

· 地基与基础 ·



艳洲枢纽横向土石围堰的防渗设计和 结构稳定性研究*

唐宏斌¹, 熊英建¹, 姜兴良²

(1. 中交二航局第三工程有限公司, 江苏 镇江 212000; 2. 中交水运规划设计研究院有限公司, 北京 100007)

摘要: 土石围堰是一种常见的围堰支护方式, 其稳定性及抗渗效果对水利枢纽工程的安全施工具有重要影响。以常德市艳洲枢纽一期上下游横向土石围堰工程为研究对象, 针对该区域存在的岩体破碎及碎裂、软弱夹层和滑坡3方面共同影响的恶劣地质情况, 提出多层交互防护施工方案, 进一步对土石围堰的边坡、钱堤块石护坡的稳定性进行分析研究。首先, 详细介绍了艳洲枢纽围堰工程的水文地质条件所带来的施工困难; 然后, 通过理论分析对围堰结构和防渗设计进行研究; 最后, 通过数值分析研究了土石围堰的稳定性。工程施工结果表明, 设计方案满足恶劣地质条件下围堰变形控制的要求, 可为类似工程的设计与施工提供参考。

关键词: 土石围堰; 防渗设计; 稳定性; 艳洲枢纽

中图分类号: U656; TV523

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0174-06

Impermeability design and structural stability of transverse earth-rock cofferdam of Yanzhou Hub

TANG Hongbin¹, XIONG Yingjian¹, JIANG Xingliang²

(1. The Third Engineering Co., Ltd. of China Second Navigation Bureau, Zhenjiang 212000, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Earth-rock cofferdam is a common cofferdam support method, and its stability and impermeability effect have an important impact on the safety of water conservancy projects. Taking the upstream and downstream horizontal earth-rock cofferdam project of Yanzhou Hub phase I in Changde City as the research object, in view of the three aspects of rock mass fragmentation and fragmentation, soft interlayer and landslide in the area, a multi-layer interactive protection construction scheme to cope with this working condition is innovatively designed, and the stability performance of the slope and rock protection of the earth-rock cofferdam is further analyzed and studied. Firstly, the construction difficulties caused by the hydrogeological conditions of the Yanzhou Hub cofferdam project are introduced in detail. Then, the cofferdam structure and impermeability design are studied by theoretical analysis. Finally, the stability of the earth-rock cofferdam is studied by numerical analysis. The engineering construction results show that the design scheme provided in this paper can well meet the requirements of cofferdam deformation control under harsh geological conditions in this area, which can provide reference for the design and construction of similar projects.

Keywords: earth-rock cofferdam; impermeable design; stability; Yanzhou hub

收稿日期: 2022-10-15

*基金项目: 国家青年自然科学基金项目 (52108455)

作者简介: 唐宏斌 (1975—), 男, 高级工程师, 从事水运工程项目管理。

作为一种临时性坝体工程,土石围堰的安全性和稳定性对整个枢纽工程的进度和质量起到决定性作用,关系着施工人员及人民群众的生命财产安全,是工程建设全局的重要组成部分。王晓佳等^[1]采用有限元强度折减法对深中通道伶仃洋大桥人工岛三维模型在长期和短期条件下7个典型截面的围堰稳定性进行分析,根据分析结果调整施工工艺,有效保证了围堰吹填过程的稳定性。王克忠等^[2]基于裂隙岩体渗透理论和水流冲刷扩径模型研究,对基坑开挖过程预留薄壁岩坎的渗透稳定性进行仿真计算,并与原位监测数据进行对比分析。劳乃胜等^[3]针对驮英水库土石围堰施工渡汛工况,考虑防渗土工膜失效的不利条件,运用有限元分析软件GeoStudio进行了水位上升-下降过程的围堰二维稳定/非稳定渗流和围堰边坡抗滑稳定性分析。

目前国内对土石围堰稳定性的研究成果较多,但不同工程的实际工况和施工工艺不同,在工况恶劣的施工环境下采用石渣戗堤填筑的进占方法是否能够维持土石围堰的稳定性,尚不确定。本文以常德市澧县境内艳洲枢纽一期上下游横向土石围堰工程为依托,采用理论验算和有限元数值模拟验算的方法,对采用石渣混合料戗堤填筑的横向土石围堰的稳定性能进行系统深入研究。

1 工程概况

艳洲枢纽工程位于湖南省常德市澧县境内。项目拟定船闸闸首、闸室的建筑物级别为2级,导航、靠船、隔水建筑物、护坡的建筑物级别为3级,临时建筑物为4级。

一期围堰由上游横向围堰、左侧纵向围堰、下游横向围堰、下游开挖预留横向围堰及右侧开挖预留围堰组成,总长1 120 m。其中,一期上下游围堰按10 a一遇14 200 m³/s洪水标准设计,堰顶高程分别为44.81(上游)、44.51 m(下游)。上下游围堰分别布置石渣戗堤,堰身材料采用石渣

混合料;左侧纵向围堰采用C20混凝土。围堰截流采取单戗堤立堵进占方式,上、下游分别从右岸(开挖预留纵向围堰)向左侧纵向混凝土围堰单向推进,龙口设置于混凝土纵向围堰侧。

2 自然条件及其影响

艳洲地属亚热带季风性湿润气候,四季分明,雨量充沛。平均气温16.0~16.8℃,年平均相对湿度在75%~82%,年平均蒸发量1161~1 431 mm;年平均降水量1 165~1 924 mm,汛期为4—8月,5个月的降水量占全年的66.5%;平均风速在湘鄂山区为1.2 m/s,洞庭湖滨为2.6 m/s;最大风速达15~24 m/s,最大风速和最大风向都是东北风;年平均雾日达26 d,多在冬、春两季。

根据工程地质情况调查,本工程坝址区对围堰施工影响较大的不良地质作用主要表现为坝基岩体破碎、软弱夹层与软硬相间以及滑坡3个方面。首先,坝基为以中风化为主的石英砂岩,抗变形性能较强,由于岩体破碎,透水性相对较强。因而坝基主要存在沿岩体内节理裂隙的坝基渗漏问题,其防渗帷幕接头均可考虑与地下水位封闭,左右岸防渗帷幕需向两岸区域适当延伸。其次,由于左岸及河床处开挖深度为2.50~5.60 m,该范围内地层为第四系人工填土和卵石,结构松散,厚约2.10~5.60 m,下部即为中风化岩层,因而清基后不存在大方量开挖及边坡问题。而右岸及接岸副坝处开挖深度约为21 m左右,第四系土层容易沿岩土分界带发生滑动,且开挖后右侧坡体坡向与岩层倾向一致,为顺向坡,岩体内部存在顺层发育的软弱夹层及层间剪切带,岩层容易沿层面发生顺层平面滑移,因而右坝肩及接岸副坝存在开挖边坡稳定性问题。

3 围堰结构与防渗设计

3.1 总体施工方案

本工程围堰施工主要包括:船闸主体、上下游导航物及下游航道基坑开挖形成围堰,上游引

航道填筑围堰、左侧混凝土纵向围堰、高喷防渗墙施工、帷幕灌浆、防排水施工等。

考虑到上述自然条件中的岩体破碎及碎裂、软弱夹层和滑坡3方面对围堰施工及工程安全交错的影响，工程设计了应对该工况的多层交互防护施工方案。即先按照设计断面进行横向围堰回填，在堰体戗堤形成后进行防渗及防护施工，回

填围堰主体的同时施工纵向围堰，采用预制拼装混凝土套箱方案，施工前在水下混凝土围堰右侧1 m位置填筑临时通道，作为混凝土套箱作业通道及混凝土浇筑平台。混凝土套箱在后场分块预制好，在临时通道旁拼装成整体，然后整体起吊安装，之后采用汽车泵浇筑混凝土，将套箱中的隔仓灌满。总体施工方案见图1。

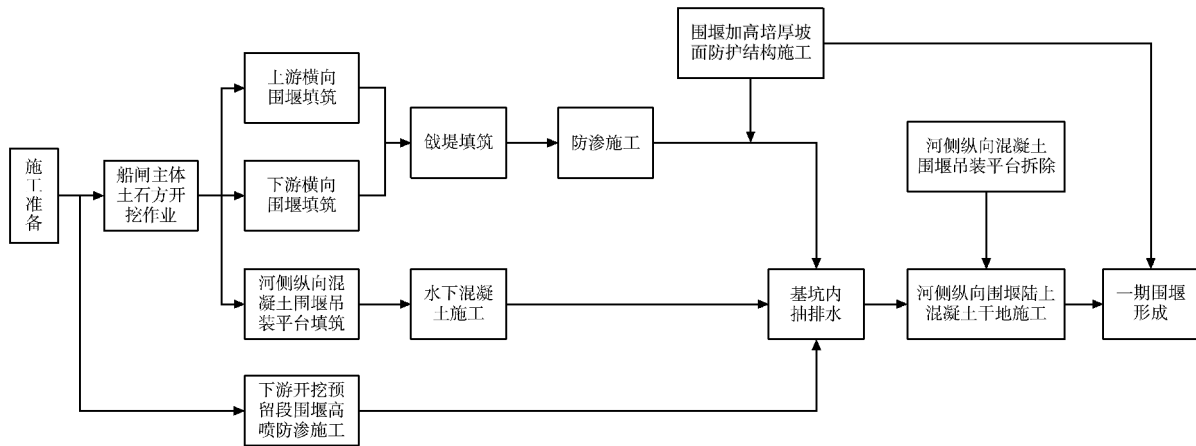
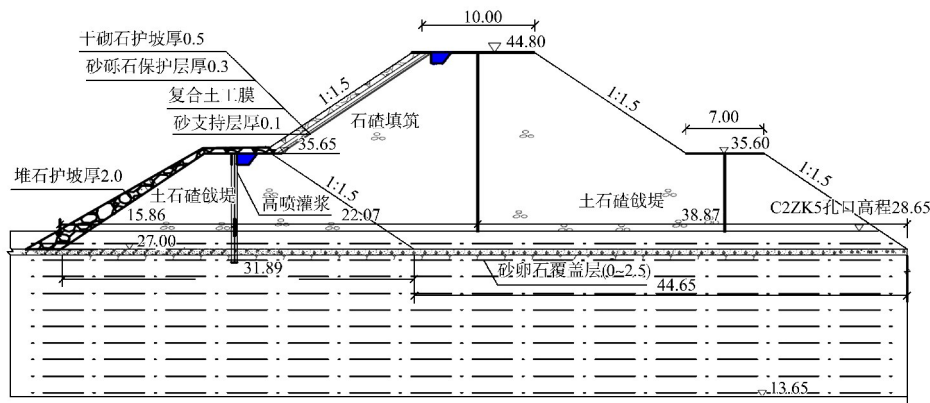


图1 总体施工方案

3.2 结构设计

艳洲工程一期上游横向围堰为利用开挖的土石方填筑土石围堰，围堰顶部位置兼作施工便道使用。戗堤高程35.65 m，顶宽7 m；围堰顶高程44.81 m，顶宽10 m。围堰两侧均按1:1.5的坡度放坡，外侧坡面采用石碴护坡。其断面见图2a)；下游横向围堰顶高程均为44.51 m，分为两部分，靠岸侧部分为原地面开挖预留围堰，兼作施

工便道使用，开挖时围堰顶预留宽度10 m，向船闸主体基坑方向按照1:1.5坡比进行放坡开挖，靠江侧部分为利用开挖的土石方填筑土石围堰，围堰作为二期围堰的一部分，戗堤顶高程35.65 m，顶宽7 m，围堰顶宽6 m，两侧均按1:1.5的坡度放坡，外侧坡面采用1 m厚堆石护坡，防止滑坡体物质冲刷给围堰带来破坏^[4-6]。其断面见图2b)。



a) 上游

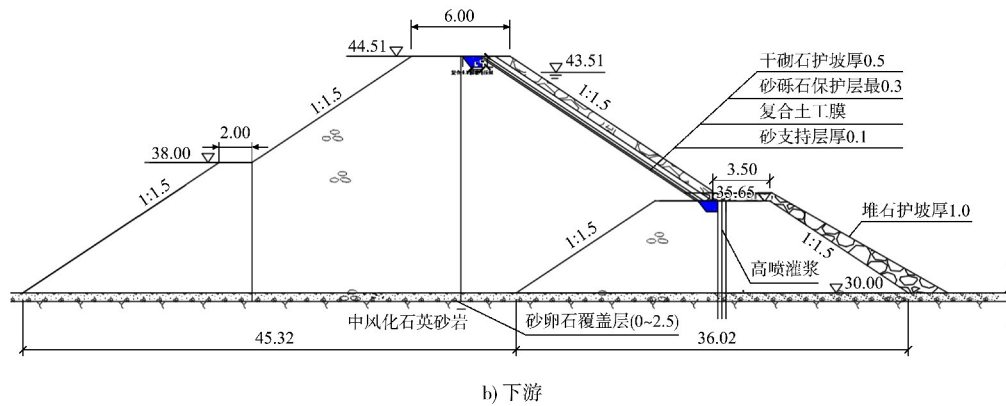


图 2 一期横向围堰断面 (单位: m)

3.3 防渗设计

本工程横向围堰主要采用复合土工膜和高压旋喷两种防渗方式。

1) 复合土工膜防渗。复合土工膜的型号为 SN/PE-5.0-400-0.5, 即短纤针刺非织造/PE 复合土工膜, 二布一膜, 标称断裂强度为 5.0 kN/m, 非织造布总单位面积质量 400 g/m², 膜厚度 0.5 mm。复合土工膜焊接质量的好坏是复合土工膜防渗性能成败的关键。为确保焊接质量, 采用 ZPR-210V 型热合土工膜焊接机, 土工布采用手提式封包机缝接。正式焊接前, 根据施工气温进行试焊, 确定行走速度和施焊温度。拼接焊缝两条, 每条宽 10 mm, 两条焊缝间留有 10 mm 的空腔以检查焊缝质量。坡脚锚固、堰顶锚固均采用黏土压封锚固。

2) 高压旋喷防渗。围堰填筑至 35.65 m 作为旋喷桩施工平台, 旋喷桩孔深下界穿过基岩面并伸入中风化岩 0.5 m, 沿旋喷轴线布置单排孔, 孔间距 0.8 m, 按照顺序施工^[7-9]。首先依据控制桩、设计图以及现场放样, 准确放出旋喷桩孔位。其次进行先导孔施工, 沿帷幕轴线方向布置 10% 的先导孔, 选用 I 序孔, 采取芯样, 并对地层、岩层情况做好记录, 根据芯样情况, 调整钻孔深度, 确保落浆底线入不透水层 2 m。最后按设计提升速度、旋转速度进行高压旋喷注浆。

4 一期横向围堰结构稳定性验算

4.1 理论验算

4.1.1 围堰背水面边坡稳定性

本工程上下游横向土石围堰 35.65 m 高程以

下堰身采用石渣戗堤填筑, 堰体采用石渣填筑, 下游开挖预留横向围堰外侧存在原状土。比较以上几种情况, 上游横向围堰的稳定性最为不利, 所以仅需对上游横向围堰的边坡稳定性进行验算^[10-12]。

横向围堰在填筑时, 考虑先将背水面边坡所处位置用石渣填至 35.65 m 高程, 再填筑石渣围堰至 44.81 m, 石渣填筑最大高度为 9.16 m。石渣的内摩擦角为 27°~45°, 取中密度内摩擦角 $\varphi = 40^\circ$, 黏聚力 $c = 0$ kPa。假定石渣最大干密度为 2.0 g/cm³, 20 °C 渗透系数 $k = 1.0 \times 10^{-4}$ cm/s, 计算时不考虑围堰上车辆等压力。将坝坡失稳结构简化为平面问题, 假定滑动土体处于平面应变状态, 同时滑动土体为刚体, 采用瑞典圆弧分析法进行边坡稳定验算, 分别取全顶宽度位置、黏土边坡与堰顶相交位置、堰顶宽度一半位置 3 个点, 根据式(1)验算其稳定系数 F_s :

$$F_s = \frac{cL + \tan \sum m_i g \cos \alpha_i}{\sum m_i g \sin \alpha_i} > 1.15 \quad (1)$$

式中: α_i 为围堰边坡坡度; c 为黏聚力; L 为圆弧的弧长; m_i 表示土条质量; g 为重力加速度。

经计算, 3 个点的稳定系数分别为 1.81、2.91 及 2.03, 均满足要求。

4.1.2 横向围堰戗堤块石护坡稳定性

横向围堰外侧采用石渣戗堤填筑, 为非均质土石围堰, 取不利情况进行验算。由于上游横向

围堰处承受的水流力最大，故只需根据式(2)(3)对上游横向围堰处戗堤块石护坡稳定性进行验算，若满足要求，那么其他几种横向围堰戗堤块石护坡稳定性也必然满足要求^[12-18]：

$$P = 1.59\rho_k g(2h) \tag{2}$$

$$D = \frac{AP}{(\rho_k - \rho)g} \cdot \frac{(1+m^2)^{0.5}}{m(m+2)} \tag{3}$$

式中： P 为最大局部波压； A 为系数，堆石护坡取0.8； ρ 为水的密度； ρ_k 为块石密度，取 2.1 t/m^3 ； k 为随坡比 m 变化的系数， $m = 1.5$ ， $k = 1.1$ ； $2h$ 为波高，取0.6 m； D 为块石粒径。

由式(2)得最大局部波压为1.049 MPa，由式(3)得块石粒径为0.18 m，可知当面临最不利工况时，上游横向围堰处所需要的小块石粒径为0.18 m，而本工程拟采用的戗堤外侧护坡块石粒径不小于0.5 m，故满足要求。

接着进一步对块石稳定性进行验算，由于本工程选用的块石为无黏性材料，则根据式(4)得稳定系数为1.44，符合四级围堰指标，故横向围堰戗堤块石护坡稳定性满足要求：

$$F_s = \frac{mg\cos\beta\cos\varphi}{mg\sin\beta} = \frac{\tan\varphi}{\tan\beta} > 1.05 \tag{4}$$

式中： β 为坡角； m 为土块的质量。

4.2 模拟验算

与理论验算同理，因一期上游横向围堰面临最不利工况，所以在模拟验算时，本工程仅需基于ABAQUS有限元数值分析软件对一期上游横向围堰进行模拟验算^[19-21]。

模型截面取一期上游横向围堰(A-A断面)尺寸，截取10 m长示例，反映围堰整体在横向水流冲刷过程中的受力情况。本工程混凝土框架有限元模型较大，考虑到模拟的正确性和有效性，需要控制网格的大小。经过大量的试算，选择SOLID六面体单元，在网格模块中对混凝土框架划分网格，所采用的网格单元类型为C3D8R，种子布局大小为180 mm，能够使计算结果完全收敛。

施加荷载前，先约束模型底部的18个自由度以达到完全固定的限制条件，之后参考实际工况下流量为 $1.42 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 的围堰导流设计洪水标准，对仿真模型施加横向黏滞力。经过ABAQUS软件仿真分析计算得出，有限元模型数值能够完全收敛，结果见图3。模拟结果表明在实际工况下，拉应力和压应力的集中位置在围堰底部，而水流方向受到荷载产生的应变集中在第一斜段和第一水平段交接位置，为拉应变，水流在坡度变化位置对坡体变形造成的影响最大。

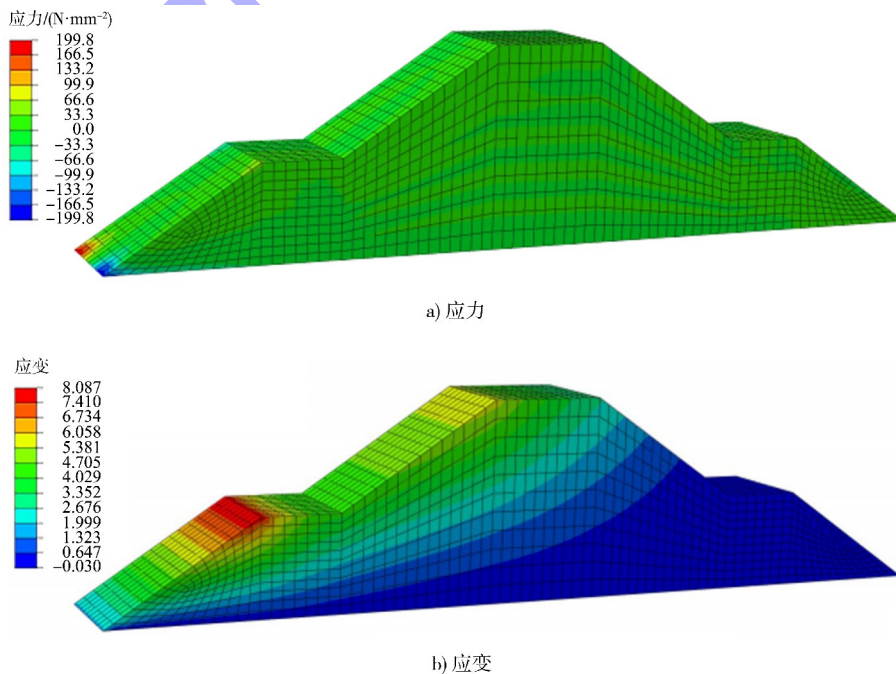


图3 一期横向围堰水流方向应力和应变云图

模型的真实应力由受力方向的约束反力除以变形后的表面积计算得到, 真实应变 ε 按照式(5)计算, 可得模型在受横向黏滞力时的荷载位移曲线:

$$\varepsilon = \sigma / E \quad (5)$$

式中: σ 为应力; E 为弹性模量。

4.3 计算结果分析

本工程在理论验算时, 通过分别验算横向围堰边坡稳定性和戽堤块石护坡稳定性, 进而得出其整体稳定性是否符合要求。经检验, 上游横向围堰的石渣边坡满足安全稳定要求, 进而说明上、下游横向围堰及下游开挖预留横向围堰边坡均满足安全稳定要求。然后对横向围堰戽堤块石护坡稳定性进行验算, 同样只需考虑承受的水流力最大的上游横向围堰。经检验, 本工程拟采用的戽堤外侧护坡块石粒径均符合要求, 且块石稳定系数符合四级围堰指标, 所以横向围堰戽堤块石护坡稳定性满足安全稳定要求。

在模拟验算时, 以面临最不利工况的一期上游横向围堰建立基于 ABAQUS 有限元软件的数值模型, 计算结果依然能够完全收敛, 表明模型承受荷载时能够维持预设范围内的位移, 因此一期上游横向围堰的整体稳定性符合要求。

综上所述, 上下游横向土石围堰及下游开挖预留横向围堰整体稳定性均满足安全要求。

5 结语

1) 艳洲枢纽一期上下游横向土石围堰工程由于地质条件较为恶劣, 以高压旋喷灌浆法为主要施工工艺, 采用复合土工膜防渗, 通过多重交互防护的施工措施, 保证了围堰的防渗效果。

2) 对围堰背水面边坡和戽堤块石护坡在最不利工况下的稳定性进行了理论验算, 并运用 ABAQUS 有限元软件对围堰结构稳定进行了模拟验算; 通过对仿真模型施加横向黏滞力, 反映出水流在坡度变化位置对围堰坡体变形造成的影响最大, 但稳定性符合相关规范要求, 为日后围堰的维护指明了重点。

3) 通过此项研究, 可为后续在类似恶劣工况下的土石围堰工程建设提供一定的理论指导, 具有良好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 王晓佳, 贺炜, 伶仃洋大桥西锚碇筑岛施工柔性围堰结构稳定性研究[J]. 桥梁建设, 2021, 51(2): 85-90.
- [2] 王克忠, 金志豪, 杨麦珍, 等. 取水塔基坑开挖过程倒悬岩坎围堰渗透稳定性研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S2): 415-422.
- [3] 劳乃胜, 王金龙, 周欣华. 水位升降条件下驮英水库上游围堰渗流及稳定性分析[J]. 广西水利水电, 2020(6): 21-25.
- [4] 陈曦. 大坝围堰施工技术[J]. 中国高新科技, 2021(20): 93-94.
- [5] 周殿喜, 杜斌雁. 斯里兰卡 K 坝土石围堰设计[J]. 云南水力发电, 2020, 36(6): 81-85.
- [6] 关盛旺. 峡谷河道尾水围堰设计与施工优化[J]. 水利技术监督, 2021(12): 192-195.
- [7] 潘振海, 王小虎, 张宇翔. 老挝南欧江水电站上游围堰防渗帷幕施工[C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会. 2021 水利水电地基与基础工程技术创新与发展. 北京: 中国水利水电出版社, 2021: 483-487.
- [8] 胡建国, 李树杰, 吉利敏. 土石围堰防渗机理及措施分析[C]//建筑科技与管理学术交流会议论文集. 北京: 建筑科技与管理组委会, 2014: 77, 50.
- [9] 崔永祥, 钱俊良, 龙耀东, 等. 里底水电工程二期土石围堰防渗施工技术[J]. 云南水力发电, 2021, 37(5): 49-53.
- [10] 惠建伟, 李季, 段锋, 等. 块石戽堤先行进占施工的土石围堰稳定性研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(3): 173-178.
- [11] 姜毅博. 土石围堰渗流及边坡稳定性研究进展[J]. 南方农机, 2019, 50(15): 264-265.
- [12] 袁宝远, 刘世琦, 白云. 基于 Groundvue 系列地质雷达水库防渗墙探测分析[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2016, 36(2): 1-5.
- [13] WANG S, CHEN J S, SHENG J C, et al. Laboratory investigation of stress state and grain composition affecting internal erosion in soils containing a suspended cut-off wall[J]. KSCE Journal of civil engineering. 2016, 20(4): 1283-1293.