

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250383

清水条件下对口挑流坝局部冲刷的数值研究

郭 强¹, 赵德平¹, 黄小卫¹, 唐国强², 刘思笛², 闫晓惠²

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司广州局海口分局, 海口 570105;
2. 大连理工大学建设工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 对口挑流坝在海洋、河口等工程中应用广泛,其周围的局部泥沙冲淤特性直接影响工程的安全和稳定。已有研究工作大多基于物理实验观测或经验预报公式,缺乏对其流动结构和泥沙运移规律的深刻认识。为此,基于Delft3D软件构建了清水条件下对口挑流坝局部泥沙冲淤数值模型,在验证模型准确性后,将单坝和对口挑流坝泥沙冲淤特性进行对比,分析了对口挑流坝的挑流特性、局部床面剪切应力和局部泥沙冲淤形态,并探讨了坝长和流速对其影响。结果表明,对口挑流坝坝间距减小40 m最大无量纲切应力值由2.56增至7.48;而流速增大则进一步扩大绕流范围和流线密集度,最大无量纲切应力由3.17增至5.60,增幅约76.7%,高切应力区域的面积占比由20.27%扩大至34.44%。此外,坝间距减小20 m时坝头最大冲刷值增幅约为45.89%~59.92%,流速增大时最大增幅约为13.41%,同时冲刷坑范围扩大、淤积区域扩散。研究结果为优化对口挑流坝设计提供了理论支撑。

关键词: 对口挑流坝; 局部冲刷; 数值模拟; 冲淤特性

中图分类号: TV863;TV653⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0232-05

Numerical Study on Local Scour Around Spur Dikes Under Clear-Water Conditions

GUO Qiang¹, ZHAO De-ping¹, HUANG Xiao-wei¹, TANG Guo-qiang², LIU Si-di², YAN Xiao-hui²

(1. Haikou Sub-Bureau of Guangzhou Bureau, EHV Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Ltd., Haikou 570105, China; 2. School of Infrastructure Engineering Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The spur dikes are widely applied in marine and estuarine engineering projects, and its surrounding local sediment scouring and silting characteristics directly affects the safety and stability of the project. Existing studies primarily rely on physical experiments or empirical prediction formulas, lacking a deep understanding of the flow structure and sediment transport patterns. Based on the software Delft3D, this paper presents a numerical simulation of the local sediment scouring and silting characteristics of spur dikes under clear water conditions and performs reliability verification. The sediment scouring and siltation characteristics of single dam and spur dike are compared. The diversion characteristics, local bed shear stress and local sediment scouring and siltation patterns of the spur dikes are analyzed, and the impact of dam length and flow velocity is discussed. The results show that the when the spur dike spacing decreases by 40 m, the maximum dimensionless shear stress increases from 2.56 to 7.48. An increase of flow velocity further expands the flow diversion range and the density of streamlines, with the maximum dimensionless shear stress rising from 3.17 to 5.60; The increase is approximately 76.7%, and the area percentage of high shear stress zones increases from 20.27% to 34.44%. Additionally, when the spur dike spacing is reduced by 20 m, the maximum scour value at the dam head increases by approximately 45.89% to 59.92%; When the flow velocity increases, the maximum scour value increases by about 13.41%, while the scour pit area expands and the sediment deposition area spreads. This study can provide theoretical support for optimization design of spur dikes.

Key words: spur dikes; local scour; numerical simulation; erosion and deposition characteristics

收稿日期: 2025-03-04, 修回日期: 2025-04-11, 接受日期: 2025-04-17

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(CG YKJXM20220200); 国家自然科学基金面上项目(51979031)

作者简介: 郭强(1980-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为工程水力设计优化, E-mail: csgguo163@163.com

通讯作者: 闫晓惠(1989-), 男, 博士、副教授, 研究方向为流体仿真模拟, E-mail: yanxh@dlut.edu.cn

1 引言

挑流坝作为重要的水工结构,其局部冲刷现象关乎工程安全、泥沙输移及生态保护,容易引发结构失稳、河床演变与生态扰动等问题。因此,研究挑流坝局部冲刷有助于保障工程安全,为水资源管理、工程维护与管理及生态保护提供科学依据。目前,针对对口挑流坝局部冲刷特性尚不明确。早期有关丁坝周围水沙运动的研究主要基于物理模型试验^[1-2],随着计算机技术的进步,开始采用二维、三维的模拟方法。如 MOLLIS T 等^[3]通过求解水深平均浅水方程,对丁坝附近的水流进行数值模拟;OUILLOON S 等^[4]对矩形渠道中丁坝附近的浅水定常湍流进行三维数值模拟;彭静等^[5]对洪水条件下丁坝附近局部冲刷进行三维模拟,探讨了河床的局部冲淤形态;宁健等^[6]利用多相流悬移质输沙与传统推移质输沙相结合的模型,精确模拟了丁坝附近的流场信息和冲刷形态。随着技术进一步发展,DUAN J G 等^[7-10]开始考虑更多因素对丁坝局部泥沙冲淤的影响。但较少考虑对口丁坝结构对局部泥沙冲淤的影响,因此研究对口挑流坝局部泥沙冲淤特性对于全面了解挑流坝结构的影响具有重要意义。本文基于 Delft3D 软件构建了清水条件下对口坝局部泥沙冲淤数值模型,在验证模型准确性后,对比了单坝和对口坝泥沙冲淤特性,分析了对口挑流坝的挑流特性、局部床面剪切应力及局部泥沙冲淤形态,并探讨了坝长和流速对局部冲刷的影响,研究结果可促进工程设计、推动河流生态保护和水利科学研究的发展。

2 研究方法

2.1 数学模型

数值分析模型中水动力模块的控制方程包括连续性方程和动量方程,其中连续性方程为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)u \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)v \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = (d + \zeta)Q \quad (1)$$

式中, ζ 为参考平面以上的自由表面高程; t 为时间; $G_{\xi\xi}$ 、 $G_{\eta\eta}$ 分别为用于将曲线坐标转换为直角坐标的系数; d 为参考面以下的深度; $d + \zeta$ 为总水深; u 、 v 分别为 ξ 、 η 两个方向上的流速; Q 为单位面积内因排水或降水而导致的流量变化。

ξ 、 η 方向动量方程分别为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \cdot \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} + F_{\xi} + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma}) + M_{\xi} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fu = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} + F_{\eta} + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma}) + M_{\eta} \quad (3)$$

式中, ω 为垂直方向的流速; σ 为比例垂直坐标; ρ_0 为水的密度; P_{ξ} 、 P_{η} 分别为 ξ 、 η 方向上的静水压力梯度; F_{ξ} 、 F_{η} 分别为水平雷诺应力引起的不平衡在 ξ 、 η 方向上的影响; M_{ξ} 、 M_{η} 分别为外部因素导致的动量在 ξ 、 η 方向上的变化; v_v 为垂直涡黏系数。

泥沙输移方程为:

$$|S_b| = 0.006 \rho_s \omega_s D_{50}^{(l)} M^{0.5} M_e^{0.7} \quad (4)$$

式中, S_b 为推移质输沙率; ρ_s 为泥沙密度; ω_s 为沉降速度; D_{50} 为泥沙中值粒径; M 为泥沙流动数; M_e 为超越泥沙流动数。

2.2 模型设置

采用结构化网格,网格数量为 1 680 个。如图 1 所示,底床尺寸为 105 m × 100 m,单坝尺寸为 20 m × 5 m × 2 m(长 × 宽 × 高),距离上游边界 50 m 处设有对口坝。基于琼州海峡某样点实际底床沉积物特征,泥沙粒径选取 0.2 mm,密度取 2 650 kg/m³。泥沙的临界起动切应力为 0.42 Pa,泥沙级配采用单一粒径(均匀沙),以减少计算复杂度聚焦于主要动力学过程。上游设置流速边界为 0.25、0.30 m/s,分别接近和略高于本文中泥沙的起动流速,能够较好地模拟底床泥

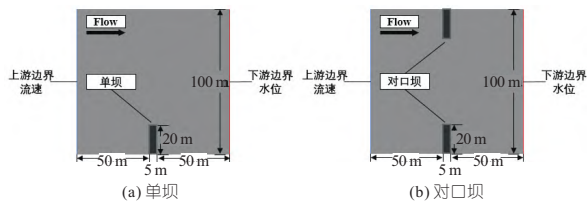


图 1 单坝和对口坝计算区域和边界条件

Fig. 1 Calculation regions and boundary conditions for the single dam and opposite groins

沙在不同水动力条件下的冲刷过程,下游边界的水深设置为 0 m。初始时水位和泥沙浓度均为 0,泥沙厚度为 5 m;粗糙度计算采用曼宁系数 0.025。

2.3 模拟条件

为研究清水条件下对口坝局部泥沙冲淤特性,开展了 36 组次的数值模拟研究工作。将单坝和对口坝进行对比分析,坝长由 5~45 m 按 5 m 递增,流速分别设置为 0.25、0.30 m/s,系统组合分析不同坝长与流速参数的影响。

2.4 模型可靠性验证

为确保数值模拟结果的准确性和可靠性,对网格进行无关性验证(图 2)。网格加密 1 倍,图 2(a)、(c)的冲刷深度分布特征基本一致,表明计算结果不依赖于网格的划分,对网格密度不敏感,从而保证数值模拟的准确性和可靠性。

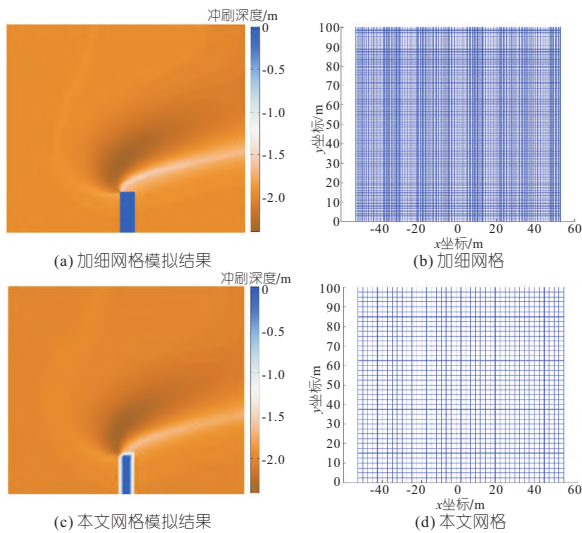
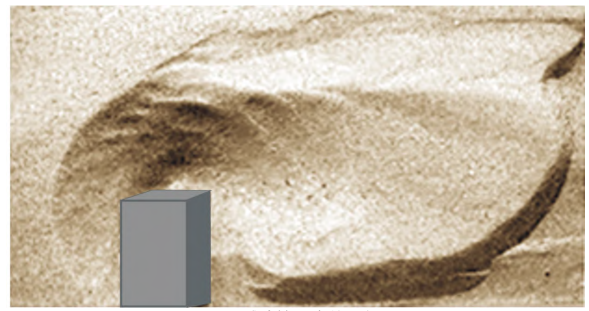


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence verification

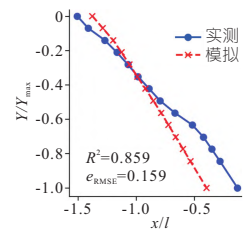
选取单坝坝长 20 m,流速 0.3 m/s 的工况开展模型准确性验证(图 3),图 3(a)试验结果图^[11]中挑流坝最大冲刷位置集中在坝前区域,在此区域水流受阻形成涡漩,对底床造成较大的冲刷作用,形成深度约为 2 m 的椭圆形冲刷坑,并随着冲刷逐渐扩大。模拟结果与试验冲淤形态相符合。为量化试验结果与模拟结果的差异,分别提取试验结果^[12]和模拟结果中坝头区域冲刷起始点至最大冲刷段的数据点,无量纲化后进行对比(图 3(c))。图 3(c)中 Y 为冲刷深度, Y_{max} 为最大冲刷深度, l 为阻水特征长度, $l = \sqrt{HL}$, H 为水深, L 为坝长。模拟数据与试验数据在整体趋势上基本一致,决定系数 R^2 值为 0.859,均方根误差 e_{RMSE} 值为 0.159,表明模拟数据与试验数据拟合效果较好。因此,可利用该模型模拟对口挑流



(a) 试验结果冲淤形态



(b) 数值模拟结果冲淤形态



(c) 试验数据和模拟数据点线图

图 3 挑流坝试验结果与模拟结果对比

Fig. 3 Comparison between experimental results and simulation results of the pick-up dam

坝在清水条件下的局部冲刷特性。

3 研究结果与分析

3.1 对口挑流坝的挑流特性

单坝水流受坝体阻水在坝前绕流至下游,坝根近岸处流线转向聚集于坝头,坝后形成明显涡旋。而对口挑流坝因对称结构增强了阻水效应,流线更密集且坝后涡旋对称分布,图 4 为不同长度单坝和对口坝在不同流速条件下的流场分布。由图 4 可看出,坝间距减小导致坝后水流的阻碍增加,坝前水流绕流更加明显,流线转向角度逐渐趋于 90° ,同时坝后涡旋区域扩大强度增强;流速从 0.25 m/s 增至 0.30 m/s 时,水流在坝前区域绕流更远,流线密集程度增幅量级约为 5%。

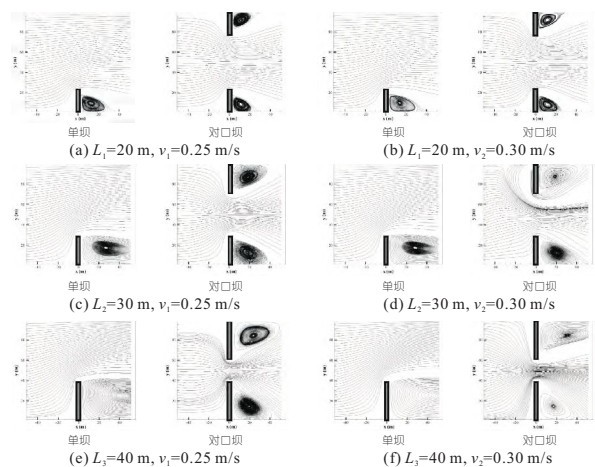


图 4 不同长度单坝和对口坝在不同流速条件下的流场分布
Fig. 4 Distribution of flow fields under different lengths and velocities of single dam and opposite groins

3.2 对口挑流坝局部床面切应力

水流通过挑流坝时受结构阻挡产生冲击和涡流,形成局部的剪切应力。图 5 为不同长度单坝和对口坝在不同流速条件下局部床面切应力分布图。由图 5 可看出,床面切应力沿流向逐渐增大,在横向上分布不均匀,主要集中在挑流坝下游侧。与单一挑流坝不同,对口坝的两个挡水墙使得水流形成对称的涡流,导致局部床面切应力在下游处更大且更集中,而上游侧则相对较小。坝间距减小 40 m,坝头局部床面切应力约增加 2 N/m²;增大流速,水流对挑流坝结构的冲击力增大,对口坝底部局部床面切应力显著增加且分布更不均匀。

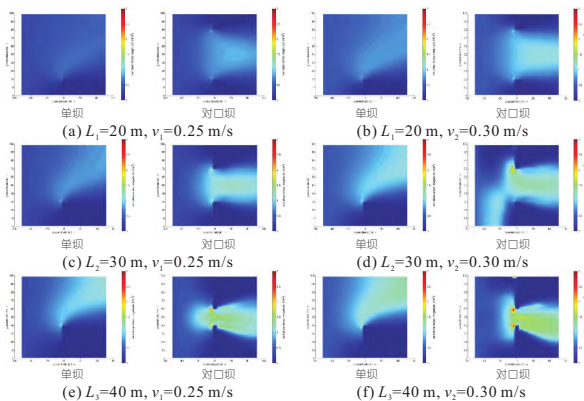


图 5 不同长度单坝和对口坝在不同流速条件下局部床面切应力分布图

Fig. 5 Distribution of local bed shear stress under different lengths and velocities of single dam and opposite groins

为更准确地描述局部床面切应力,采用无量纲切应力进行分析,图 6 为不同长度单坝和对口坝在不同流速条件下局部床面切应力分布图。由图 6 可看出,对口坝间距减小 40 m,最大无量纲切应力值由 2.56 增至 7.48;来流速度从 0.25 m/s 增至 0.30 m/s,整体无量纲切应力水平显

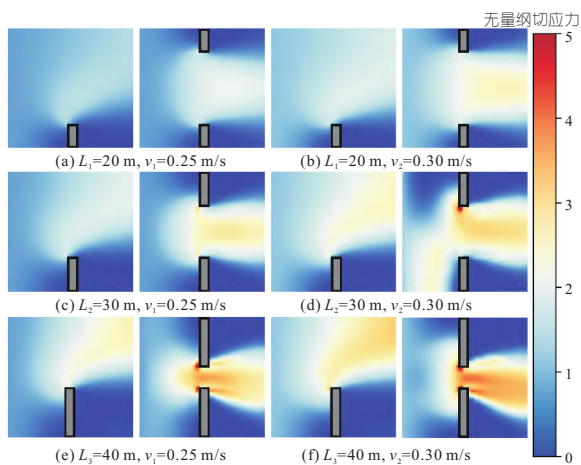


图 6 不同长度单坝和对口坝在不同流速条件下局部无量纲切应力分布图

Fig. 6 Distribution diagram of the local dimensionless shear stress under different lengths and velocities of single dam and opposite groins

著提升,坝头及下游区域切应力集中度更高。具体而言, $L=30\text{ m}$ 时,最大无量纲切应力由 3.17 增至 5.60,增幅约 76.7%,高切应力区域的面积占比由 20.27% 扩大至 34.44%。综上所述,坝长和流速增加强化了对口挑流坝的局部冲刷效应,加剧局部床面侵蚀。

3.3 对口挑流坝局部泥沙冲淤

单坝和对口坝局部泥沙冲淤形态对比见图 7。由图 7 可看出,单坝最大冲刷坑位于坝头附近,流速在下游减小,导致底部泥沙的沉积形成凹陷。而对口坝中,由于两侧挡水墙导致水流在中央位置形成的涡流使得中央区域的泥沙被携带至下游,导致对口坝中央泥沙最大冲刷值增加 3 m。坝间距减小 20 m,坝头冲刷最大约增加 2 m,最大冲刷值增幅约为 45.89%~59.92%;流速增大冲刷值最大增幅约为 13.41%,同时对口坝间的冲刷坑范围扩大,泥沙淤积区域扩散。

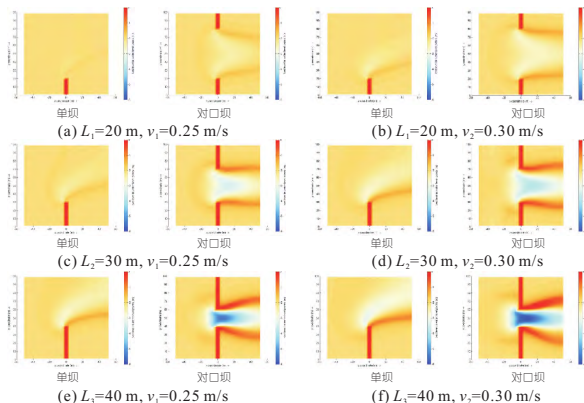


图 7 不同长度单坝和对口坝在不同流速条件下局部泥沙冲淤图

Fig. 7 Diagram of local sediment scouring and silting under different lengths and velocities of single dam and opposite groins

4 讨论

宁健等^[8]发现丁坝最大冲刷在坝头处,冲坑范围在上游侧较小,下游侧较大,与本文单坝冲刷形态一致。此外,本文进一步研究了对口挑流坝的冲淤机制,发现对口坝中央位置的泥沙冲刷较大,形成联合冲刷坑。杨旭亮等^[13]研究了双丁坝泥沙冲淤特性,戚蓝等^[14]研究了河道中丁坝长度对河床的冲刷影响。文献[5, 13-14]丁坝位于同侧,本文研究两侧对称挑流坝(即对口挑流坝)泥沙冲淤特性,并讨论了坝长、流速对其泥沙冲淤机制的影响,分析对口挑流坝的挑流特性、局部床面切应力和泥沙冲淤形态。研究表明,坝间距减小 40 m 时,最大无量纲切应力由 2.56 增至 7.48,绕

流转向趋近 90° 且涡旋加剧; 间距减小 20 m 则坝头最大冲刷值提升 45.89%~59.92%。流速增大会使绕流范围扩大, 流线密集度增加, 最大切应力从 3.17 升至 5.60 (增幅 76.7%), 高切应力区面积占比由 20.27% 扩展至 34.44%, 冲刷坑范围及淤积区扩散, 最大冲刷增幅达 13.41%。此外, 基于数值模拟提出坝间距、流速与冲刷深度之间的经验公式:

$$Y/Y_0 = C(L/L_0)^\alpha (v/v_0)^\beta \quad (5)$$

式中, Y 为冲刷深度; Y_0 为冲刷深度平均值; L 为坝间距; L_0 为坝间距平均值; v 为流速; v_0 为流速平均值; C 、 α 、 β 均为无量纲参数, 取 $C = 0.876$ 、 $\alpha = -0.764$ 、 $\beta = 0.654$ 。

式(5)表明冲刷深度随着坝间距的增加而减小, 随着流速的增加而增大, 与现有研究的定性结论一致。

5 结论

a. 基于 Delft3D 软件构建了清水条件下对口挑流坝局部泥沙冲淤数值模型, 并对模型进行可靠性验证。

b. 对口挑流坝相较于单一结构, 水流分布对称性增强且阻水作用显著, 坝间距减小 40 m 时, 水流转向趋近 90° , 最大无量纲切应力由 2.56 增至 7.48, 流速增大导致其由 3.17 升至 5.60 (增幅 76.7%), 高切应力区面积占比由 20.27% 扩大至 34.44%。此外, 坝间距减小 20 m, 最大冲刷值增幅达 45.89%~59.92%, 流速增大使局部冲刷深度最大增加约 13.41%, 冲刷坑范围扩大。该研究结果对于深入理解对口挑流坝的泥沙输移规律具有重要的意义, 为水利工程及生态环境领域提供理论与实践支撑。

c. 不同于传统单丁坝或同侧丁坝群的研究, 本文研究定性定量揭示了坝间距与流速对冲刷机制的影响, 并创新性地提出针对对口挑流坝的无量纲冲刷深度预测公式。但因仅考虑了清水条件下对口挑流坝的泥沙冲刷, 未来的研究可开展在不同流态条件下对口挑流坝的泥沙冲淤研究。

参考文献:

- [1] GARDE R J, SUBRAMANYA K, NAMBU DRI-PAD K D. Study of scour around spur-dikes [J]. Journal of the hydraulics division, 1961, 87(6): 23-37.
- [2] GILL M A. Erosion of sand beds around spur dikes [J]. Journal of the hydraulics division, 1972, 98(9): 1587-1602.
- [3] MOLLS T, HANIF CHAUDHRY M, KHAN K W. Numerical simulation of two-dimensional flow near a spur-dike [J]. Advances in water resources, 1995, 18(4): 227-236.
- [4] OUILLOON S, DARTUS D. Three-dimensional computation of flow around groyne [J]. Journal of hydraulic engineering, 1997, 123(11): 962-970.
- [5] 彭静, 玉井信行, 河原能久. 丁坝坝头冲淤的三维数值模拟 [J]. 泥沙研究, 2002(1): 25-29. (PENG J, NOBUYUKI T, YOSHIHISA K. Numerical modeling of local scour around spur dikes [J]. Journal of sediment research, 2002(1): 25-29. (in Chinese))
- [6] 宁健, 李国栋, 马森. 丁坝绕流流场及局部冲刷三维数值模拟研究 [J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2017, 32(1): 46-53. (NING J, LI G D, MA M. 3D numerical simulation for flow and local scour around spur dike [J]. Chinese journal of hydrodynamics, 2017, 32(1): 46-53. (in Chinese))
- [7] DUAN J G, HE L, FU X D, et al. Mean flow and turbulence around experimental spur dike [J]. Advances in water resources, 2009, 32(12): 1717-1725.
- [8] KANG J G, YEO H K, KIM S J. An experimental study on tip velocity and downstream recirculation zone of single groyne conditions [J]. Journal of Korea water resources association, 2005, 38(2): 143-153.
- [9] VAGHEFI M, GHODSIAN M, ALI AKBAR SALEHI NEYSHABOURI S. Experimental study on scour around a T-shaped spur dike in a channel bend [J]. Journal of hydraulic engineering, 2012, 138(5): 471-474.
- [10] 张岩, 吴伊平, 崔鹏义, 等. 丁坝长度对弯道水力特性影响的数值模拟研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 164-170. (ZHANG Y, WU Y P, CUI P Y, et al. Numerical simulation for the effect of spur dike lengths on the hydraulic characteristics of the bend [J]. Journal of water resources and water engineering, 2019, 30(1): 164-170. (in Chinese))
- [11] SANEIE M, VAHID N A, MOGHADDAM M A. Buried wing versus wing wall as abutments and spur dykes scour countermeasure [J]. Asian journal of applied sciences, 2012, 5(4): 192-204.
- [12] PANDEY M, AHMAD Z, SHARMA P K. Estimation of maximum scour depth near a spur dike [J]. Canadian journal of civil engineering, 2016, 43(3): 270-278.
- [13] 杨旭亮, 戚蓝, 曾庆达, 等. 双丁坝间流场及局部冲刷的数值模拟研究 [J]. 水力发电, 2020, 46(11): 56-60. (YANG X L, QI L, ZENG Q D, et al. Study on numerical simulation of flow field and local scour between double spur dikes [J]. Water power, 2020, 46(11): 56-60. (in Chinese))
- [14] 戚蓝, 曾庆达, 吉顺文. 天然河道丁坝群局部冲刷三维数值模拟 [J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 59-65. (QI L, ZENG Q D, JI S W. Three-dimensional numerical simulation of local scour based on spur dikes in a natural river [J]. Hydro-science and engineering, 2020(1): 59-65. (in Chinese))