

## 砂泥岩互层地基防渗措施渗控效果及敏感性分析

温立峰, 孙少博, 李炎隆, 王民侠, 张晨, 田欣

### Seepage control effect and sensitivity analysis of anti-seepage measures for sand-mudstone interbedded foundation

WEN Lifeng, SUN Shaobo, LI Yanlong, WANG Minxia, ZHANG Chen, and TIAN Xin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312023>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于离心机和数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析

An analysis of the deformation characteristics of soft-hard interbedded anti-tilting layered rock slope based on centrifuge and numerical simulation

李彦奇, 黄达, 孟秋杰 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 141-150

#### 管道流模型参数敏感性分析及其在许家沟泉域的应用

A sensitivity analysis of conduit flow model parameters and its application to the catch area of the Xujiagou spring

武亚遵, 李彦涛, 林云, 曲鹏冲 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 68-75

#### 基坑降水对声纳渗流检测精度的影响分析

Influence of foundation pit dewatering on sonar seepage detection accuracy

江杰, 魏丽, 钟有信, 胡盛斌, 杨杉楠 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 73-80

#### 基于iTOUGH2的生物降解模型全局敏感性时变分析

Temporal variation of global sensitivity analysis for biodegradation model using iTOUGH2

杜建雯, 施小清, 徐红霞, 吴吉春 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 35-42

#### 膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析

A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope

陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 132-140

#### 赣江新干航电枢纽左库岸地下水浸没控制效果研究

Research on the control effects of groundwater immersion on the left reservoir bank of Xingan Navigation and Power Junction in Ganjiang River

张宇, 任国澄, 杨蕴, 周志芳, 郭生根, 熊鸿强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 147-155



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312023

温立峰, 孙少博, 李炎隆, 等. 砂泥岩互层地基防渗措施渗控效果及敏感性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 163-173.  
WEN Lifeng, SUN Shaobo, LI Yanlong, et al. Seepage control effect and sensitivity analysis of anti-seepage measures for sand-mudstone interbedded foundation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 163-173.

## 砂泥岩互层地基防渗措施渗控效果及敏感性分析

温立峰<sup>1</sup>, 孙少博<sup>1</sup>, 李炎隆<sup>1</sup>, 王民侠<sup>2</sup>, 张 晨<sup>2</sup>, 田 欣<sup>2</sup>

(1. 旱区水工程生态环境全国重点实验室(西安理工大学), 陕西 西安 710048;  
2. 陕西省水利电力勘测设计研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710001)

**摘要:** 砂泥岩互层岩体是一种典型的复杂地质条件, 其渗流场分布规律复杂, 且传统渗流分析方法难以准确描述该规律。文章提出砂泥岩互层地基等效渗流场计算方法, 揭示砂泥岩互层地基渗流场分布规律及不同渗控方案对其的影响。首先根据砂泥岩互层地基构造特点, 提出基于土体分层渗流的砂泥岩互层地基等效渗流场计算方法; 进而基于砂泥岩互层地基上的普化水库工程, 建立反映工程区地质条件、枢纽布置和防渗措施的三维渗流场有限元计算模型; 并讨论了砂泥岩互层岩体渗透各向异性对渗流场的影响, 分析了不同防渗帷幕深度和长度组合方案对砂泥岩互层地基渗流场的控制效果。研究表明: (1) 帷幕未完全截断透水层时, 加深防渗帷幕深度可以明显降低坝基及两岸山体渗流量, 使两岸山体溢出点渗透坡降逐渐减小, 而使坝基部位和防渗帷幕的渗透坡降逐渐增加; (2) 延长防渗帷幕长度可以降低两岸山体渗流量和渗透坡降, 且帷幕长度增加只对帷幕加长侧渗流场产生较大的影响, 但是随着帷幕长度进一步增加, 对防渗效果提升的作用逐渐减弱; (3) 砂泥岩互层地基渗流呈现各向异性特点, 通过设置合理的防渗帷幕深度和长度可以有效控制地基的渗流量。研究成果可为砂泥岩互层地基的渗流控制提供理论参考。

**关键词:** 砂泥岩互层地基; 渗流场; 渗控效应; 数值分析; 防渗帷幕

中图分类号: TV223.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)03-0163-11

## Seepage control effect and sensitivity analysis of anti-seepage measures for sand-mudstone interbedded foundation

WEN Lifeng<sup>1</sup>, SUN Shaobo<sup>1</sup>, LI Yanlong<sup>1</sup>, WANG Minxia<sup>2</sup>, ZHANG Chen<sup>2</sup>, TIAN Xin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area (Xi'an University of Technology), Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710001, China)

**Abstract:** Sand-mudstone interbedded rock mass presents a typical complex geological condition, with a highly intricate seepage field distribution. Traditional seepage control analysis methods are difficult to accurately describe the behavior of the seepage field. Based on the innovative calculation method of the equivalent seepage field in the sand mudstone interlayer foundation, this study revealed the distribution pattern of the equivalent seepage field in the sand-mudstone interbedded foundation and the influence of different seepage control schemes on it. It proposed a calculation method for the equivalent seepage field of sand and mudstone interlayer foundation based

收稿日期: 2023-12-17; 修订日期: 2024-03-09

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2443230; 52479132); 陕西省教育厅科研计划项目(23JP113)

第一作者: 温立峰(1989—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事高堆石坝安全评价与变形控制相关的研究工作。

E-mail: [wenlifeng@xaut.edu.cn](mailto:wenlifeng@xaut.edu.cn)

on the structural characteristics of sand and mudstone interlayer foundation and the layered seepage of soil. Building upon this, a three-dimensional finite element seepage field computational model was developed for Puhua reservoir project, which incorporates the geological conditions, layout of the structure, and seepage control measures. The study investigated the influence of the permeability anisotropy of the sand-mudstone interbedded foundation on the seepage field, and analyzed the effects of different combinations of depths and lengths of impermeable curtains on the seepage flow and seepage gradient of the surrounding rock masses. The results show that when the permeable layer is not completely intercepted by the curtain, increasing the depth of the impermeable curtain can significantly reduce the seepage flow in the dam foundation and both abutment rock masses. Deepening the impermeable curtain reduces the seepage gradient at the seepage outflow point of the abutment rock masses while increasing the seepage gradient at the dam foundation and the impermeable curtain. Lengthening the impermeable curtain can reduce the seepage flow and seepage gradient of both abutment rock masses. Increasing the curtain length primarily affects the seepage flow field on the side where the curtain is extended, but further improvements in seepage control become less significant as the curtain lengthens. The seepage of sand-mudstone interbedded foundation exhibits anisotropic characteristics, and the seepage flow of the foundation can be effectively controlled by setting a reasonable depth and length of anti-seepage curtain. This study provides valuable insights for selecting seepage control measures on sand-mudstone interbedded foundations.

**Keywords:** sand-mudstone interbedded foundation; seepage field; seepage control effect; numerical analysis; grouting curtain

砂泥岩互层地基是一种分布广泛的沉积岩地基,具有岩性复杂、层内非均质性强、渗透各向异性、砂岩渗透性强等特点。砂泥岩互层地基分层和渗透各向异性的特点给修建水利工程带来了较为突出的渗流问题。比如,修建在砂泥岩互层地基上的鸭儿沟<sup>[1]</sup>、白龙潭<sup>[2]</sup>、红庄<sup>[3]</sup>、白鹤滩<sup>[4]</sup>和驮英水库<sup>[5]</sup>等坝基或坝肩均出现过较大的渗漏,后期不得不采用防渗加固措施减小渗漏量。研究砂泥岩互层地基渗流场分布规律,进而开展渗流控制效果研究至关重要。

国内外众多学者对砂泥岩互层地基开展了物理力学特性及渗流控制相关研究。在砂泥岩力学特性方面:王珂等<sup>[6]</sup>研究了砂泥岩地层强度特性,并依据应变能理论,建立了适合于砂泥岩互层地层的等效岩石力学参数计算模型;袁泉等<sup>[7]</sup>对层状岩体进行了不同加载速率的单轴压缩试验,发现加载速率对层状岩体单轴压缩特性具有重要影响;崔华龙等<sup>[8]</sup>基于不同层厚比的水平砂泥岩互层岩体三轴数值试验模型,发现层厚比对水平砂泥岩互层岩体力学特性具有重要影响,层厚比越小岩体黏聚力越大;高永青等<sup>[9]</sup>开展了中等应变率条件下红层砂泥岩互层的动三轴压缩试验,揭示了其动力学特性的围压效应和应变率效应;邓威等<sup>[10]</sup>构建了含裂隙近水平红层软岩边坡的室内物理试验模型,研究了边坡在长期雨水入渗作用下

的坡体变形、裂隙扩展和稳定性演变规律,发现岩体强度弱化和裂隙深层发育是造成红层软岩边坡滑动失稳的根本原因;陈洋等<sup>[11]</sup>对比评价了不同深度页岩的孔隙度、孔隙结构等参数特征,进一步明确了页岩孔隙随埋深变化的关系以及各种因素对孔隙的影响。

在渗透特性方面,马河图<sup>[12]</sup>和张钧堂等<sup>[13]</sup>根据砂泥岩的水理特性研究了泥岩的崩解特性,发现浸水时间越长,砂泥岩颗粒混合料的剪胀性越小,减缩现象越明显;王俊智等<sup>[14]</sup>基于压水试验数据,分析了砂泥岩透水率与高程、岩性及顺层剪切带的关系,阐明了砂泥岩坝基岩体的渗透结构;蒋小伟等<sup>[15]</sup>采用表征岩体渗透性的单位吸水量的参数,分析了砂泥岩中自重应力和岩性对渗透性空间分布规律的控制作用,砂泥岩岩性差异会引起较大的结构面发育差异进而改变岩体的渗透性;蒋小伟等<sup>[16]</sup>研究了小浪底水库砂泥岩地层渗透性与深度及岩性的关系,发现了单位吸水量随相对埋深呈负指数变化的规律;许强等<sup>[17]</sup>通过对主要地质灾害类型和成因机制的分析总结,发现砂泥岩互层特殊的岩性组合形成的特殊斜坡水文地质条件是使坝坡渗透失稳的重要原因。

部分学者对砂泥岩互层地基工程渗流场及渗流控制开展了研究。砂泥岩互层地基上已建水利工程及相关复杂地质条件下水利工程的渗漏试验结果<sup>[18-22]</sup>

表明, 虽然泥岩渗透系数较小, 但是砂泥岩互层地基并不属于相对隔水层, 库水易沿水平向的层理面和砂岩层形成渗漏通道产生渗透; 廖军等<sup>[23]</sup>基于饱和-非饱和渗流理论及等效渗透系数法, 阐明了边坡在降水作用下坡体内部渗流场的变化特征, 在降水入渗情况下, 地下水位抬升, 促使边坡内部孔隙水压力增大, 有效应力降低, 导致岩体抗剪强度降低, 边坡稳定性系数降低; 师文豪等<sup>[24]</sup>基于等效连续介质模型和 Louis 经验公式, 建立了各向异性岩体渗流应力耦合模型, 发现层状岩体结构面的高渗透性及其在层状边坡分布中的绝对优势, 导致层状边坡呈现出强烈的各向异性渗流特征; 邱珍锋<sup>[25]</sup>基于试验和数值模拟方法对砂泥岩互层岩体各向异性渗透特性进行研究, 发现各向异性渗流特性对坝体渗流场分布及坝坡稳定性具有重要影响, 各向异性系数增大使得浸润线抬升, 下游溢出点升高, 安全性降低。但目前对砂泥岩互层地基渗流场的认识并不充分, 特别是对于该类岩体的渗流控制方法认识不足, 砂泥岩互层地质构造复杂, 常规岩体地基渗流分析方法并不完全适用于该类岩体, 因此有必要对该类岩体工程的地质渗流场分布规律及渗流控制开展进一步深入研究。

本文根据砂泥岩互层地基构造特点, 提出了基于土体分层渗流的砂泥岩互层地基等效渗流场计算方法, 在此基础上以普化水库工程为依托, 建立反映砂泥岩互层地质条件、枢纽布置和防渗措施的三维渗流场有限元计算模型。在分析砂泥岩互层岩体渗流场分布规律的基础上, 探讨并揭示砂泥岩互层岩体渗透各向异性对渗流场的影响, 分析防渗帷幕深度和长度变化对渗流控制效果的影响, 并提出合理的渗流控制措施与建议。

## 1 砂泥岩互层地基渗流场计算方法

### 1.1 砂泥岩互层地层等效渗透系数计算方法

受砂岩和泥岩的渗透特征影响, 砂泥岩互层顺层方向即平行地层方向渗透性远大于切层方向即垂直地层方向的渗透性, 同时砂岩和泥岩的渗透系数存在明显差异。通常情况下砂岩渗透系数大, 泥岩渗透系数小, 渗流场数值计算应该按照具有各向异性特点的层状渗透结构考虑。由于砂泥岩互层两类岩体厚度通常较薄, 实际计算中难以真实考虑不同的砂岩和泥岩互层结构, 等效考虑砂泥岩互层结构特点的渗流场计算方法是一种较为可行的方法。

假设砂泥岩互层渗流如图 1 所示, 定义各单一岩

层厚度为  $D_i$ , 岩层总厚度为  $D$ , 顺层面单宽流量为  $q_{ix}$ , 切层面单宽流量为  $q_{iz}$ , 渗流流速为  $v$ , 各岩层顺层方向渗透系数为  $k_{ix}$ , 切层方向渗透系数为  $k_{iz}$ , 顺层等效渗透系数为  $k_x$ , 切层等效渗透系数为  $k_z$ , 与坐标主轴方向一致, 且均为常数, 上下游水头差值为  $\Delta h$ , 坝底长度为  $l$ 。

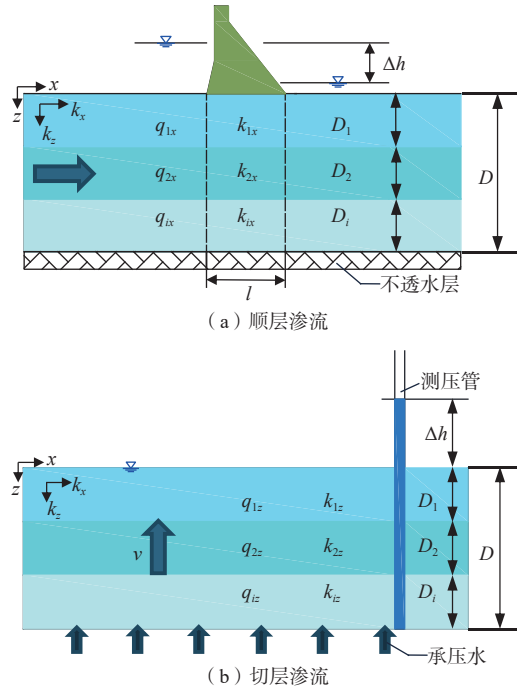


图 1 砂泥岩互层渗流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sand mudstone interbedded seepage

当水流方向平行于层面即进行顺层渗流时, 各分层单宽流量为:

$$q_i = k_{ix} D_i \frac{\Delta h}{l} \quad (1)$$

$$q = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{i=1}^n k_{ix} D_i \frac{\Delta h}{l} \quad (2)$$

式中:  $q$ ——通过岩体的总单宽流量 ( $\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ );

$n$ ——岩层层数。

显然, 将分层岩层等效替代为均质含水层其总厚度不变, 且在相同渗透坡降 ( $\Delta h/l$ ) 下渗流量相同, 可得:

$$q = k_x D \frac{\Delta h}{l} \quad (3)$$

$$k_x D \frac{\Delta h}{l} = \sum_{i=1}^n k_{ix} D_i \frac{\Delta h}{l} \quad (4)$$

因而求得顺层渗流等效渗透系数  $k_x$  为:

$$k_x = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^n k_i D_i \quad (5)$$

类似的,当水流方向垂直于层面即进行切层渗流时,通过岩体的渗流流速等于各层面渗流流速,岩体损耗的水头等于各层面损耗水头之和。可得各分层渗流流速即岩体渗流流速为:

$$v = v_i = k_{iz} \left( \frac{\Delta h_i}{D_i} \right) \tag{6}$$

式中:  $\Delta h_i$ ——各层面损耗水头/m。

$$\Delta h = \frac{vD}{k_z} = \sum_{i=1}^n \Delta h_i = v \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{k_{iz}} \tag{7}$$

因而求得切层渗流等效渗透系数( $k_z$ )为:

$$k_z = \frac{D}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{D_i}{k_{iz}} \right)} \tag{8}$$

### 1.2 渗流有限元分析基本方程

渗流运动在本质上受地下水的守恒方程和线性动量守恒方程控制,但其演化过程同时受初始条件、边界条件和计算参数的制约。根据达西定律和质量守恒原理,稳定渗流控制微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = 0 \tag{9}$$

式中:  $h$ ——水头/m;

$i$ ——顺层方向;

$j$ ——切层方向;

$k_{ij}$ ——渗透张量的分量;

$x_i$ —— $x$ 方向水力路径长度/m。

式(9)应满足如下边界条件:

(1)水头边界条件

$$h = \bar{h} \quad (\text{给定水头边界为 } \Gamma_h) \tag{10}$$

式中:  $\Gamma_h$ ——已知水头边界;

$\bar{h}$ ——已知水头/m。

(2)流量边界条件

$$q_n = -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_j \quad (\text{给定水头边界为 } \Gamma_q) \tag{11}$$

式中:  $\Gamma_q$ ——已知流量边界;

$q_n$ ——边界流量,渗入为负,溢出为正/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),对于隔水边界,  $q_n=0$ ;

$n_j$ ——边界面单位外法向向量的分量。

(3)自由面边界条件

$$h = z, q_n = 0 \quad (\text{给定水头边界为 } \Gamma_f) \tag{12}$$

式中:  $\Gamma_f$ ——自由面边界;

$z$ ——水体自由面高度。

(4)溢出面边界条件

$$h = z, q_n = k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_j < 0 \quad (\text{给定水头边界为 } \Gamma_s) \tag{13}$$

式中:  $\Gamma_s$ ——溢出面边界。

## 2 工程概况

普化水库位于陕西省麟游县境内漆水河上游。水库正常蓄水位和设计洪水位均为 946.50 m,总库容 1 581×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。枢纽工程由左、右岸挡水坝段,河床溢流坝段、底孔,取水坝段,左、右岸山体防渗帷幕组成。普化水库为Ⅲ等中型水库,坝型为碾压混凝土重力坝,最大坝高 59.50 m,坝顶长 217.00 m,坝顶宽 8.00 m。工程枢纽布置如图 2 所示。

坝址河谷为“U”形窄深河谷,岸坡大部基岩裸露,两岸基岩顶板高出河床 25~73 m,河床高程 897~927 m。库区两岸塬面较为宽厚,无单薄分水岭分布,无大的构造及断层分布。河谷底部强风化岩体分布较少,其厚度一般小于 5 m,河谷两岸强风化岩体分布差异较大,左、右岸分别厚约 14, 4 m。河谷底部弱风化岩体厚度约为 26 m,两岸厚 20~25 m。坝区主要岩性为三叠系二马营组砂泥岩,岩层产状近于水平,微向北倾斜,倾角 10°~12°,互层岩体较薄,单层厚度一般为 0.2~0.5 m,垂向岩性差异显著。坝轴线工程地质剖面图如图 3 所示。由相关工程实例推测,可能发生严重绕坝渗漏和邻谷渗漏。为了控制坝基和两岸渗流场,坝基设有防渗帷幕并延长深入至两岸坝肩山体。由坝内灌浆廊道及两岸灌浆平洞向下灌浆形成防渗帷幕。防渗帷幕采用单孔设计,孔距 2 m。两岸山体帷幕与坝基帷幕相接,形成统一帷幕体系以减少绕坝渗流。坝基灌浆廊道设主排水孔,入岩深 10 m,孔距 2 m。

## 3 计算模型

### 3.1 有限元模型

为了获得合理准确的渗流场计算结果,消除计算边界对工程区渗流场的影响,模型计算范围为上游侧边界取距离坝址 486.12 m(约 8 倍坝高),下游侧边界取距离坝址 1 102.56 m(约 18 倍坝高)。右岸边界距坝轴线中点 1 178.14 m(约 20 倍坝高),右侧边界尽量取在山体分水岭位置。左岸边界取邻谷河床底部和下游侧河道底部。整个计算模型东西方向最大距离为 1 183.00 m,南北方向最大距离为 1 284.00 m,模型最低高程为 507.00 m,最高高程为 1 089.00 m。计算模型真实考虑大坝、坝基帷幕、坝基不同地层以及卸荷裂

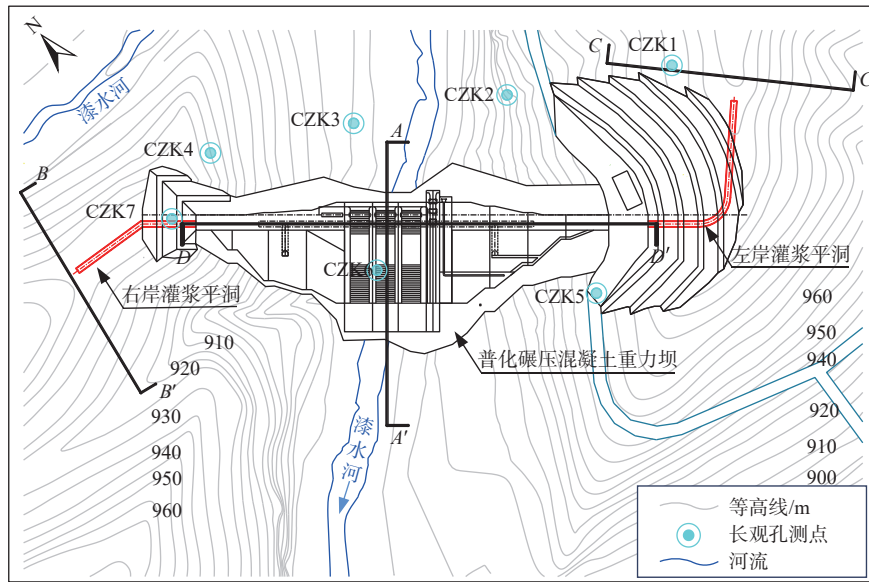


图 2 工程枢纽布置图

Fig. 2 Layout of project hub

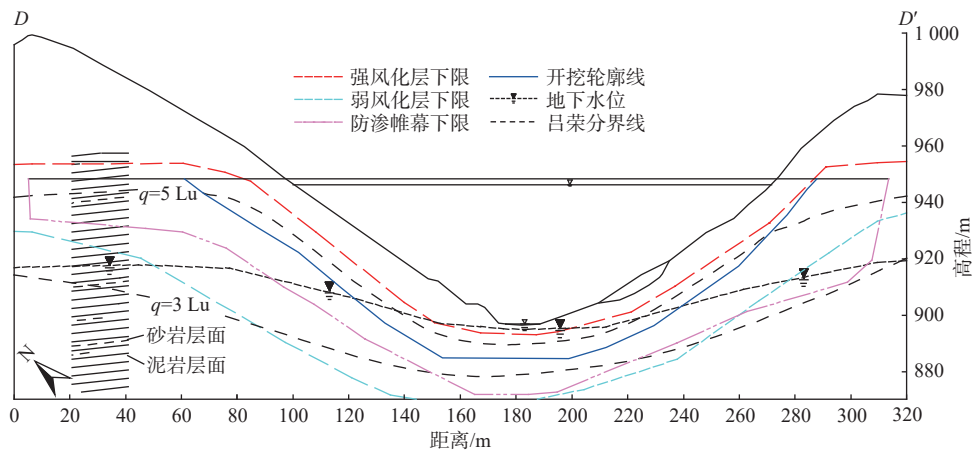


图 3 坝轴线工程地质剖面图

Fig. 3 Engineering geological profile of dam axis

隙。有限元计算模型如图 4 所示。

采用 4 节点等参数单元对模型进行网格剖分, 共划分节点 55 591 个, 节点单元 312 896 个。模型上下游河道水位以下施加定水头边界, 其他部位施加潜在出溢边界。模型底部和上下游侧面边界为不透水边界。模型右侧施加根据钻孔探测的地下水位拟合确定的定水头边界。坝基排水孔幕采用以线代孔法<sup>[26-27]</sup>模拟, 真实模拟排水孔的位置并施加定水头值。

### 3.2 计算参数

根据所提供水文地质资料, 以及钻孔压水试验结果, 初步确定了各岩层渗透系数范围。在此基础上采用等效渗透系数方法确定砂泥岩互层顺层和切层方向的等效渗透系数范围。为了进一步确定合理准确的等效渗透系数, 通过不同等效渗透系数的迭代计

算, 采用最小二乘法原理拟合计算水位与实测水位的误差, 以反演确定误差最小的等效渗透系数。具体过程为: 从确定的等效渗透系数范围内, 任意选取一组等效渗透系数, 代入到天然渗流场计算模型进行计算, 将计算结果与实测钻孔水位进行对比, 并采用最小二乘法拟合计算水位与钻孔实测水位的误差, 根据误差的大小, 多次调整选取的等效渗透系数进行初始渗流场计算, 直至最小二乘法拟合的误差满足精度要求, 得出最优的等效渗透系数取值。最终确定各岩层渗透系数如表 1 所示。大坝混凝土和坝基防渗帷幕的渗透系数分别取为  $1.00 \times 10^{-9}$  m/s 和  $1.00 \times 10^{-8}$  m/s。

反演分析获得的工程区天然渗流场各钻孔(图 2)水位拟合误差如图 5 所示。各钻孔实测水位与反演水位相对误差绝对值最大为 5.10%, 绝对误差平均低于

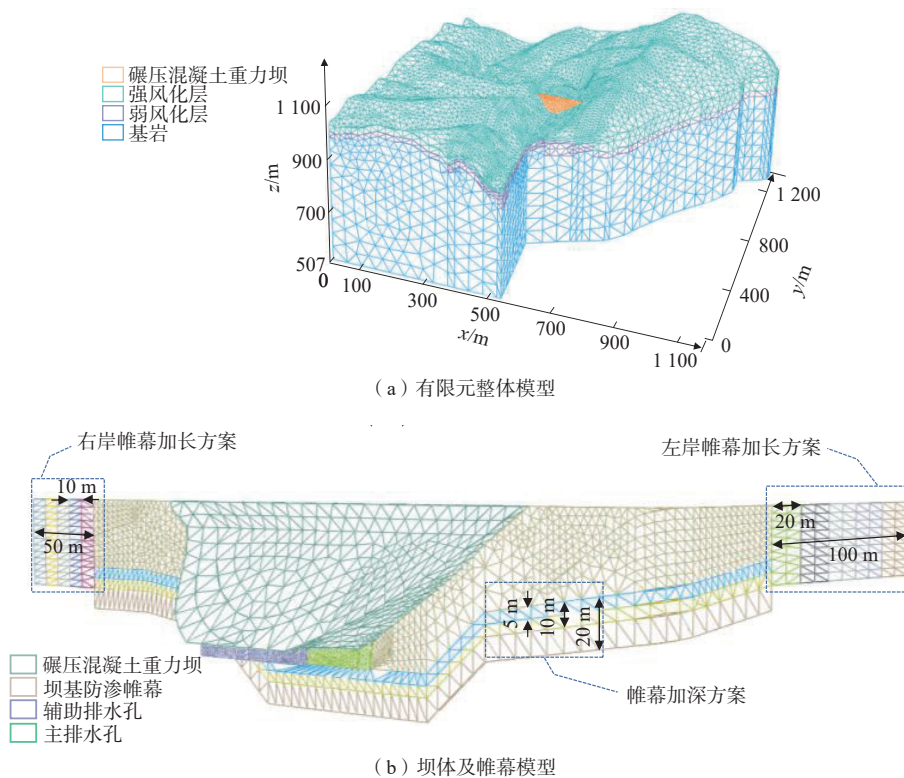


图 4 有限元计算模型

Fig. 4 Finite element simulating calculation

注: 右岸帷幕加长方案、左岸帷幕加长方案的不同颜色对应不同加长方案, 未在图例中逐一说明。

表 1 等效渗透系数取值范围与反演值

Table 1 Value range and inversion value of permeability coefficient of each part

岩层	岩层产状	顺层渗透性			切层渗透性			
		渗透率/Lu	等效渗透系数 $/(m \cdot s^{-1})$	反演渗透系数 $/(m \cdot s^{-1})$	渗透率/Lu	等效渗透系数 $/(m \cdot s^{-1})$	反演渗透系数 $/(m \cdot s^{-1})$	
强风化层	砂岩	各向异性	>100	$8.31 \times 10^{-6} \sim 6.59 \times 10^{-5}$	$5.17 \times 10^{-5}$	>100	$5.16 \times 10^{-6} \sim 3.55 \times 10^{-5}$	$2.12 \times 10^{-5}$
	泥岩	各向异性	>30			>22		
弱风化层	砂岩	各向异性	>100	$6.70 \times 10^{-7} \sim 3.24 \times 10^{-6}$	$1.40 \times 10^{-6}$	>100	$1.53 \times 10^{-7} \sim 0.67 \times 10^{-6}$	$8.30 \times 10^{-7}$
	泥岩	各向异性	5.73 ~ 23.60			3.51 ~ 7.98		
微新岩层	砂岩	各向异性	2.87 ~ 12.60	$4.59 \times 10^{-7} \sim 9.73 \times 10^{-7}$	$6.25 \times 10^{-7}$	1.18 ~ 3.54	$0.36 \times 10^{-7} \sim 4.93 \times 10^{-7}$	$1.20 \times 10^{-7}$
	泥岩	各向异性	0.77 ~ 2.18			0.21 ~ 1.53		

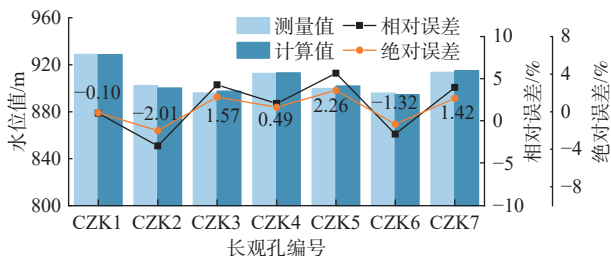


图 5 钻孔实测和反演计算水位对比

Fig. 5 Comparison of measured and inversed water levels by drill

2 m, 天然渗流场反演分析得到的计算水位与实测水位吻合良好。考虑到天然三维渗流场的复杂性并与同

等工程对比<sup>[28-30]</sup>, 认为反演选取的各地层等效渗透参数是合理的, 可以用于工程枢纽区渗控方案分析和计算。

### 3.3 计算工况

根据工程规模, 普化水库大坝坝基防渗帷幕设计深度标准初步取为 5 Lu, 由于左右岸地下水位线和相对不透水层分布较远, 按照规范要求, 防渗帷幕与截断相对不透水层或与地下水位相交情况下的帷幕范围过大, 为此研究根据工程水文地质实际情况, 初步建议了设计帷幕布置方案, 在此基础上为了研究不同帷幕布置深度和长度对渗流场的影响, 进一步优化防渗帷幕的布置, 本文共进行了 14 组工况的计算。分

别对不同帷幕深度及长度布置方案下库区渗流场进行渗流计算,分析砂泥岩互层的渗流场分布规律以及

岩体渗透各项异性对渗流场的影响。具体计算工况如表 2 所示,方案示意图如图 4(b)所示。

表 2 计算工况  
Table 2 Load cases

计算工况	工况编号	防渗帷幕方案	
		深度	两岸长度
设计帷幕布置方案	工况1	嵌入相对3 Lu线以下5 m	左岸100 m,右岸70 m
帷幕深度敏感性分析	工况2—4	加深5, 10, 20 m	左岸100 m,右岸70 m
左岸帷幕长度敏感性分析	工况5—9	加深10 m	左岸延长20, 40, 60, 80, 100 m
右岸帷幕长度敏感性分析	工况10—14	加深10 m	右岸延长10, 20, 30, 40, 50 m

## 4 结果

工程区 3 个典型剖面(图 2)水头等值线结果如图 6 所示。为了对比分析砂泥岩互层渗透各项异性对渗流场的影响,将不考虑互层特性的渗流场分布结果也表示在图中。结果表明坝基剖面水头等值线大部分消

纳在坝基帷幕部位,表明大坝底部防渗帷幕及排水措施组成的联合渗流控制系统渗控效果良好,如图 6(a)所示。右岸渗流场呈现由库区绕过山体向下游渗流的趋势,总水头等值线在帷幕部位分布密集且绕过帷幕后水头下降明显,如图 6(b)所示。左岸渗流场呈现由库区向相邻沟道渗流的趋势,水头等值线在防渗帷幕处分布密集,防渗帷幕底部水头下降明显,表明防渗帷幕取得较好的防渗效果,渗流溢出点在靠近沟道底部的部位,如图 6(c)所示。不考虑互层特性情况下各剖面水头等值线分布基本一致,水头等值线分布更加均匀,考虑互层特性情况下水平方向水头值下降相对较快,这是因为砂泥岩互层顺层方向渗透性较大。

计算得到枢纽工程区水库总渗流量为 2 263.00 m<sup>3</sup>/d,占水库总库容的万分之 1.43,其中左、右岸山体区域总渗流量为 1 701.37 m<sup>3</sup>/d。坝基和坝基排水孔区域总渗流量为 561.63 m<sup>3</sup>/d。总体而言,工程区的渗流情况得到了较好的控制。两岸山体和坝体各断面在帷幕底部或端部、山体溢出点的流速相对较大,相应部位渗透坡降也较大。其中左岸山体最大渗透坡降发生在山脊厚度较单薄的部位,最大值为 0.18。右岸山体最大渗透坡降发生在下游侧溢出点的部位,最大值为 0.16。不考虑互层渗流特性的情况下,最大渗透坡降发生部位相近,但是渗透坡降总体相对较小,左岸最大值为 0.14,右岸最大值为 0.11。

## 5 分析与讨论

### 5.1 帷幕深度对渗流场的影响

不同防渗帷幕深度下,库区渗流场分布基本一致,总水头等值线在帷幕部位分布密集且绕过帷幕后水头下降,随着防渗帷幕加深,水头下降更为显著。库区渗流量和渗透坡降随帷幕深度变化规律如图 7—8 所示。

结果表明随着防渗帷幕的加深,不同部位渗流量基本上随着帷幕深度的增加呈线性降低的趋势,帷幕

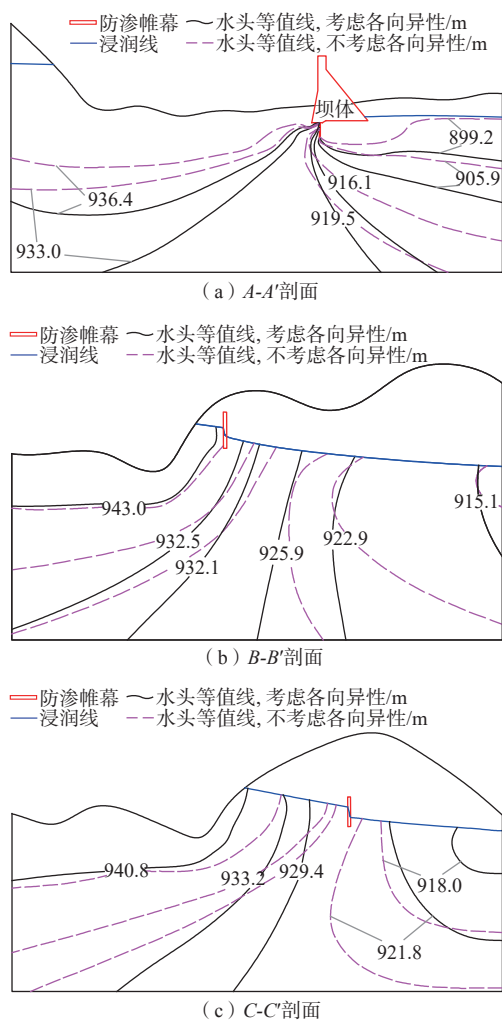


图 6 典型剖面水头等值线图

Fig. 6 Contour map of typical section head

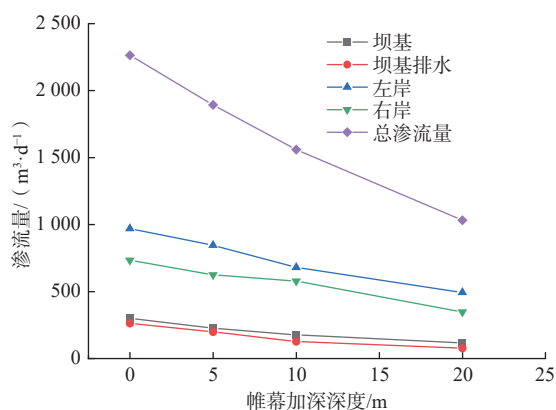


图 7 渗流量随帷幕深度变化规律

Fig. 7 Changes in seepage flow with curtain depth

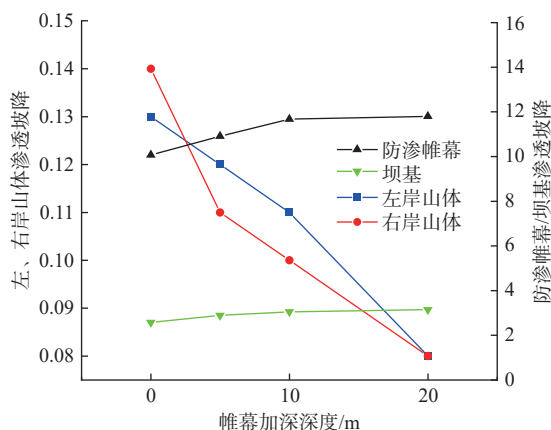


图 8 渗透坡降随帷幕深度变化规律

Fig. 8 Changes in hydraulic gradient with curtain depth

分别加深 5, 10, 20 m 情况下总渗流量分别减少 370.89, 704.68, 1 231.73 m<sup>3</sup>/d。其中坝基渗流量分别减少了 74.57, 123.58, 183.94 m<sup>3</sup>/d; 坝基排水渗流量分别减少了 63.23, 135.96, 186.36 m<sup>3</sup>/d; 左岸渗流量分别减少了 123.69, 289.61, 475.80 m<sup>3</sup>/d; 右岸渗流量分别减少了 108.75, 155.10, 385.99 m<sup>3</sup>/d。各部位渗流量均有较为明显的降低。结果表明帷幕深度增加可以有效提高渗漏控制效果。这是因为帷幕深度增加可以有效截断坝基和两岸渗水地层, 延长渗径。

随着防渗帷幕加深, 两岸山体溢出点渗透坡降逐渐减小, 左岸最大值仍出现在山体较薄部位溢出点, 右岸最大值出现在下游侧溢出点。坝基部位和防渗帷幕的渗透坡降随着帷幕的加深而增加, 最大值分别出现在防渗帷幕底部基岩及防渗帷幕底部。由于帷幕加深有效延长渗径, 因此左、右岸山体溢出点渗透坡降明显减小, 而帷幕加深情况下帷幕降低的水头值更大, 在帷幕底部水头差增加, 因此帷幕和帷幕底部基岩处渗透坡降相应增加。

### 5.2 左岸帷幕长度对渗流场的影响

在不同左岸防渗帷幕长度工况下, 工程区渗流场分布规律基本一致, 只在帷幕加长部位存在一定的差异。水头等值线在帷幕部位分布较为密集且绕过帷幕后水头下降。随着左岸防渗帷幕加长, 左岸水头下降更为显著。库区渗流量和渗透坡降随左岸帷幕长度变化规律如图 9—10 所示。

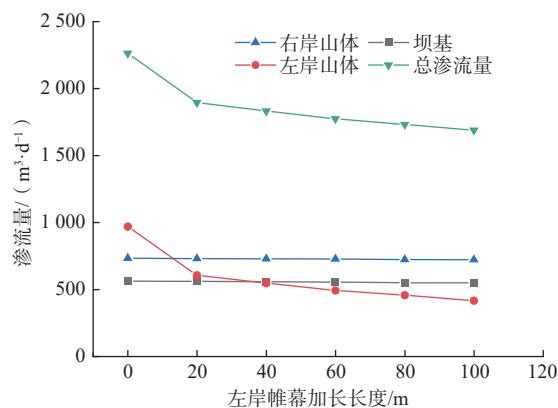


图 9 渗流量随左岸帷幕长度变化规律

Fig. 9 Changes in seepage discharge with curtain length on the left bank

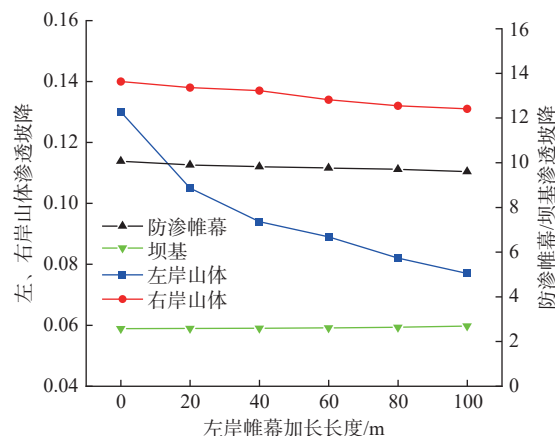


图 10 渗透坡降随左岸帷幕长度变化规律

Fig. 10 Changes in hydraulic gradient with curtain length on left bank

结果表明工程区左岸山体渗流量随着帷幕的加长而逐渐减小。左岸帷幕加长 20 m 时渗流量明显减少, 减少量达 363.35 m<sup>3</sup>/d, 防渗帷幕进一步加长情况下渗流量呈线性减少, 但减少速率相对较低, 帷幕平均每加长 10 m 渗流量减少 25.91 m<sup>3</sup>/d。左岸防渗帷幕加长对其余部位渗流量影响较小, 右岸山体和坝基渗流量基本稳定在 720 m<sup>3</sup>/d 和 550 m<sup>3</sup>/d 左右。左岸帷幕加长可有效减小左岸山体的渗流通道, 因此左岸山体渗流量有所减少, 帷幕进一步加长情况下由于整体渗流通道相对减小, 因此进一步提高防渗效果的作用逐渐

减弱。只增加左岸帷幕长度情况下由于坝基和右岸渗流条件基本不变, 因此相应部位的渗流量变化不大。

左岸山体渗流溢出点最大渗透坡降随着左岸防渗帷幕加长而减小, 防渗帷幕加长 20 m 前渗透坡降减小显著, 帷幕继续增加, 坡降减小趋势逐渐减弱并趋于平缓。由图 10 可知, 当左岸防渗帷幕加长长度达 100 m 时, 左岸山体的溢出点最大渗透坡降达到最小值 0.077。结果表明加长左岸山体防渗帷幕长度, 能够有效延长渗径, 减小左岸的渗透坡降, 但是对其他部位渗透坡降影响较小, 原因与对渗流量变化规律的分析一致。

### 5.3 右岸帷幕长度对渗流场的影响

在不同右岸防渗帷幕长度工况下, 工程区渗流场分布规律基本一致, 只在帷幕加长部位存在一定的差异。水头等值线在帷幕部位分布较为密集且绕过后水头下降。随着防渗帷幕加长, 右岸水头下降更为显著。库区渗流量和渗透坡降随右岸帷幕长度变化规律如图 11—12 所示。

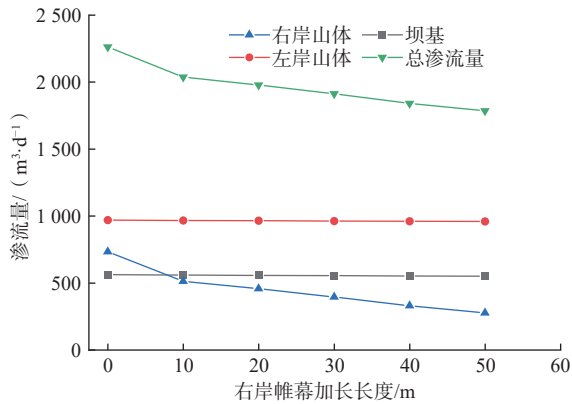


图 11 渗流量随右岸帷幕长度变化规律

Fig. 11 Changes in seepage discharge with curtain length on the right bank

结果表明工程区右岸山体渗流量随着帷幕的加长而减小。渗流量在防渗帷幕加长 10 m 前减少显著, 之后渗流量呈线性减少, 平均每加长 10 m 渗流量减少 48.08 m³/d。其余部位渗流量受右岸帷幕范围变化的影响较小, 左岸山体和坝基渗流量基本稳定在 960 m³/d 和 550 m³/d 左右。右岸帷幕加长可有效减小右岸山体的渗流通道, 因此右岸山体渗流量有所减小, 帷幕进一步加长的情况下由于整体渗流通道相对减小, 防渗效果逐渐减弱。只增加右岸帷幕长度的情况下, 由于坝基和左岸渗流条件基本不变, 因此相应部位的渗流量变化不大。

随着右岸防渗帷幕加长, 右岸山体溢出点最大渗透坡降在防渗帷幕加长 10 m 前显著减小, 帷幕进一步

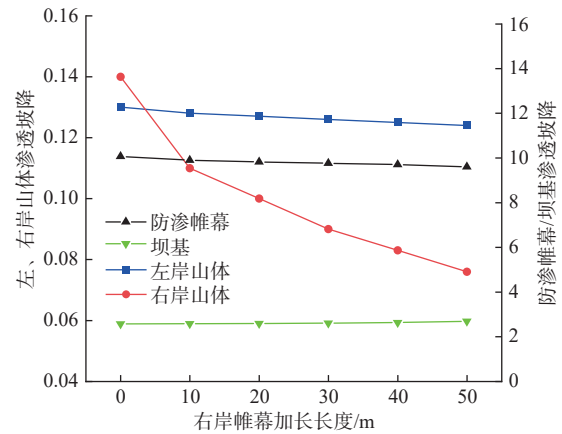


图 12 渗透坡降随右岸帷幕长度变化规律

Fig. 12 Changes in hydraulic gradient with curtain length on right bank

增加对渗透坡降影响逐渐减小, 当帷幕加长长度达 50 m 时, 右岸山体的渗透坡降达到最小值 0.074。结果表明, 加长右岸山体防渗帷幕长度, 能够有效延长渗径, 减小右岸的渗透坡降, 但是对其他部位渗透坡降影响较小, 原因与对渗流量变化规律的分析一致。

## 6 结论

(1) 由于砂岩和泥岩具有不同渗透性特征, 砂泥岩互层顺层方向渗透性远大于切层方向的渗透性, 同时砂岩和泥岩的渗透系数存在明显差异。由于砂泥岩互层 2 类岩体厚度通常较薄, 实际计算中通常难以真实考虑不同的砂岩和泥岩互层结构, 基于土体分层渗流的砂泥岩互层地基等效渗透系数计算方法是砂泥岩互层地基渗流场计算较为合理可行的方法。

(2) 加深防渗帷幕深度可以降低坝基及两岸山体渗流量, 其中坝基部位的渗流量下降明显。随着帷幕深度的增加, 使两岸山体溢出点渗透坡降逐渐减小, 而使坝基部位和防渗帷幕的渗透坡降逐渐增加。帷幕深度增加可以有效提升渗流控制效果。

(3) 加长左、右岸山体防渗帷幕长度可以降低两岸山体渗流量, 并降低两岸山体渗透坡降。但是帷幕长度增加只对帷幕加长侧渗流场产生较大的影响, 且随着帷幕长度不断增加, 对防渗效果进一步提升的作用逐渐减弱。通过加长两岸防渗帷幕长度可以较为有效地提升渗流控制效果。

### 参考文献 (References) :

[1] 高全新. 鸭儿沟水库两坝肩渗漏勘察方法及几点想法 [J]. 陕西水利, 2013(3): 81 - 83. [GAO Quanxin. Exploration method and several thoughts on leakage of

- two dam shoulders in Yaergou reservoir[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2013(3): 81 - 83. (in Chinese with English abstract)
- [ 2 ] 徐勇. 白龙潭水库工程地质问题评价分析[J]. *河南水利与南水北调*, 2022, 51(8): 63 - 64. [ XU Yong. Evaluation and analysis of engineering geological problems of Baishongtan Reservoir[J]. *Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion*, 2022, 51(8): 63 - 64. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 冯峰. 延安市红庄水库单薄山梁帷幕防渗处理浅析[J]. *山西建筑*, 2010, 36(26): 364 - 365. [ FENG Feng. On analysis of impervious curtain treatment of thin mountain ridges in Hongzhuang reservoir in Yan'an[J]. *Shanxi Architecture*, 2010, 36(26): 364 - 365. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 林诗哲, 胡新丽, 张海燕, 等. 白鹤滩水电站库区红层砂岩干湿循环下结构劣化及渗透性演化规律[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(5): 67 - 77. [ LIN Shizhe, HU Xinli, ZHANG Haiyan, et al. Structural degradation and permeability evolution of red sandstone undeldry-wet cycles in the Baihetan hydropower station reservoir area[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(5): 67 - 77. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 甘彬. 桂西南红层工程地质特性及工程效应研究——以驮英水库及灌区工程为例[J]. *广西水利水电*, 2023(3): 14 - 18. [ GAN bin. Study of engineering geological characteristics and engineering effects of red bed in Southwest Guangxi[J]. *Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering*, 2023(3): 14 - 18. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 王珂, 戴俊生, 冯阵东, 等. 砂泥岩间互地层等效岩石力学参数计算模型及其应用[J]. *地质力学学报*, 2013, 19(2): 143 - 151. [ WANG Ke, DAI Junsheng, FENG Zhendong, et al. Calculating model of equivalent rock mechanical parameters of Sand-Mud interbed and its application[J]. *Journal of Geomechanics*, 2013, 19(2): 143 - 151. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 袁泉, 薛炳勇, 谭彩, 等. 层状岩体单轴抗压强度的速率效应力学特性研究[J]. *矿业研究与开发*, 2019, 39(8): 58 - 62. [ YUAN Quan, XUE Bingyong, TAN Cai, et al. Study on the rate effect mechanical properties of uniaxial compressive strength of layered rock mass[J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(8): 58 - 62. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 崔华龙, 叶四桥. 层厚比对水平砂泥岩互层岩体抗剪强度参数的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(6): 78 - 83. [ CUI Hualong, YE Siqiao. Effect of different thickness ratio of horizontal interbedded mudstone and sandstone layers on shear strength parameters[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(6): 78 - 83. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 高永青, 刘建锋, 林庆元, 等. 微风化红层砂泥岩动三轴力学特性试验研究[J]. *力学与实践*, 2023, 45(5): 981 - 989. [ GAO Yongqing, LIU Jianfeng, LIN Qingyuan, et al. Experimental study on dynamic triaxial mechanical properties of sand and mudstone in breezy red bed[J]. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45(5): 981 - 989. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 邓威, 肖世国. 含裂隙近水平红层软岩边坡渗透稳定性模型试验[J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(1): 57 - 68. [ DENG Wei, XIAO Shiguo. Model test on stability of soft rock slopes composed of nearly horizontal redbeds with cracks[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(1): 57 - 68. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 陈洋, 唐洪明, 廖纪佳, 等. 基于埋深变化的川南龙马溪组页岩孔隙特征及控制因素分析[J]. *中国地质*, 2022, 49(2): 472 - 484. [ CHEN Yang, TANG Hongming, LIAO Jijia, et al. Analysis of shale pore characteristics and controlling factors based on variation of buried depth in the Longmaxi Formation, Southern Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 2022, 49(2): 472 - 484. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 马河图. 三峡库区砂泥岩互层岸坡崩塌机制及稳定性分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019. [ MA Hetu. Collapse mechanism and stability analysis of sand-mudstone interbedded bank slope in the Three Gorges Reservoir Area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 张钧堂, 王俊杰, 姬雪竹, 等. 浸水时间对砂泥岩颗粒混合料抗剪强度的影响[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(5): 157 - 159. [ ZHANG Juntang, WANG Junjie, JI Xuezhu, et al. Influence of soaked time on shear strength of sandstone-mudstone particle mixture[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(5): 157 - 159. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 王俊智, 李清波, 王贵军, 等. 近水平层状坝基岩体渗透结构及其工程意义[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 12 - 19. [ WANG Junzhi, LI Qingbo, WANG Guijun, et al. Permeability structure of the horizontally-stratified dam foundation rock mass and its engineering significance[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 12 - 19. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 蒋小伟, 万力, 胡晓农. 基于压水试验数据的砂泥岩裂隙岩体渗透结构分析[J]. *自然科学进展*, 2008, 18(3): 355 - 360. [ JIANG Xiaowei, WAN Li, HU Xiaonong. Analysis of permeability structure of sandstone fractured rock mass based on pressurized water test data[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(3): 355 - 360. (in Chinese with English abstract) ]

- [16] 蒋小伟, 万力, 胡晓农. 砂泥岩裂隙岩体埋深和岩性对渗透性影响分析 [J]. *水科学进展*, 2008, 19(4): 574 - 580. [JIANG Xiaowei, WAN Li, HU Xiaonong. Variation of permeability with depth and lithology in a formation of fractured sandstone-mudstone media[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(4): 574 - 580. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] 许强, 唐然. 红层及其地质灾害研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(1): 28 - 50. [XU Qiang, TANG Ran. Study on red beds and its geological hazards[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(1): 28 - 50. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 郑冲泉. 德泽水库大坝防渗工程耗灰量异常原因分析 [J]. *水利水电技术*, 2020, 51(增刊 1): 108 - 113. [ZHENG Chongquan. Analysis on causation of abnormal cement consumption of seepage control project for dam of Deze Reservoir[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(Sup1): 108 - 113. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 康小兵, 许模, 夏强, 等. 四川红层区某水库坝址渗漏影响因素 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(5): 633 - 639. [KANG Xiaobing, XU Mo, XIA Qiang, et al. Study on reservoir dam site leakage in Sichuan red layer area, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2018, 45(5): 633 - 639. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 李苏航, 苏玉婷, 张群, 等. 黄河羊曲水电站面板堆石坝三维有限元渗流分析 [J]. *西北水电*, 2021(2): 68 - 72. [LI Suhang, SU Yuting, ZHANG Qun, et al. Three-dimensional finite element seepage analysis of CFRD of Yangqu Hydropower Station on the Yellow River[J]. *Northwest Hydropower*, 2021(2): 68 - 72. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] 高焕焕, 齐小斌, 高文静, 等. 基于原型观测的黑河黏土心墙土石坝渗流场评价 [J]. *西北水电*, 2021(4): 43 - 47. [GAO Huanhuan, QI Xiaobin, GAO Wenjing, et al. Evaluation of seepage field of Heihe clay core earth-rock dam based on prototype monitoring data[J]. *Northwest Hydropower*, 2021(4): 43 - 47. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 曲传勇. 大西沟粘土心墙坝运行期渗流及沉降监测分析 [J]. *西北水电*, 2021(3): 95 - 98. [QU Chuanyong. Analysis of seepage and settlement monitoring of Daxigou clay core dam during operation[J]. *Northwest Hydropower*, 2021(3): 95 - 98. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 廖军, 龚洪苇, 石磊, 等. 降雨作用下近水平红层公路高边坡渗流场特征研究 [J]. *水力发电*, 2020, 46(10): 47 - 51. [LIAO Jun, GONG Hongwei, SHI Lei, et al. Study on the characteristics of seepage field of high slope of near-horizontal red layer highway under rainfall[J]. *Water Power*, 2020, 46(10): 47 - 51. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 师文豪, 杨天鸿. 渗流应力耦合作用下顺倾向层状边坡各向异性渗流特征数值模拟 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(6): 1783 - 1788. [SHI Wenhao, YANG Tianhong. Numerical simulation on anisotropic seepage characteristics in dip layered rock slope with interaction of seepage and stress[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2021, 51(6): 1783 - 1788. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 邱珍锋. 砂泥岩混合料各向异性渗透特性试验研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013. [QIU Zhenfeng. Experimental study on anisotropic permeability of sand mudstone mixture[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] XU Zengguang, CAO Cheng, LI Kanghong, et al. Simulation of drainage hole arrays and seepage control analysis of the Qingyuan Pumped Storage Power Station in China: A case study[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(8): 6335 - 6346.
- [27] XU Zengguang, LIU Yang, HUANG Jing, 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): 5019001.
- [28] 祁涛, 张均锋. 某水电站坝址区三维渗流参数反演 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(20): 3766 - 3770. [QI Tao, ZHANG Junfeng. Inverse analysis of seepage parameters for dam foundation of a hydropower station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(20): 3766 - 3770. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 许增光, 曹成, 李康宏, 等. 某抽水蓄能电站上水库局部防渗控分析 [J]. *应用力学学报*, 2018, 35(2): 417 - 422. [XU Zengguang, CAO Cheng, LI Kanghong, et al. Analysis of local anti-seepage and seepage control in the upper reservoir of a pumped storage power station[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2018, 35(2): 417 - 422. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 段斌, 张林, 何江达, 等. 复杂裂隙岩体天然渗流场反演分析 [J]. *水力发电学报*, 2012, 31(3): 188 - 193. [DUAN Bin, ZHANG Lin, HE Jiangda, et al. Back analysis of natural seepage field in complicated fractured rock mass[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(3): 188 - 193. (in Chinese with English abstract) ]