, 2014, 45(3): 343-350. (WHANG Zijian, LIU Sihong, LI Lingjun. et al. Numerical analysis of the causes of slab's cracks on Gongboxia face rockfill dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(3): 343-350. (in Chinese))
- [ 17 ] 张宗亮. 超高面板堆石坝监测信息管理与安全评价理论方法研究[D]. 天津:天津大学, 2008.
- [ 18 ] 卢亚霞. 面板极端破坏情况下面板坝渗流分析[J]. 水利科技与经济, 2009, 15(1): 35-39. (LU Yaxia. FEM seepage analysis of CFRD under extreme condition of slabs being destroyed [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2009, 15(1): 35-39. (in Chinese))
- [ 19 ] 孙佳颖. 长屋脊水库大坝渗流场研究与坝坡稳定性分析[D]. 抚州:东华理工大学, 2009.
- [ 20 ] 张奇. 裂隙岩体渗流的理论及求解[J]. 水利水电科技进展, 1992, 12(4): 43-53. (ZHANG Qi. Theory and solution of seepage in fractured rock mass [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1992, 12(4): 43-53. (in Chinese))
- [ 21 ] 苏加林. 高寒地区混凝土面板堆石坝设计与施工[D]. 大连:大连理工大学, 2001.
- [ 22 ] 曹遼. 基于风险概念的高土石坝渗透破坏评价方法研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2018. (收稿日期:2018-07-17 编辑:雷燕)