



基于饱和-非饱和模式下的围堰 三维渗流及防渗分析

徐文吉¹, 孔磊¹, 杨巍¹, 王敦格², 程永舟²

(1. 中交二航局第三工程有限公司, 江苏 镇江 212002;

2. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为提供潇湘船闸主体工程干施工条件, 需在上游填筑横向围堰, 与右岸宋家洲和潇湘西路形成主基坑施工围堰, 涉及组合围堰的渗流以及防渗分析问题, 其中上游横向围堰和宋家洲纵向围堰衔接处易受到宋家洲东北侧湘江干流导致的地下水渗流影响。该工程中的渗流问题所涉及的多为饱和-非饱和土, 需要综合考虑水在饱和-非饱和土体内的渗流。基于饱和-非饱和理论, 针对潇湘船闸工程围堰结构形式和岩层分布特点, 使用 GeoStudio 软件对上游横向围堰与右岸宋家洲组合围堰进行三维建模, 并对数值模拟计算结果从孔隙水压力、水头和渗流矢量等角度进行渗流以及防渗分析。

关键词: 土石围堰; 饱和-非饱和渗流; 防渗设计; 潇湘枢纽船闸

中图分类号: U655.54+1

文献标志码:

文章编号: 1002-4972(2025)06-0223-07

Three-dimensional seepage and anti-seepage analysis of cofferdam based on saturated-unsaturated model

XU Wenji¹, KONG Lei¹, YANG We¹, WANG Dunge², CHENG Yongzhou²

(1. The Third Construction Company of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Zhenjiang 212002, China;

2. School of Water Resources and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To provide dry construction conditions for the main project of Xiaoxiang Ship lock, a transverse cofferdam needs to be filled in the upstream to form a main pit construction cofferdam with Songjiazhou on the right bank and Xiaoxiang West Road, which involves seepage and anti-seepage analysis of the combined cofferdams. The connection between the transverse cofferdam upstream and the longitudinal cofferdam on Songjiazhou is susceptible to the impacts of the groundwater seepage caused by the main stream of Xiangjiang River on the north-east side of Songjiazhou. The seepage problem in this project involves mostly saturated-unsaturated soils, and the seepage of water in saturated-unsaturated soils needs to be considered comprehensively. Based on the saturated-unsaturated theory, this paper uses GeoStudio software to model the upstream lateral cofferdam and the combined cofferdam on the right bank of Songjiazhou in three dimensions with regard to the structural form and rock distribution characteristics of the cofferdam of the Xiaoxiang Ship Lock Project. The numerical simulation results are analyzed for seepage and anti-seepage analyses from the perspectives of pore water pressure, water head, and seepage vector.

Keywords: earth-rock cofferdam; saturated-unsaturated seepage; anti-seepage design; Xiaoxiang Hub ship lock

围堰渗流分析通常作为围堰稳定性分析的前提。在对围堰进行渗流分析时通常将注意力集中

在饱和区, 一般采用忽略非饱和区水流的饱和渗流模式进行渗流数值模拟研究。然而受非饱和土

收稿日期: 2024-09-12

作者简介: 徐文吉 (1983—), 男, 高级工程师, 从事水运工程技术研究。

中吸力和水力梯度等作用的影响,非饱和区的水流在很多情况下往往不能被忽视。土坝渗流实际是一个涉及饱和-非饱和过程状态的复杂问题^[1]。

Neuman^[2]提出有限元数值解法,能将饱和区土体和非饱和区土体作为一个整体进行求解,为饱和-非饱和渗流数值分析研究奠定了基础;Richards^[3]在试验中发现,针对于饱和土壤提出的达西定律同样也适用于非饱和土中水的流动,但在非饱和土中土壤的渗透系数并非常数,而是土壤饱和度或基质吸力的函数,这是与传统饱和渗流模式的最本质区别。基于饱和-非饱和渗流分析的基本理论以及广义达西定律和质量守恒定律建立 Richards 方程。在该方程的基础上,Topp 等^[4]提出非饱和渗透系数是压力水头或含水量的函数,为达西定律应用到饱和-非饱和渗流分析提供了理论依据;Freeze^[5]证明了浸润线并非最上面的流线,而应描述为流动区域中的零压力等压线,反映了饱和区和非饱和区的边界,且非饱和带的条件可能会严重影响浸润线的位置,若不考虑非饱和带,可能产生误导性的结果。与传统仅考虑饱和区土中水流的饱和渗流模式相比,饱和-非饱和渗流同时考虑了饱和区和非饱和区的水流,使得计算结果更符合实际,这得到了许多学者的证实^[6-7]。在数值分析方法上,高骥等^[8]将堤坝内饱和区和非饱和区耦合在一起形成整体的分析模型,利用有限差分法进行分析,得到与试验基本一致的结果。然而,受测定非饱和土水力参数的试验设备限制,当前对于土石坝饱和-非饱和渗流的研究并未引起广泛重视,在实际工程中考虑非饱和区水流的土

石坝饱和-非饱和渗流分析较少^[9]。

本研究为施工前设计分析,为制定施工方案提供理论依据,工程帷幕施工后取得了较好的防渗效果。借助 GeoStudio 数值模拟软件,结合以钻孔见洞率高的覆盖性溶岩为主的地基,考虑微风化泥灰岩的特性,基于饱和-非饱和渗流理论对潇湘改建船闸工程进行三维渗流研究,并对防渗方案的防护效果进行分析,该水工防渗设计旨在为同类项目提供借鉴价值。

1 工程概况

潇湘枢纽工程是湘江干流萍岛以下的第 1 个梯级,位于永州市冷水滩城区。该枢纽是集发电、航运、城市交通、供水等为一体的综合性工程。湘江自南向北流经坝区,在此区域分为东、西两条支流,河床中部为宋家洲。潇湘枢纽原船闸布置在西河汉,潇湘枢纽原挡水防渗系统^[10]自右向左依次为:东河右坝肩接头坝、东河溢流坝段、河床式厂房、原沙洲土坝段、西河土坝段、船闸,形成枢纽工程的挡水结构。

为满足湘江上游船舶大型化和沿江产业发展要求,湘江永州萍岛至衡阳蒸水河口规划为三级航道。现对潇湘枢纽船闸进行改建,新建潇湘船闸工程位于潇湘枢纽西河宋家洲大桥上游宋家洲公园侧。为提供潇湘船闸主体工程干施工条件,需在上游筑填横向围堰与左岸湘江西路、右岸宋家洲和下游副坝闭合形成主基坑施工围堰,见图 1。其中上游横向围堰和宋家洲纵向围堰衔接处易受到宋家洲东北侧湘江干流导致的地下水渗流影响。

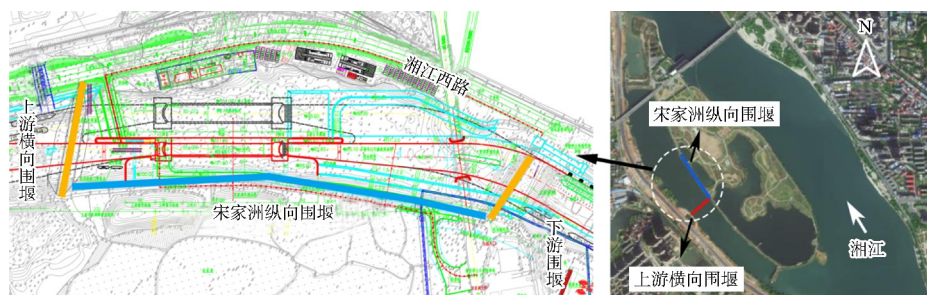


图 1 围堰平面布置

Fig. 1 Plan layout of cofferdam

在地下水位较高的地区开挖基坑时, 土的含水层被切断, 地下水会渗入基坑内部, 土体的渗透破坏将造成基坑的整体失稳, 这是造成很多基坑工程失事的主要原因^[11]。因此需做好防渗方案。上游横向围堰采用双液灌浆进行防渗处理, 防渗墙有效厚度不小于 0.8 m。宋家洲纵向围堰和湘江西路防渗采用高喷防渗+帷幕灌浆防渗系统^[12]。

改建潇湘枢纽闸位于已建船闸上游约 750 m, 船闸改建后, 新建潇湘船闸工程防渗系统由宋家洲副坝防渗系统、新建船闸防渗系统、新建西河副坝防渗系统、潇湘西路防渗系统组成。

黏土心墙土石坝中心墙作为防渗体可能因质量问题或施工不当等易出现高渗透区域, 促使坝体发生渗透破坏^[13], 因此上游横向围堰段采用双液灌浆防渗, 上游围堰段防渗系统总长 566 m; 宋家洲纵向围堰根据现场施工过程, 发现地质情况复杂多变, 包括地层时代不同、地层岩性不同、同一岩性不同部位的级配不同等特殊情况下, 宜采用 2 排高喷防渗墙结合岩基帷幕灌浆的形式^[14], 防渗系统总长 884.39 m, 平面布置见图 2。

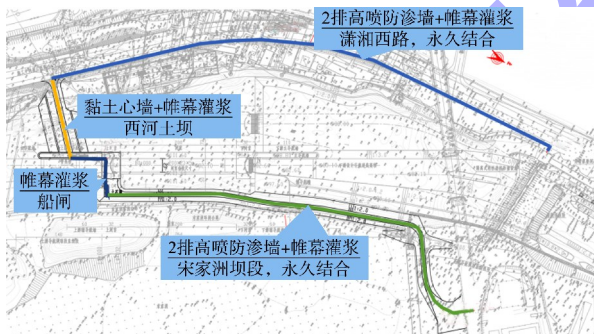


图2 新建潇湘船闸工程防渗系统布置
Fig. 2 Layout of anti-seepage system for new Xiaoxiang ship lock project

基岩帷幕灌浆设计参数主要根据地质情况确定, 临水强透水地层船闸基坑采用帷幕防渗时防渗效果最佳^[15]。帷幕灌浆防渗系统基岩主要为微风化泥灰岩区、微风化灰岩区以及微风化泥质条带灰岩区, 采用封闭式帷幕, 帷幕伸至不透水层以下 4 m, 帷幕灌浆顶部伸入高喷防渗墙不小于 1 m。

高喷防渗墙主要设置于卵石层、河岸素填土、杂填土等强透水层^[16]。采用三管法高压喷射注浆

形成防渗墙体, 设计要求墙体入中风化岩层不小于 1 m, 最大深度约 20 m, 单排墙体厚度不小于 0.8 m, 2 排墙体厚度不小于 1.6 m。

2 数学模型及计算工况

2.1 渗流基本理论

2.1.1 Richards 方程

饱和-非饱和渗流模式理论的核心是 Richards 方程, 即描述非饱和条件下水分运动的偏微分方程。该方程能够考虑土壤含水量、毛管力的变化以及水分在多孔介质中的流动, 可有效描述土壤中水分的运移过程。

Richards 方程的基本形式为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (K(\theta) \nabla h - v(\theta) \nabla z) + S \quad (1)$$

式中: θ 为含水量; $K(\theta)$ 为渗透系数; h 为水头; z 为高程水头; $v(\theta)$ 为含水饱和度与非饱和度之间的关系; S 为源项。

2.1.2 体积含水量函数

在饱和-非饱和渗流中, 体积含水量函数是描述土壤水分状态的基本函数, 连接土壤的物理特性和渗流行为。本文运用有限元分析软件 GeoStudio SEEP/3D 进行渗流分析。体积含水量函数采用样本函数估计方法, 在 GeoStudio 软件中提供了不同类型土的几种典型的含水量函数, 见图 3。样本函数基于 Fredlund 和 Xing (1994) 方法^[18] 获取负压力体积含水量函数的闭合解。控制方程为:

$$\Theta_w = C_\psi \frac{\Theta_s}{\{\ln [e + (\psi/a)^n]\}^m} \quad (2)$$

式中: Θ_w 为体积含水量; C_ψ 为上述函数的修正函数; Θ_s 为饱和体积含水量; e 为自然数 (2.718 28); ψ 为负孔隙水压力; a 、 n 、 m 为拟合参数。其中, 参数 a 为体积含水量函数的拐点, 单位 kPa, 通常略微大于空气进入值。参数 n 控制体积含水量函数的斜率, m 控制残余含水量, 分别描述为:

$$a = \psi_i \quad (3)$$

$$m = 3.67 \ln(\Theta_s / \Theta_i) \quad (4)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m \Theta_s} 3.72 s \psi_i \quad (5)$$

式中： ψ_i 为曲线拐点含水量对应的基质吸力； s 为经过拐点的函数切线的斜率。通常 a 、 n 、 m 的值可用拟合算法和测量数据点的方式获得。

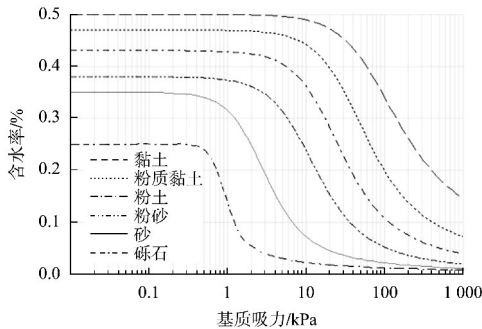


图 3 Geostudio 中的样本函数

Fig. 3 Sample functions in Geostudio

2.1.3 水土特征曲线

在非饱和渗流的数值模拟中，土-水特征曲线 (soil-water characteristic curve, SWCC) 起着至关重要的作用。SWCC 描述土壤中水分的能量与数量之间的关系，表示土壤含水量与吸力之间的相关性。由 GeoStudio/SEEP3D 用户手册推荐的达西定律和质量守恒连续性原理，使用 Fredlund-Xing 模型^[17] 估算出土水特征曲线。以压力水头为未知量，饱和-非饱和渗流的基本方程为：

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_r(h) k_{ij} \frac{\partial (h+x_2)}{\partial x_j} \right] - [c(h) + \beta S_s] \frac{\partial h}{\partial t} - S = 0 \quad (6)$$

式中： k_r 为相对渗透率； k_{ij} 为饱和渗透张量； h 为压力水头； x_2 为正向向上的铅直坐标； x_i 、 x_j 分别为水平和垂直方向的空间坐标； C 为比容水度； β 为系数，非饱和区 $\beta = 0$ ，饱和区 $\beta = 1$ ； S_s 为单位贮存量； t 为时间； S 为源汇项。

定解条件包括初始条件和边界条件。

2.2 模型建立与网格划分

根据潇湘船闸上游横向围堰的地形和土质条件，对围堰模型进行简单概化处理，使用 GeoStudio SEEP/3D 建立三维数值网格模型，即建立一个均质围堰组合体模型，见图 4。上游横向围堰呈东西走向，由黏土心墙坝和卵石土回填斜墙坝组成，海拔高程约 84.27 ~ 101.20 m，顶部宽度为 8 m；

右岸宋家洲纵向围堰呈南北走向，表层覆盖层为卵石，局部表层为素填土；左岸接湘江西路。海拔高程约 83.08 ~ 101.20 m。采用四面体网格，全局单元尺度约为 1.3 m，总共 682 269 个网格单元。

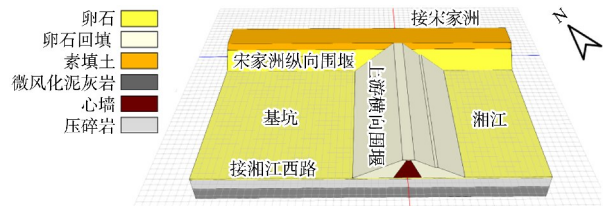


图 4 潇湘船闸上游围堰模型

Fig. 4 Model of cofferdam upstream of Xiaoxiang ship lock

2.3 初始条件边界条件的设定

初始应力条件为模型自重应力场，初始渗流条件由地下水水位面获得，河水与围堰表面接触面设定为自由透水面，即水头边界，并在该表面设置总水头水位 100.39 m。基坑一侧可认为是透水边界，模型底部设置为零压边界，模型地表设为自由边界。

2.4 模型参数

土体渗流性能参数通过《潇湘船闸工程岩土工程勘察报告》和经验参数获取，流-固耦合分析所需土体的渗流参数，主要是土体的饱和土水含量和渗透系数指标，各土层分布见图 4，具体参数见表 1。

表 1 土体材料参数
Tab. 1 Soil material parameters

土体资料	饱和土水含量/%	渗透系数/(cm·s ⁻¹)
卵石	0.02	9.0×10 ⁻²
卵石回填	0.02	1.1×10 ⁻¹
黏土心墙	0.10	1.0×10 ⁻⁵
素填土	0.23	1.7×10 ⁻⁵
压碎岩	0.33	5.7×10 ⁻⁴
微风化泥灰岩	0.30	1.7×10 ⁻⁵

由于施工工艺存在一些缺陷，导致高喷防渗和帷幕灌浆区域一般存在缝隙，所以高喷防渗和帷幕灌浆所在区域的渗透系数取值为 1.0×10⁻¹⁰ cm/s^[18]。

2.5 计算工况

工况按边界条件和防渗方案分为 2 组工况，其中工况 1 为无防渗布置；工况 2 为有防渗布置 (高喷灌浆+帷幕灌浆)。参照《潇湘枢纽改建船闸

特征水位表》, 上游横向围堰采用 10 a 一遇的挡水标准, 洪水位为 100.39 m。

3 结果与分析

3.1 无防渗布置工况的渗流分析

3.1.1 孔隙水压力

在工况 1 的条件下, 对上游横向围堰孔隙水压力分布进行分析, 由图 5a) 可知河床底部压碎岩区域的孔隙水压力最大, 达到 245.360 kPa, 并沿着压碎岩和微风化泥灰岩岩层交界处从水平方向向上游横向围堰底部扩散。由于黏土心墙具有一定的防渗效果, 且阻碍了孔隙水压力向上游横向围堰内传播, 孔隙水压力在上游横向围堰内部心墙位置出现锐减, 心墙两侧最大降幅达到 109 kPa。图 5b) 为从上游横向围堰横向剖视衔接处的孔隙水压力分布云图, 由于受宋家洲东北侧的湘江干流地下渗水的影响, 围堰衔接处底部孔隙水压力出现极大值 212.260 kPa。

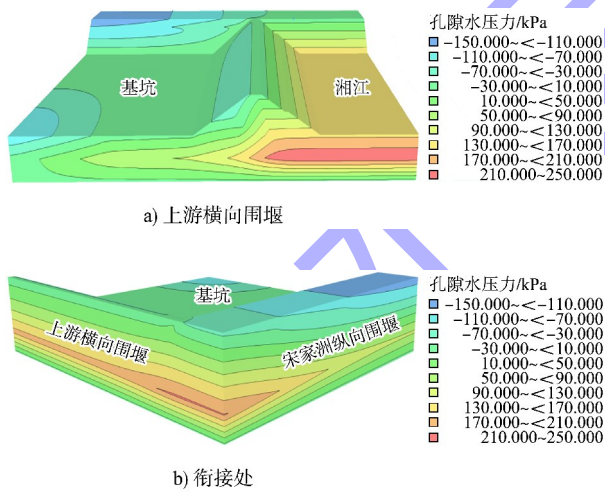


图 5 孔隙水压力分布云图

Fig. 5 Cloud map of pore water pressure distribution

3.1.2 渗流场

分析图 6a), 在工况 1 的条件下, 由于上游横向围堰内部土石坝黏土心墙重要防渗体, 考虑到心墙施工过程中会进行大量的碾压夯实, 垂向致密程度远大于水平方向, 水体仅会通过水平方向少量渗透^[19]。底部为渗透系数较小的卵石层, 水体会通过围堰临水侧的卵石回填坝朝围堰底部淤

积, 并通过卵石层向基坑内部渗流, 并在围堰附近的基坑出现水体堆积。从图 6b) 围堰衔接处底部渗流矢量分布云图分析可知, 部分水体会绕过上游横向围堰心墙向宋家洲纵向围堰底部强透水层的卵石层渗透, 最终在围堰附近的基坑出现水体堆积。

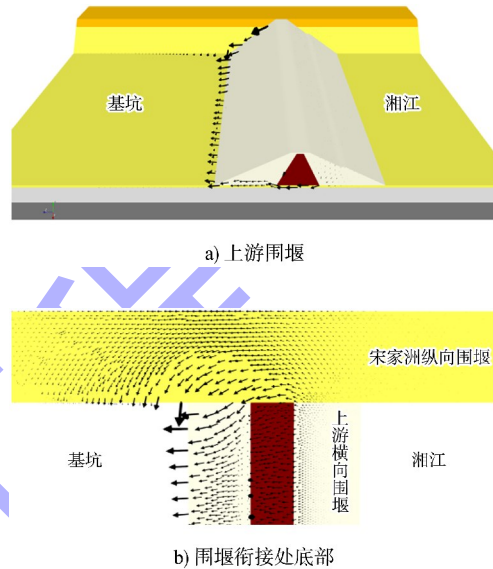


图 6 渗流矢量分布云图

Fig. 6 Cloud map of seepage vector distribution

3.2 防渗效果分析

3.2.1 孔隙水压力与渗流场

在上游横向围堰段采用双液灌浆防渗, 其余段采用单排高喷防渗墙结合岩基帷幕灌浆的形式。分析图 7a) 中上游横向围堰的渗流和孔隙水压力分布, 可知由于高喷防渗和深入微风化泥灰岩的帷幕灌浆带来的防渗效果, 水体不再透过卵石层向基坑内部渗流, 而是向地下渗透。孔隙水压力在组合防渗系统处骤减, 在防渗系统两侧孔隙水压力最大差值达到 298 kPa。即单排高喷防渗墙结合岩基帷幕灌浆的形式对上游横向围堰内部孔隙水压力的分布和渗流场有所改善。

图 7b) 对比图 6, 在添加防渗设计后围堰衔接处不再出现径流, 但其孔隙水压力较周围高出 25~103 kPa, 即仍有少量水体从围堰衔接处向基坑渗透, 可以认为防渗线搭接有效, 因此工况 2 防渗效果显著。

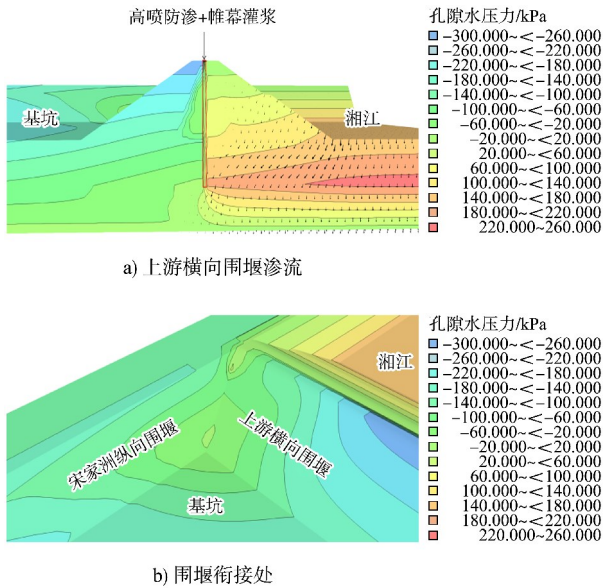


图 7 孔隙水压力分布云图

Fig. 7 Cloud map of pore water pressure distribution

3.2.2 水力比降

分析图 8 上游横向围堰总水头分布云图，设置垂直防渗墙后，防渗墙底部会出现水力比降集中现象，防渗墙底部的水力比降随微风化泥灰岩深度增加而减小。主要因为当防渗墙深入弱风化层基岩时，由于防渗墙的隔水作用，使得防渗墙两侧水头差较大，而底部基岩为微风化泥灰岩属于近乎不透水的弱透水层，随着弱透水层深度的增加，基岩底部体积含水量逐渐降低，渗流速度和局部水头损失不断减少，使得两侧的水头差减小，进而在基岩底部水力比降几乎减小到 0。

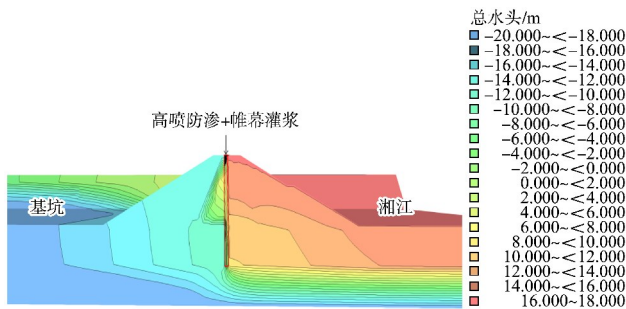


图 8 上游横向围堰总水头分布云图

Fig. 8 Cloud map of total head distribution of upstream lateral cofferdam

4 结论

1) 在无防渗的洪水水位下，最大孔隙水压力位于河床底部压碎岩区域，并沿着岩层交界处从

水平方向向围堰底部扩散；心墙两侧孔隙水压力存在降幅；受湘江干流地下渗水的影响，使得围堰衔接处底部孔隙水压力出现极大值；水体通过围堰临水侧的卵石回填坝朝围堰底部淤积，并通过卵石层向基坑内部渗流，在围堰附近的基坑出现径流。

2) 在增加防渗方案后，水体不再透过卵石层向基坑内部堆积而是向地下渗透，防渗墙底部会出现水力比降集中的现象，孔隙水压力在组合防渗系统处骤减，在防渗系统两侧孔隙水压力差值较大，即防渗系统对围堰内部孔隙水压力的分布有所改善。

3) 在添加防渗设计后，围堰衔接处的孔隙水压力较周围高出 25~103 kPa，仍有少量水体从围堰衔接处向基坑渗透，但不再出现径流。可以认为防渗线搭接有效，防渗效果显著。

参考文献:

- [1] 刘航飞. 基于不确定性分析的高心墙土石坝渗流性状及渗透稳定可靠性研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [2] LIU H F. Study on seepage behavior and seepage stability reliability of high core earth-rock dam based on uncertainty analysis [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [3] NEUMAN S P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements [J]. Journal of the hydraulics division, 1973, 99(12): 2233-2250.
- [4] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums [J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333.
- [5] TOPP G C, MILLER E E. Hysteretic moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass-bead media [J]. Soil science society of America journal, 1966, 30(2): 156-162.
- [6] FREEZE R A. Influence of the unsaturated flow domain on seepage through earth dams [J]. Water resources research, 1971, 7(4): 929-941.
- [7] PAPAGIANAKIS A T, FREDLUND D G. A steady state model for flow in saturated-unsaturated soils [J]. Canadian geotechnical journal, 1984, 21(3): 419-430.

- [7] LAM L, FREDLUND D G. Saturated-unsaturated transient finite element seepage model for geotechnical engineering[J]. *Advances in water resources*, 1984, 7(3): 132-136.
- [8] 高骥, 雷光耀, 张锁春. 堤坝饱和-非饱和渗流的数值分析[J]. *岩土工程学报*, 1988, 10(6): 28-37.
GAO J, LEI G Y, ZHANG S C. Numerical analysis on seepage through the saturated and unsaturated soils of levees or dams [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 1988, 10(6): 28-37.
- [9] 郑敏生, 钱镜林, 苏玉杰. 考虑非饱和区的土石坝渗流分析[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(1): 186-191, 84.
ZHENG M S, QIAN J L, SU Y J. Analysis of seepage in earth-rock dam considering unsaturated zone [J]. *Journal of hydroelectric engineering*, 2010, 29(1): 186-191, 84.
- [10] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 湘江永州至衡阳三级航道建设三期工程两阶段施工图设计[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 2023.
Hunan Province Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd. Two-stage construction drawing design of the third phase of the three-stage construction of the Xiangjiang Yongzhou to Hengyang third-level waterway project [R]. Changsha: Hunan Province Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., 2023.
- [11] 陈骏峰, 冯美果. 基于饱和-非饱和渗流理论的基坑防渗措施分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5): 1425-1430.
CHEN J F, FENG M G. Study of anti-seepage measures for foundation pit based on saturated-unsaturated seepage theory [J]. *Rock and soil mechanics*, 2009, 30 (5): 1425-1430.
- [12] 熊智, 邹开明, 丁琼. 潇湘改建船闸工程防渗系统设计[J]. *湖南水利水电*, 2024(1): 8-10.
XIONG Z, ZOU K M, DING Q. Design of anti-seepage system for reconstruction of Xiaoxiang shiplock [J]. *Hunan hydro & power*, 2024(1): 8-10.
- [13] 秦丽辉, 王琦, 刘嫒春, 等. 基于 Geo-studio 心墙内高渗透区渗透特性研究[J]. *东北农业大学学报*, 2023, 54(11): 85-96.
QIN L H, WANG Q, LIU Y C, et al. Research on permeability characteristics of high permeability zone in core wall based on Geo-studio [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2023, 54(11): 85-96.
- [14] 王新民, 朱顺强, 周腾飞, 等. 前坪水库高喷防渗墙施工技术探讨[J]. *人民黄河*, 2020, 42(S1): 188-190.
WANG X M, ZHU S Q, ZHOU T F, et al. Discussion on construction technology of high-pressure jetgrouting cutoff wall in Qianping Reservoir [J]. *Yellow River*, 2020, 42(S1): 188-190.
- [15] 邹开明, 张文侃, 徐世濠, 等. 临水强透水地层船闸基坑帷幕防渗与管井降水措施研究[J]. *中国农村水利水电*, 2024(7): 150-156.
ZOU K M, ZHANG W K, XU S H, et al. Research on curtain seepage control and tube well precipitation measures for ship lock pits with strongly permeable stratum of waterfront [J]. *China rural water and hydropower*, 2024(7): 150-156.
- [16] 李相然, 赵春富, 高明久. 高喷灌浆技术在卵砾石层地下水库构筑中的应用[J]. *水利学报*, 2003, 34(3): 80-85, 92.
LI X R, ZHAO C F, GAO M J. Application of high-pressure jet grouting to underground reservoir with pebble bed [J]. *Journal of hydraulic engineering*, 2003, 34(3): 80-85, 92.
- [17] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. *Canadian geotechnical journal*, 1994, 31(4): 521-532.
- [18] 曹洪, 朱东风, 范泽, 等. 止水帷幕缝隙渗漏变化过程试验研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(6): 699-709.
CAO H, ZHU D F, FAN Z, et al. Laboratory study of leakage process for cut-off wall with crack [J]. *Journal of hydraulic engineering*, 2019, 50(6): 699-709.
- [19] 廖智威, 王昱. 基于孔压静力触探的心墙黏土水平渗透系数测定方法研究[J]. *中国农村水利水电*, 2024(2): 221-225.
LIAO Z W, WANG Y. Research on the determination method of horizontal permeability coefficient of core wall clay based on CPTU test [J]. *China rural water and hydropower*, 2024(2): 221-225.