



钢板桩挡墙隔流堤施工稳定性的数值模拟研究

龚 华, 苏 陈, 陈 圣, 徐北森, 田兵燕

(安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要: 选取涡河航道船闸改建工程下游隔流堤的典型断面, 基于 COMSOL Multiphysics 的固体力学接口以及多孔介质与地下水流接口对隔流堤模型进行流-固耦合分析, 探究不同水位高度条件下隔流堤的应力、水头压力和稳定性的影响。结果表明: 在流-固耦合作用下, 隔流堤的最大 Mises 应力出现在粉砂层和粉质黏土层与钢板桩的交接处, 最大 Mises 应力值为 19.20 MPa; 隔流堤的水头压力随着水位的上升不断增大, 水位为 8 m 时最大水头压力出现在钢板桩 1 左下方的粉土层 a 上, 水头压力为 24.88 m; 隔流堤的应变和位移随水位升高不断增大, 当水位上升为 8 m 时, 隔流堤的最大位移达到 253.90 mm, 堤顶土体向钢板桩 2 的桩后一侧滑移了 1.20 mm, 此时的最大体积弹性应变和等效偏应变分别为 9.16% 和 11.03%。通过仿真模型验证了钢板桩的渗流阻隔效果, 预测了隔流堤随水位上升出现的滑移位置和水位, 为涡河航道船闸改建工程的顺利开展提供了参考依据。

关键词: 隔流堤; 钢板桩挡墙; 数值模拟; 稳定性

中图分类号: U69

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0238-08

Numerical simulation study on construction stability of steel sheet pile retaining wall separation levee

GONG Hua, SU Chen, CHEN Sheng, XU Beisen, TIAN Bingyan
(Anhui Shui'an Construction Group Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: A typical cross-section of the downstream separation levee for the ship lock reconstruction project of Guo River navigation channel is selected. Based on the solid mechanics interface of COMSOL Multiphysics and the interface between porous media and groundwater flow, the flow-solid coupling analysis of the separation levee model is carried out to investigate the effects of stress, head pressure and stability of the separation levee under the conditions of different water level heights. The results show that under the effect of flow-solid coupling, the maximum Mises stress of the separation levee occurs at the junction of the silt layer and silty clay layer with the steel sheet pile, and the maximum Mises stress value is 19.20 MPa. The water head pressure of the separation levee increases with the rise of the water level. When the water level is 8 m, the maximum head pressure occurs in the silt layer a at the bottom left of steel sheet pile 1, with a water head pressure of 24.88 m. The strain and displacement of the separation levee increased continuously with the rise of the water level. When the water level rises to 8 m, the maximum displacement of the separation levee reaches 253.90 mm, and the soil at the top of the embankment slides 1.20 mm towards the rear side of steel sheet pile 2. At this time, the maximum volumetric elastic strain and the equivalent deviatoric strain are 9.16% and 11.03% respectively. The seepage barrier effect of the steel sheet piles is verified through simulation models, and the sliding position and water level of the separation levee with the rise of water level are predicted, providing a reference basis for the smooth implementation of the ship lock reconstruction project of the Guo River navigation channel.

Keywords: separation levee; steel sheet pile retaining wall; numerical simulation; stability

收稿日期: 2024-12-13

作者简介: 龚华 (1979—), 男, 高级工程师, 从事水运工程研究工作。

涡阳枢纽是涡河入安徽省境内第2座拦河综合性枢纽工程,具有调节径流、拦蓄河水、排涝、泄洪与航运等多种功能^[11-3]。近年来,随着腹地经济的快速发展,工业化和城镇化进程加快,涡阳船闸通过能力不足的问题也将愈加明显,迫切需要进行扩建,以满足涡河货物运输的需要^[4-5]。钢板桩具有强度高、容易打入坚硬土层、可在深水中施工、防水性能好、能按需要组成各种外形的围堰和多次重复使用等优点^[6-7],被广泛应用于管柱基础、桩基础及明挖基础的围堰等工程项目中。

在实际工程中,堤坝的渗流场和应力场不是相互独立的,而是相互作用并呈现出复杂的非线性力学变形特征^[8],从而影响堤坝稳定性。通过渗流场和应力场耦合分析,可以准确模拟这两个场的相互作用机制^[9-11]。刘虎等^[12]基于多孔介质传热传质和热渗耦合作用,建立二维地下渗流条件下的传热模型,探究地下水渗流对U形埋管周围土壤温度场的影响。唐友山^[13]以均质土石坝为研究对象,采用COMSOL Multiphysics软件自带的多孔介质传热模块和多孔介质地下水渗流模块进行计算,研究了温度场与渗流场的相互影响特征对土石坝渗流热监测的意义。水位是堤坝安全的重要影响因素,柳雨昕等^[14]对正常蓄水位工况的大坝进行基于渗流场和温度场的二维稳定渗流有限元分析,验证了温度场与渗流场的相似性,并通过温度场对土石坝进行稳定性分析,表明土石坝存在渗流安全隐患。杨志轩^[15]采用物理模型试验与数值模拟的方法,对渗流作用条件下有无渗漏通道情况的堤坝温度场变化规律进行了研究,证实了坝体渗漏对温度场分布的影响。武慧芳等^[16]建立高强度塑钢组合板桩应用模型,研究不同工况条件下堤坝土体、石笼块体的抗滑稳定性以及高强度塑钢组合板桩对堤坝稳定性的作用。贾善

坡等^[17]推导了变形多孔介质热-流-固三场耦合模型及其控制方程,通过ABAQUS结合MATLAB求解验证了程序的正确性。然后详细分析场耦合作用对井壁孔隙压力、温度和应力的影响。Chen等^[18]建立二维有限元模型模拟渗流场,研究正常水位和高水位条件对尾矿坝总水头、压力水头和湿润线的影响,结果表明较高水位坝顶的压力水头较高。Ma等^[19]建立了各向异性渗流条件下双线盾构隧道施工强度的分析模型,并进行一系列模拟计算,结果表明渗流作用下土体的后期固结沉降会影响区段变形,上覆水位越高,最大固结沉降和地表沉降的影响范围越大。

综上所述,大部分研究中缺乏隔流堤在流-固耦合作用下的应力、水头压力和稳定性分析,缺乏隔流堤施工过程的稳定性预测模型。本文基于COMSOL Multiphysics的固体力学接口以及多孔介质和地下水流接口对隔流堤模型进行流-固耦合分析,探究不同水位高度条件下隔流堤的应力、水头压力和稳定性的影响,预测隔流堤的滑坡水位,并提出应对措施。

1 模型及参数

1.1 典型断面选取

选取涡河航道涡阳船闸改建工程下游隔流堤的典型断面,隔流堤采用两道钢板桩进行加固,钢板桩中心间距为10 m,堤顶高程为30.00 m,在双排钢板桩之间回填中粗砂。钢板桩为热轧U形钢板桩,型号为PU750×225a,桩顶高程为28.80 m,桩底高程为4.80 m,桩长24 m。为了方便建模计算,定义最低通航水位为2 m(对应实际水位22.82 m),依次递增,当水位为8 m时,对应实际水位28.82 m,比施工时最高水位28.70 m还高0.12 m,见图1。

2 数值模拟分析

2.1 模型概述

通过 COMSOL Multiphysics 的固体力学接口以及多孔介质与地下水流接口对隔流堤模型进行流-固耦合分析, 土体材料模型采用摩尔-库伦模型。土壤设置为各向同性的线弹性材料, 施加外部应力、土壤塑性、重力和初始应力应变, 并在蓄水侧添加压力。模型两侧采用辊支承, 模型底部为固定约束。多孔介质材料的流动模型为达西流, 多孔介质的渗透率模型采用水力传导率, 流体的水力传导率见图 3。

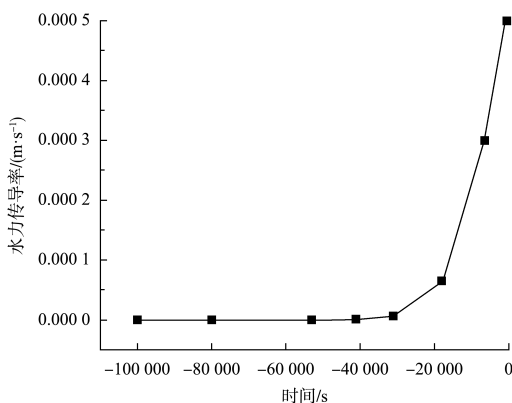


图 3 多孔介质的渗透率模型的水力传导率

Fig. 3 Hydraulic conductivity modeling of permeability in porous media

2.2 Mises 等效应力和流场压力

不同物理场作用下隔流堤的 Mises 等效应力和主应力见图 4。图 4a) 为重力场作用下的 Mises 应力和主应力, 在重力场作用下, 隔流堤的钢板桩 2 所受最大应力位于粉砂层、粉质黏土夹粉土层 b 和粉质黏土层 b 的交界处, 最大 Mises 应力达到了 20.91 MPa, 主应力轴向蓄水侧偏移, 这是由于钢板桩 2 的桩后土体堆积对钢板桩产生的桩后土压力所致。图 4b) 为地应力平衡后的 Mises 应力和主应力图, 地应力平衡后, 最大 Mises 应力值增大到 21.50 MPa, 主应力轴基本不变。图 4c) 为流-固耦合作用下隔流堤的 Mises 应力和主应力图, 隔流堤所受的最大应力为粉砂层、粉质黏土层与钢板桩的三者交接处, 最大 Mises 应力为 19.20 MPa, 值得注意的是, 在重力场和流-固耦合作用下, 主应

力和应力轴的偏转方向基本一致, 表明在施工时, 蓄水一侧的应力更集中, 在施工时应充分考虑钢板桩蓄水一侧的支撑强度。图 4d) 为流体作用下隔流堤的流场压力, 压力主要集中在蓄水侧的底部土层, 最大压力值为 244.00 kPa, 最小压力值为 -27.31 kPa, 位于堤顶最高处, 这是流体的浮力和土体的负摩阻力共同作用的结果。

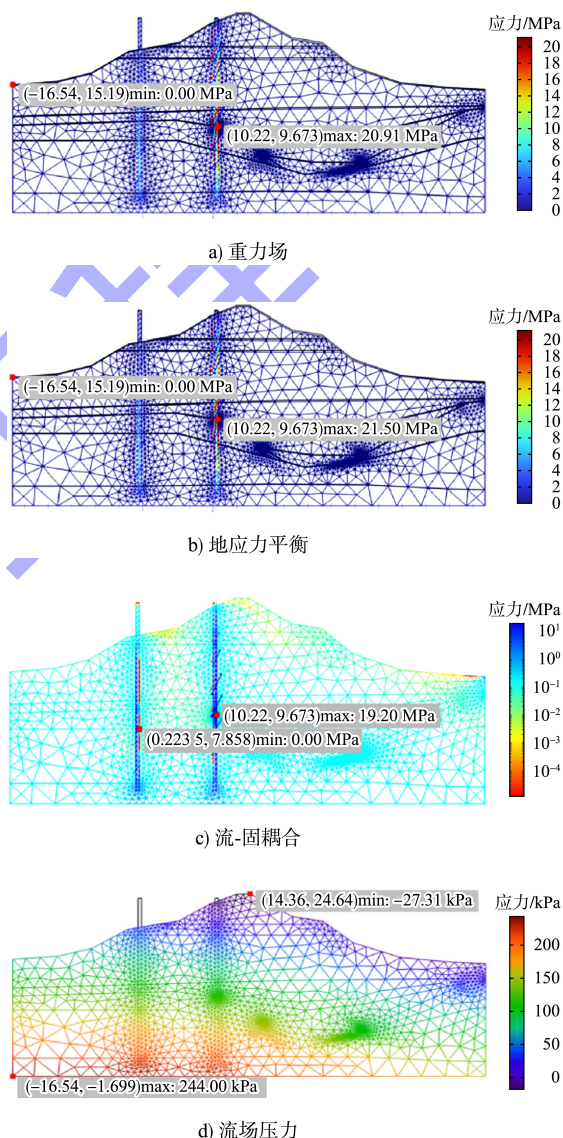


图 4 不同物理场作用下隔流堤的 Mises 等效应力

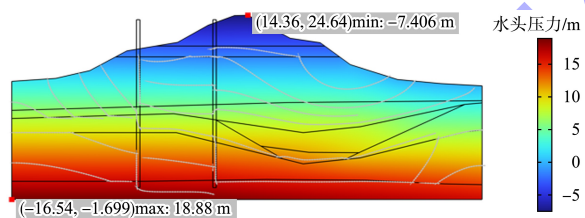
Fig. 4 Mises equivalent stresses of separation levee under different physical fields

综上所述, 在地层交接处钢板桩蓄水侧所受的应力较大, 在施工时应充分考虑钢板桩蓄水侧的支撑强度, 且在渗流条件下隔流堤的最大压力作用在粉土层 a 而非钢板桩上, 这是较为理想的

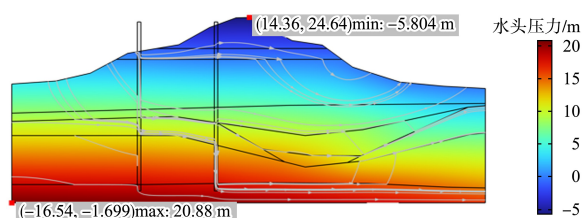
结果,降低了钢板桩的强度要求。

2.3 水头压力

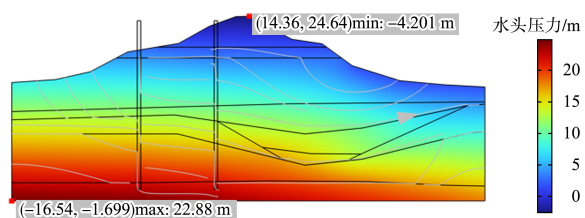
流-固耦合作用下不同水位隔流堤的水头压力见图5。水位2 m时的水头压力见图5a),在水位为2 m时,隔流堤的压力水头分布较为均匀,由于水位不高,水的渗流强度不大,流线较为稀疏,最大水头压力作用蓄水侧水位最深处的底部粉土层a上,最大水头压力为18.88 m,当水位增大到4 m时,见图5b),最大压力水头随之增大到20.88 m,但此时的水头压力分布仍较为均匀,流线逐渐变密,当水位增大到6 m时,隔流堤的最大压力水头位置未发生变化,最大水头压力增大到22.88 m,见图5c)。当水位增大到8 m时水头压力见图5d),流线在钢板桩2的蓄水侧更为集中,且此时最大水头压力为24.88 m,值得注意的是,水位高度与水头压力成正比,最大压力水头的位置始终位于水位最深的底部,这表明钢板桩足以支撑蓄水侧8 m及以下的水位,流线在蓄水一侧更为集中,表明钢板桩有效阻挡了水的渗流,达到了钢板桩隔流堤的工程应用效果。



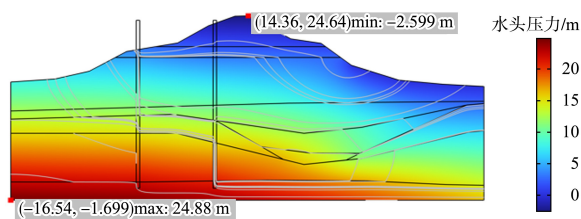
a) 水位2 m



b) 水位4 m



c) 水位6 m



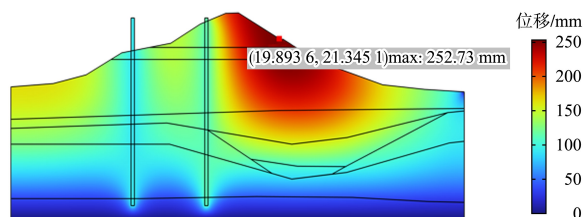
d) 水位8 m

图5 流-固耦合作用下不同水位隔流堤的水头压力
Fig. 5 Head pressures of separation levee at different water levels under flow-solid coupling effect

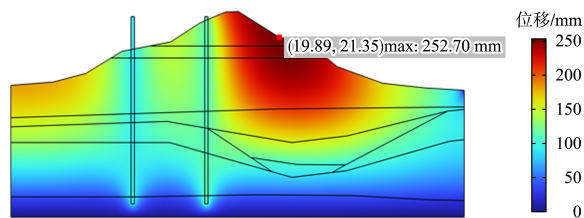
2.4 稳定性分析

2.4.1 位移

流-固耦合作用下不同水位隔流堤的位移见图6。随着水位上升,隔流堤的位移不断增大。在水位为2 m时,隔流堤的位移主要分布在钢板桩2的桩后土侧,最大位移出现在桩后土的斜坡位置,位移值为252.73 mm;随着水位上升到4 m,最大位移值略微下降到252.70 mm,这是由于地下水渗流导致的;当水位上升到6 m时,位移值最大为252.80 mm;水位到达8 m时,最大位移值增大到253.90 mm。值得注意的是,在水位低于6 m时,最大位移值基本稳定在252.70 mm,当水位上升到8 m时,最大位移值开始缓慢增大,且最大位移的发生位置向远离钢板桩2的一侧偏移了1.20 mm,表明此时钢板桩2的桩后土体已经向远离钢板桩2一侧滑移了1.20 mm。因此当蓄水侧的水位大于6 m时,应重点关注钢板桩2的桩后土体是否发生滑移现象。



a) 水位2 m



b) 水位4 m

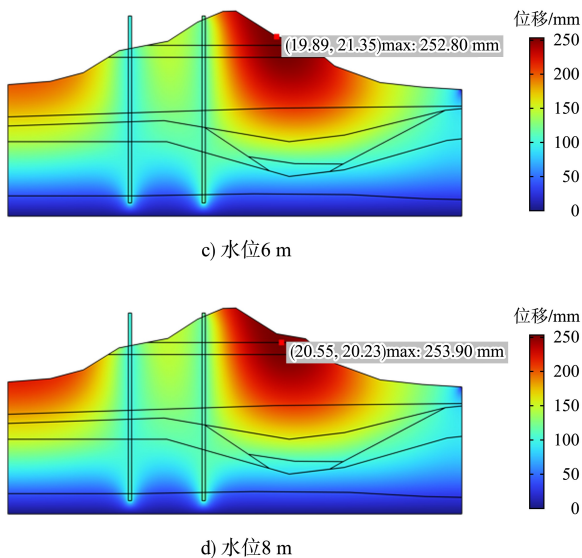


图 6 流-固耦合作用下不同水位隔流堤的位移
Fig. 6 Displacement of separation levee at different water levels under flow-solid coupling effect

水位为 8 m 时隔流堤的滑移面见图 7。隔流堤的滑移部分主要为钢板桩 2 的桩后土体至堤顶, 包括钢板桩 1 桩前的蓄水侧深处土体, 滑移面积较大。通过观察发现, 钢板桩 2 的桩后土体高度较大, 这是钢板桩 2 桩后土体滑移的主要原因。同时从图中的流线可以看出, 除了钢板桩 1 的蓄水侧流线较为集中外, 钢板桩 2 的桩后侧流线也较为集中, 表明此时钢板桩 2 桩后的土体已经产生了一定程度的渗流, 这是隔流堤堤顶滑移的次要原因。

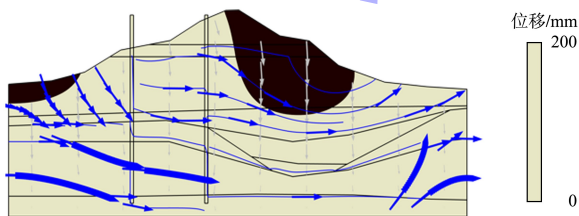


图 7 水位为 8 m 时隔流堤的滑移面
Fig. 7 Sliding surface of separation levee at a water level of 8 m

综上所述, 蓄水侧的水位对隔流堤的位移产生了巨大的影响。但水位达到 8 m 时, 钢板桩 2 的桩后土体发生了滑移。因此, 在涡河发生较大水位变化时, 应密切关注隔流堤的位移变化。在后续的隔流堤施工过程中, 可以考虑加高钢板桩

的高度或者对钢板桩 2 后的土体进行开挖移除, 降低堤顶发生滑移的风险。

2.4.2 塑性应变

隔流堤在水位为 8 m 时的体积弹性应变和等效偏应变见图 8。如图 8a) 所示, 隔流堤发生滑移时, 最大体积弹性应变位于钢板桩 2 桩后土体的最远处, 这与钢板桩 2 的桩后土体滑移有关, 因此等效偏应变也出现在与体积弹性应变相同的位置。此时的体积弹性应变和等效偏应变分别为 9.16% 和 11.03%, 进一步验证了钢板桩 2 桩后土体的滑移。在后续的隔流堤施工过程中应采取有效措施预防隔流堤钢板桩 2 桩后土体的滑移。

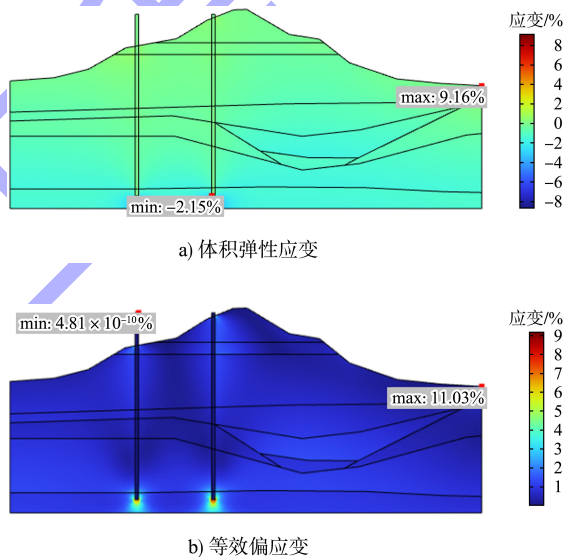


图 8 水位为 8 m 时隔流堤的体积弹性应变和等效偏应变
Fig. 8 Volumetric elastic strain and equivalent deviatoric strain of separation levee at a water level of 8 m

3 结语

1) 在流-固耦合作用下, 隔流堤的最大 Mises 应力为 19.20 MPa, 在重力场和流-固耦合作用下, 主应力和应力轴的基本偏向蓄水一侧, 表明在隔流堤施工时, 蓄水一侧的应力更集中, 应充分考虑钢板桩蓄水一侧的支撑强度。

2) 在流-固耦合作用下, 隔流堤的水头压力与水位成正比。最大压力水头的位置始终位于水位最深处的底部, 这表明钢板桩足以支撑蓄水侧 8 m 及以下的水位。值得注意的是, 流线在蓄水一侧更为集中, 表明钢板桩有效阻挡了水的渗流,

达到了钢板桩隔流堤的工程应用效果。

3) 在流-固耦合作用下隔流堤的位移和应变随水位升高不断增大。在水位低于 6 m 时, 最大位移值基本稳定, 当水位上升到 8 m 时, 最大位移值开始增大到 253.90 mm, 此时钢板桩 2 的桩后土体已经向远离钢板桩 2 一侧滑移了 1.20 mm。因此当蓄水侧的水位大于 6 m 时, 应重点关注钢板桩 2 的桩后土体是否发生滑移现象。

4) 通过仿真计算得到了涡河航道涡阳船闸改建工程的隔流堤在水位达到 8 m 时, 钢板桩 2 的桩后土体将发生滑移。因此, 在施工过程中可以加高钢板桩高度或将桩后土体移除。

参考文献:

- [1] 林燕清, 胡飞. 涡河航道浅滩-深槽生境恢复措施效果研究[J]. 水运工程, 2024(1): 161-169.
LIN Y Q, HU F. Effect of restoration measures for shoal-deep trench in Guohe River channel[J]. Port & waterway engineering, 2024(1): 161-169.
- [2] 许金昭, 刘桂建, 司雯, 等. 安徽涡河流域水化学与同位素特征及水体转化关系[J]. 环境科学, 2024, 45(6): 3196-3204.
XU J Z, LIU G J, SI W, et al. Hydrochemical and stable isotopic characteristics and transformation relationship of water bodies in the Guohe river basin, Anhui Province [J]. Environmental science, 2024, 45(6): 3196-3204.
- [3] 张子谦, 鲍娜娜, 闫星廷, 等. 基于 SSA-LSTM 模型的日水位预测: 以涡河流域涡阳闸为例[J]. 计算机系统应用, 2023, 32(1): 316-326.
ZHANG Z Q, BAO N N, YAN X T, et al. Daily water level prediction based on SSA-LSTM model: case study of Guoyang Sluice in Guohe River basin [J]. Computer system & applications, 2023, 32(1): 316-326.
- [4] 邹永超, 袁浩, 冉彬君, 等. 基于透空隔流堤布置的上游引航道通航水流条件优化[J]. 水运工程, 2023(6): 96-101.
ZOU Y C, YUAN H, RAN B J, et al. Optimization of navigational flow conditions at upstream entrance of approach channel with separation levee [J]. Port & waterway engineering, 2023(6): 96-101.
- [5] 王熔荣, 赵根生, 张首元, 等. 导流墩对急弯河道下游口门区水流条件的改善作用[J]. 水运工程, 2023(3): 99-104.
WANG R R, ZHAO G S, ZHANG S Y, et al. Improvement effect of diversion pier on flow conditions in downstream entrance area of sharp bend channel[J]. Port & waterway engineering, 2023(3): 99-104.
- [6] 依巴代提·买买提. 堤坝连续墙支护结构施工方法研究[J]. 价值工程, 2010, 29(12): 19.
MAIMAITI Y. The construction methods research on dam DW supporting structure [J]. Value engineering, 2010, 29(12): 19.
- [7] 李家华, 陈家悦, 陈良志, 等. 钢管板桩组合三维设计及拓展应用[J]. 水运工程, 2022(10): 228-233.
LI J H, CHEN J Y, CHEN L Z, et al. 3D design and extended application of steel pipe sheet pile combination[J]. Port & waterway engineering, 2022(10): 228-233.
- [8] 张羽, 杨朝辉, 赵集云, 等. 弯曲河段船闸引航道通航水流条件模拟[J]. 水运工程, 2022(6): 132-138.
ZHANG Y, YANG Z H, ZHAO J Y, et al. Simulation of navigable flow conditions for approach channel of ship lock in curved reach [J]. Port & waterway engineering, 2022(6): 132-138.
- [9] 高玉峰, 王玉杰, 张飞, 等. 边坡工程与堤坝工程研究进展[J]. 土木工程学报, 2024, 57(8): 97-118.
GAO Y F, WANG Y J, ZHANG F, et al. State-of-the-art review on slope and embankment dams [J]. China civil engineering journal, 2024, 57(8): 97-118.
- [10] 陈波, 李宁, 嵯瑞花. 多孔介质的变形场-渗流场-温度场耦合有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 467-472.
CHEN B, LI N, ZHUO R H. Fem analysis on fully coupled thermo-hydro-mechanic behavior of porous media [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2001, 20(4): 467-472.
- [11] 黄涛, 杨立中, 陈一立. 工程岩体地下水渗流-应力-温度耦合作用数学模型的研究[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(1): 12-15.
HUANG T, YANG L Z, CHEN Y L. Study on mathematical model of groundwater seepage-stress-temperature coupling in engineered rock mass[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1999, 34(1): 12-15.
- [12] 刘虎, 晋华, 邢述彦, 等. 地下水渗流对地埋管换热器

- 周围温度场的影响[J]. 水电能源科学, 2012, 30(12): 117-119, 110.
- LIU H, JIN H, XING S Y, et al. Influence of groundwater seepage on GHE temperature field[J]. Water resources and power, 2012, 30(12): 117-119, 110.
- [13] 唐友山. 基于 Lu 模型的土石坝温度场对坝体渗流场的响应分析[J]. 陕西水利, 2024(1): 4-7.
- TANG Y S. Study on temperature field and saturated-unsaturated seepage field coupling for earth dam based on Lu model[J]. Shaanxi water resources, 2024(1): 4-7.
- [14] 柳雨昕, 封立志, 张炳晖, 等. 基于温度场的土石坝二维渗流稳定分析[J]. 桂林航天工业学院学报, 2024, 29(3): 407-413.
- LIU Y X, FENG L Z, ZHANG B H, et al. Two-dimensional seepage stability analysis of earth-rock dams based on temperature field[J]. Journal of Guilin University of Aerospace Technology, 2024, 29(3): 407-413.
- [15] 杨志轩. 渗流作用下均质土坝温度场变化规律试验与数值模拟研究[J]. 四川水力发电, 2024, 43(1): 103-106, 110.
- YANG Z X. Experimental and numerical simulation study on the change law of temperature field of homogeneous earth dams under the action of seepage [J]. Sichuan hydropower, 2024, 43(1): 103-106, 110.
- [16] 武慧芳, 顾靖超, 陆立国. 塑钢板桩应用于黄河宁夏地区边坡稳定性分析[J]. 水利规划与设计, 2020(12): 151-157.
- WU H F, GU J C, LU L G. Stability analysis of plastic steel sheet piles applied to slopes in Ningxia area of Yellow River[J]. Water resources planning and design, 2020(12): 151-157.
- [17] 贾善坡, 冉小丰, 王越之, 等. 变形多孔介质温度-渗流-应力完全耦合模型及有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3547-3556.
- JIA S P, RAN X F, WANG Y Z, et al. Fully coupled thermal-hydraulic-mechanical model and finite element analysis for deformation porous media [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2012, 31(S2): 3547-3556.
- [18] CHEN L H, XI B P, DONG Y S, et al. Study on the stability and seepage characteristics of underwater shield tunnels under high water pressure seepage [J]. Sustainability, 2023, 15(21): 15581.
- [19] MA Z M, LIN C, ZHAO H, et al. Numerical simulations of failure mechanism for silty clay slopes in seasonally frozen ground[J]. Sustainability, 2024, 16(4): 1623.
- (本文编辑 赵娟)
- (上接第 237 页)
- [7] 杨胜生, 杨建冲. 大直径植入式钢管嵌岩桩施工技术[J]. 水运工程, 2022(4): 197-202.
- YANG S S, YANG J C. Construction technology of large-diameter implanted steel pipe for socketed pile[J]. Port & waterway engineering, 2022(4): 197-202.
- [8] 杨柏, 陈开伦, 刘磊, 等. 基桩嵌岩段抗拔承载特性现场试验研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 70-75.
- YANG B, CHEN K L, LIU L, et al. Experimental study on the pull-out bearing characteristics of rock embedded sections of foundation piles [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (natural science), 2021, 42(2): 70-75.
- [9] 史乙杰, 邓会元, 朱文波. 中风化凝灰岩嵌岩桩抗拔承载特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 131-137.
- SHI Y J, DENG H Y, ZHU W B. Uplift bearing characteristics of rock-socketed piles in middle weathered tuff [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2021, 19(2): 131-137.
- [10] 水运工程地基基础试验检测技术规程: JTS 237—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- Technical specification for testing and inspection of port and waterway engineering foundation: JTS 237-2017[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.
- [11] 胡中波, 翟恩地, 杨昕光. 嵌岩桩竖向承载力预测方法[J]. 水运工程, 2018(2): 157-163.
- HU Z B, ZHAI E D, YANG X G. Prediction methods for vertical bearing capacity of socketed piles [J]. Port & waterway engineering, 2018(2): 157-163.
- (本文编辑 赵娟)