

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222490

闸坝防冲护坦末端淘刷对水流流态影响研究

雷茜茹¹, 汪 振², 张法星¹, 蔡爱玲^{1,3}

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 3. 重庆交通职业学院, 重庆 402247)

摘要: 采用急流衔接的闸坝防冲护坦末端“软硬”交界处或预挖冲坑常常发生基础淘刷破坏, 不仅使护坦处于悬空状态, 还可能引起护坦末端水流流态与设计的急流流态有偏差, 甚至形成水跃状大尺度旋滚淘刷河床, 但相关研究成果很少。针对闸坝下游防冲护坦末端基础发生淘刷的情景, 采用室内机理模型试验和三维湍流数值模型方法, 对护坦末端不同尺寸概化淘刷坑附近的水流流态进行详细观测和计算分析。结果表明, 与护坦末端基础未被淘刷时的急流流态相比, 淘刷坑使水流流态发生很大变化, 可分为护坦上游的水跃、淘刷坑内的混合流、此两类组成的准周期流态三种。流态演化的研究结果可为分析闸坝下游护坦结构大规模破坏提供技术支持, 具有一定工程应用价值。

关键词: 急流衔接; 淘刷坑; 护坦; 水流流态

中图分类号: TV135

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0166-04

1 引言

护坦下游冲刷破坏较为常见, 常出现护坦末端悬空的情况, 其破坏机理非常复杂、修复难度大, 还有可能引发连锁破坏。目前, 关于泄流建筑物下游河道局部冲刷破坏问题的研究成果较丰富, 但对于泄流建筑物下游消力池底板、护坦结构、海漫等冲刷破坏的研究主要集中在冲刷过程、冲刷坑深度计算方面, 很少考虑护坦基础局部发生淘刷导致护坦悬空后淘刷区的水力特性。对此, 本文采用概化的室内模型试验和三维湍流数值模型方法系统研究消能防冲护坦末端基础发生淘刷后的水流流态演化规律, 以为工程实践提供指导。

2 试验设计

2.1 模型设计

试验在宽 0.400 m, 长 5.000 m, 边墙高 0.535 m 的水平无坡降水槽中进行。水槽与上游水箱通过压坡渐变为开度 2 cm 的孔口衔接。模

拟的护坦段总长度为 0.800 m, 厚度为 0.040 m, 护坦首端距离孔口 0.650 m。护坦末端基础未发生淘刷时, 水槽底板水平无坡降。护坦末端基础局部淘刷后, 在护坦末端紧接一个概化的淘刷坑, 其平面尺寸为 0.554 m × 0.400 m, 淘刷坑前、后坡坡度均为 30°, 模型设置及淘刷坑形状见图 1。

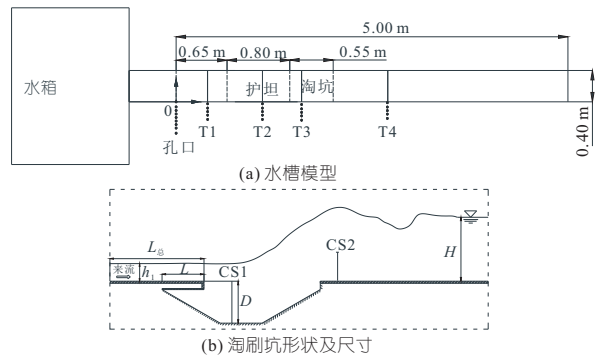


图 1 水槽模型设置及淘刷坑形状示意图
Fig. 1 Schematic diagram of tank model setting and scouring pit shape

2.2 试验工况

试验中, 在护坦未发生淘刷时, 通过控制下游水位形成 4 个起点不同的水跃, 水跃位置见图 1 (a)。在各下游水位下研究不同流量、不同淘刷坑体型、不同悬空比对下游水流流态的影响。同时

收稿日期: 2022-11-27, 修回日期: 2023-01-07

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(52192673); 国家自然科学基金重点项目(51939007)

作者简介: 雷茜茹(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为工程水力学, E-mail: 444850154@qq.com

通讯作者: 张法星(1979-), 男, 博士、副教授、硕导, 研究方向为水力学, E-mail: zhfx@scu.edu.cn

便于分析比较和实践运用,对悬空长度 L 采用护坦总长度 $L_{总}$ 进行无量纲化处理,下游水位 H 采用水跃的跃前水深 h_1 进行无量纲化处理。本次共开展 104 组试验,试验工况见表 1(表 1 中 L_0 表示护坦未破坏,末端没有悬空; $L_i(i=1,2,3,4)$ 表示 4 个不同悬空长度对应不同悬空比 $f(f=L/L_{总},L$ 为护坦末端悬空段长度, $L_{总}$ 为护坦总长度); D_0 表示护坦未发生破坏,即无淘刷坑; $D_j(j=1,2,3,4)$ 表示不同的淘刷坑深度; $H_{1k},H_{2k},H_{3k},H_{4k}(k=1,2,3,4)$ 表示 4 个流量下对应的 4 个不同的相对下游水位)。

表 1 试验工况

Tab. 1 Test conditions

工况编号	单宽流量 q	悬空比 f	淘刷坑深度 D/m	相对下游水位 H/h_1
$q_1-L_0D_0H_{1k}$	0.045	0	0	5.83,5.13,4.50,3.79
$q_2-L_0D_0H_{2k}$	0.068	0	0	8.52,7.75,7.04,6.14
$q_3-L_0D_0H_{3k}$	0.085	0	0	10.57,9.75,8.73,7.64
$q_4-L_0D_0H_{4k}$	0.113	0	0	13.83,13.00,11.69,10.14
$q_3-L_1D_1H_{3k}$	0.085	1/16	0.08,0.12,0.16,0.20	10.57,9.75,8.73,7.64
$q_3-L_2D_2H_{3k}$	0.085	1/8	0.08,0.12,0.16,0.20	10.57,9.75,8.73,7.64
$q_3-L_3D_3H_{3k}$	0.085	3/16	0.08,0.12,0.16,0.20	10.57,9.75,8.73,7.64
$q_3-L_4D_4H_{3k}$	0.085	1/4	0.08,0.12,0.16,0.20	10.57,9.75,8.73,7.64
$q_1-L_4D_1H_{1k}$	0.045	1/4	0.08	5.83,5.13,4.50,3.79
$q_2-L_4D_1H_{2k}$	0.068	1/4	0.08	8.52,7.75,7.04,6.14
$q_4-L_4D_1H_{4k}$	0.113	1/4	0.08	13.83,13.00,11.69,10.14
$q_1-L_4D_4H_{1k}$	0.045	1/4	0.20	5.83,5.13,4.50,3.79
$q_2-L_4D_4H_{2k}$	0.068	1/4	0.20	8.52,7.75,7.04,6.14
$q_4-L_4D_4H_{4k}$	0.113	1/4	0.20	13.83,13.00,11.69,10.14

注:单宽流量 q 单位为 $m^3/(s \cdot m)$ 。

2.3 数值计算方法及验证

基于 Fluent 流体仿真软件建立了基础局部淘空护坦的三维数值模型^[1],并将数值模拟结果与模型试验结果进行对比分析。模型试验水槽中的水流可视三维不可压缩粘性流体,利用 RNG $\kappa-\epsilon$ 模型能很好地模拟充分发展的紊流,且较好地解决流体流动中流线弯曲问题。在数值模拟计算时,用有限差分法离散控制方程作为代数方程组进行数值求解。本次数值模拟网格无关性分析使用 $0.010\ 0\ m \times 0.010\ 0\ m \times 0.005\ 0\ m, 0.006\ 0\ m \times 0.006\ 0\ m \times 0.002\ 5\ m, 0.002\ 5\ m \times 0.002\ 5\ m \times 0.001\ 0\ m$ 三套不同尺寸网格。比较水面线、纵向流速、垂向流速分布图,综合考虑计算准确性和计算效率,最终数值模拟采用网格尺寸 $0.006\ 0\ m \times 0.006\ 0\ m \times 0.002\ 5\ m$ 。数值模拟上顶面 (Z_{max}) 设置为压力进口,压力设为大气压;进口边界采用流量水位进口;出口设置为水位边界。

取模型试验工况 $q_1-L_4D_4H_{13}$,对水槽中心线的水深、多个横断面中心垂线上的纵向时均流速数值计算结果进行验证,横断面位置见图 1(b)。结果表明护坦末端水跃中部剖面的水面

线、垂向时均流速的数值计算值与实测值吻合较好,因此对护坦基础局部淘空后的三维紊流数值计算结果可靠。

3 流态演变结果

护坦末端基础局部淘空后,流态变化很大。根据流场结构特征可将各流态分为三类。

3.1 护坦上游的水跃

该流态与护坦末端未发生淘刷时的水流流态一致,水流从孔口流出后,高流速的水流在孔口下游不远处形成稳定水跃,见图 2。该流态主要发生在单宽流量 q_1 的所有工况;单宽流量为 q_2 时,相对下游水位为 8.52、7.75;单宽流量为 q_3 时,相对下游水位为 10.57;单宽流量为 q_4 时,相对下游水位为 13.83。护坦基础局部淘空后的水跃位置会出现微小变化,淘刷坑所在位置水流以大量掺气形式存在。出现不同体型的淘刷坑后,将在淘刷坑内形成清水区,在垂向上,这一清水区将延伸到底板以上约 10 cm 后才会出现掺气水流,且向下游延伸的范围更大。

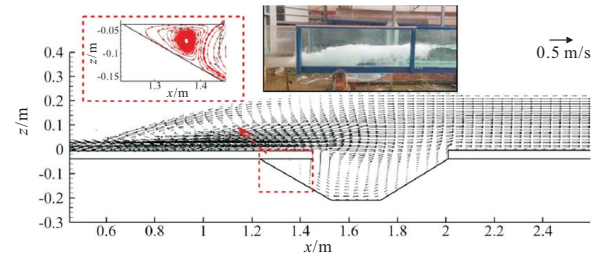


图 2 相对下游水位 (H/h_1) 10.57 时纵剖面流场结构图 (工况 $q_3-L_4D_4H_{31}$)

Fig. 2 Structure diagram of longitudinal profile flow field at 10.57 relative downstream water level (working condition $q_3-L_4D_4H_{31}$)

3.2 淘刷坑内的混合流

该流态主要发生在单宽流量 q_2 ,相对下游水位为 7.04、6.14;单宽流量 q_3 ,相对下游水位为 9.75、8.73。取该种流态的典型工况 $q_3-L_3D_3H_{34}$ 进行展示。当水流从孔口以高速流出后,由于淘刷坑的存在,水流在悬空底板末端处 ($x=1.45\ m$) 水位在较短距离内抬升至最大,紧接着从水位最大点缓缓下降至与下游水位衔接,但在水位下降段由于水流流速较高,快速跌落撞击下游水体,使得这部分水流在与下游衔接处水面出现明显凹陷,见图 3(b)。该流态短暂持续后,抬升的主流逐渐下降,当下降至与下游水位相当时,悬板后逐渐上升水流与下游水体平顺衔接,见图 3(a)。这一流态只能持续较短时间,随后由

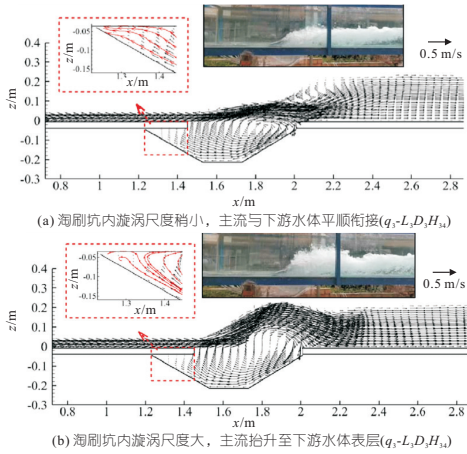


图 3 单宽流量 $0.085 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 时护坦末端基础局部淘刷前后的水流流态

Fig. 3 The flow pattern before and after the foundation at the end of the apron refuses to be brushed when the unit width flow is $0.085 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$

于淘刷坑内的水位低于下游水位,导致下游水流将淘刷坑上部的水流压回,当压回的水流靠近悬板末端时,又会被孔口流出的高流速水流冲向下游,在淘刷坑内主流被漩涡顶托而抬升,如此反复循环。

3.3 准周期流态

该种流态为主流抬升至下游水体表层状态、主流与下游水体平顺衔接状态和护坦上水跃形态周期循环出现的情况。主要发生在单宽流量为 q_3 ,相对下游水位为 7.64;单宽流量为 q_4 ,相对下游水位为 13.00、11.69、10.14 时。取工况 $q_3-L_3D_1H_{34}$ 的流态作为典型流态进行展示,见图 4。

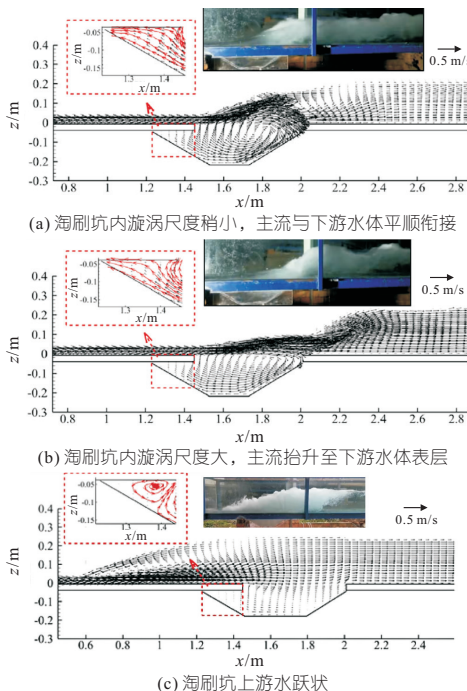


图 4 工况 $q_3-L_3D_1H_{34}$ 的水流流态

Fig. 4 The flow pattern at working condition $q_3-L_3D_1H_{34}$

该流态中的淘刷坑上游水跃状存在明显准周期性,因此在淘刷坑上游形成水跃的护坦上方同时使用 5 个超声波位移传感器(ADM)进行时长 3 min 的水面高程测量,通过水面测量数据进行自相关分析得出淘刷坑上游水跃状流态出现的周期。自相关系数 R 计算式为:

$$R = \text{Cov}(X, X) / \sqrt{V_{ar} |X| V_{ar} |X|} \quad (1)$$

式中, $\text{Cov}(X, X)$ 为 X 与 X 的协方差; $V_{ar} |X|$ 为 X 的方差。

取该种流态的 4 个典型工况,根据同时测量的 5 个断面水面高程并绘制自相关系数曲线见图 5,可知该流态存在一定准周期性,4 个工况流态的变化周期相近。

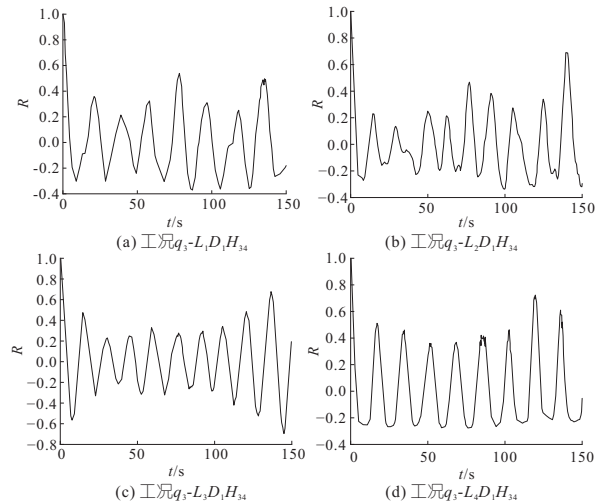


图 5 单宽流量 q_3 ,相对下游水位 7.64 的各工况自相关曲线

Fig. 5 Auto-correlation curve of each working condition with unit width discharge q_3 and relative downstream water level of 7.64

4 试验结果分析

4.1 流场结构概化

淘空后的水流流态、流场结构复杂,呈现出不稳定和随下游水位变化明显的特性,可概化为三类。第 1 类为图 6(a)所示,淘刷坑内的回流漩涡尺度较小,在垂向上漩涡尺度范围不超过护坦上表面,水流在淘刷坑上游形成稳定水跃,从护坦悬空段末端流出的水流紧靠护坦板,称为主流潜底。第 2 类为图 6(b)所示,水流在淘刷坑上游为高流速的急流,流经淘刷坑时受到淘刷坑内漩涡的顶托作用水面明显升高,升至最高点后以较大流速砸落至淘刷坑下游水体,水面出现凹陷,随后升至与下游水位齐平沿出口流出。此流态下从孔口下泄的高速水流位于下游水流上层,主流与淘刷坑底板之间由回流旋滚隔开,可视面流,称为主流上浮。第 3 类为图 6(c)所示,从护坦末端流出的

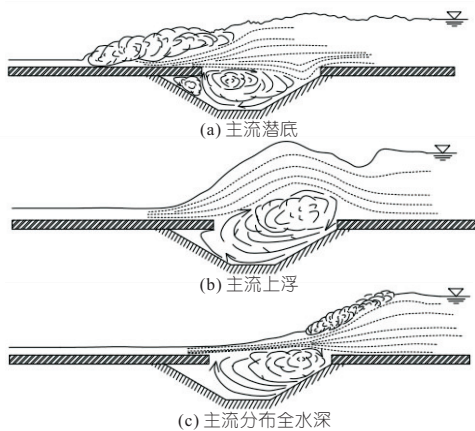


图 6 基础局部淘空后水流流场概化

Fig. 6 Generalization of water flow field after local scouring of foundation

高速水流与下游水体发生撞击, 淘刷坑上部水面高程明显降低, 在淘刷坑后半段时刻伴随着回流出现, 即在淘刷坑后半段上部存在表面旋滚, 主流沿全水深分布, 称为主流分布全水深。

4.2 淘刷坑深度

在单宽流量 q_3 ($0.085 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$)、护坦悬空比为 $1/4$ 、同一相对下游水位 (H/h_1) 条件下研究淘刷坑深度对流场结构的影响。相对下游水位为 10.57 时, 不同淘刷坑深度条件下, 水流均在护坦上形成水跃, 在淘刷坑内形成顺时针 (在右岸观察) 的回流漩涡, 在悬板下部均有逆时针小漩涡生成。淘刷坑内漩涡中心位置随着深度增大在纵向上向下游偏移, 在垂向上往下移动。相对下游水位 (H/h_1) 为 9.75 、下游水位 (H/h_1) 为 8.73 时, 随着淘刷坑深度增大, 水流随时间变化越剧烈、淘刷坑内顺时针回流漩涡的尺度也增大, 使得悬板下部水流流向发生改变, 从向下游流动转变为向上游流动。在单宽流量、护坦悬空比、相对下游水位相同时, 随着淘刷坑深度增加, 淘刷坑内漩涡的

位置在纵向上几乎无变化, 在垂向上整体呈上升趋势。

4.3 相对下游水深

在单宽流量 q_3 ($0.085 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$) 情况下对比分析不同相对下游水位对流场结构的影响, 发现在相对下游水位 (H/h_1) 大于 10 时, 水流在护坦上形成稳定水跃, 由于悬空护坦末端流经淘刷坑上部的高流速水流和淘刷坑内的低流速水流相互作用, 在淘刷坑内形成顺时针 (在右岸观察) 回流漩涡, 并在悬空段下部形成反向小漩涡; 在相对下游水位 (H/h_1) 为 $8 \sim 10$ 时, 水流流态淘刷坑内的混合流; 在下游水位 (H/h_1) 小于 8 时, 水流为准周期性流态。当相对下游水位 (H/h_1) 小于 10 时, 坑内漩涡位置依次向下移动, 且随着下游水位的下降各状态淘刷坑内漩涡的垂向位置亦相应下降, 而纵向位置基本不变, 均维持在距离护坦末端 1.75 倍淘刷坑深度的位置。

5 结论

a. 基础局部淘空后的流态可以分为 3 类, 即护坦上游的水跃、淘刷坑内的混合流、前两类组成的准周期流。

b. 随着淘刷坑深度的增大, 淘刷坑内漩涡尺度随之增大, 漩涡位置在纵向上差异很小, 在垂向上总体向上移动。

c. 随着相对下游水位的减小, 淘刷坑内的漩涡位置在垂向上逐渐下降, 在纵向上维持距离护坦末端 1.75 倍淘刷坑深度的位置。

参考文献:

- [1] 张法星, 徐建强, 徐建军, 等. 白鹤滩水电站¹泄洪洞反弧段水力特性的数值模拟[J]. 水电能源科学, 2008, 26(6): 108-111, 131.

Study on Effect of Scouring at the End of Dam Apron Foundation on Flow Pattern of Water

LEI Qian-ru¹, WANG Zhen², ZHANG Fa-xing¹, CAI Ai-ling^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China;

3. Chongqing Vocational College of Transportation, Chongqing 402247, China)

Abstract: The "reinforced concrete shield and riverbed" junction or pre-excavated pits at the end of the apron of a gate dam with supercritical flow connection mode are often damaged by foundation erosion, which not only leaves the apron in a suspended state, but may also cause the flow pattern at the end of the apron to deviate from the designed supercritical flow pattern, or even form a hydraulic jump like large-scale rolling and scouring riverbed, but there are few relevant research results. For the scenario that suspended foundation at the end of apron caused by local generalized scouring, the detailed observation and computational analysis of the flow patterns near the scour pits of different sizes at the end of the apron were carried out using physical model experiments and three-dimensional turbulence numerical modelling methods. Compared to the supercritical flow pattern at the end of the apron when the foundation is not scoured, the results show that the scour pits change the flow pattern significantly, and can be divided into three categories. The first category is the hydraulic jump upstream of the apron, the second category is the mixed flow in the scour pit and the third category is the quasi-periodic flow pattern consisting of the first two categories. The results of the flow evolution study can provide technical support for the analysis of large-scale damage to the retaining structure downstream of the dam apron, which has certain engineering application value.

Key words: supercritical flow connection; scour pits; apron; flow pattern