

感潮河口闸冲刷修复后运行调度方案研究 ——以龙泉港出海闸为例

邓 群, 马 玲

(上海市堤防泵闸建设运行中心, 上海 200080)

摘要:以龙泉港出海闸为例,分析感潮河口闸下冲刷破坏机理,进行除险加固方案设计,并对水闸除险加固后安全运行进行研究,主要方法是采取现场水文试验率定出过闸流量与水位及水位差的关系,结合加固护底及外侧滩地不冲流速的计算结果,进一步优化水闸运行调度方案,可供类似工程参考。

关键词:感潮闸;冲刷;率定;水闸运行

中图分类号: **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2021)10-0028-05

Study on operation scheduling scheme of tidal estuary sluice after scouring and repairing: A case study of Longquan port offshore sluice

DENG Qun, MA Ling

(Shanghai Dike Pump Gate Construction and Operation Center, Shanghai 200080, China)

Abstract: Taking Longquan port offshore sluice as an example, mechanism of erosion damage under tidal estuary sluice was analyzed, reinforcement scheme was designed, and safe operation of sluice after reinforcement was studied. The main method was to calibrate the relationship between the sluice flow rate and the water level and the water level difference using on-site hydrological test, combined with the calculation results of the reinforced bottom protection and the non-washing velocity of the outer beach, to further optimize the sluice operation scheduling scheme, which could be used as a reference for similar projects.

Key words: tidal sluice; scour; calibrate; sluice operation

上海地区海岸沿线分布大量的出海闸,闸基多为淤积形成的粉砂或淤泥软土,其稳定性及抗冲能力低,加之低潮位时闸内外水位差大,外河流速增加,容易造成河道冲刷,严重时可能导致水闸及相邻建筑物失稳^[1-3],出海闸出险情况时有发生。本文以龙泉港出海闸为例,分析感潮河口闸下冲刷破坏机理,总结加固经验,并在除险加固后开展现场水文试验,以试验数据为支撑,结合加固护底及外侧滩地不冲流速的计算结果,优化调度方案,确保水闸工程除险加固后安全运行,也可类似工程提

供参考。

龙泉港出海闸位于金山区杭州湾金山嘴东侧,于2003年竣工。该工程共3孔,单孔净宽10 m,设计流量 $360 \text{ m}^3/\text{s}$,主要由进水河道、闸室、消力池、海漫及外侧出水河道等主要建筑物组成。闸室长20 m,内河侧设25 m长的钢筋混凝土进水池及圆弧翼墙,进水池内河道长为200 m,外海侧设长38.5 m的钢筋混凝土消力池及60 m长的海漫,海漫外由底宽50 m、长220 m导流堤构成导流河渠,起束水防淤、抗冲保滩作用。导流堤外伸出1条长235 m

收稿日期:2021-06-27

作者简介:邓群(1965—),男,高级工程师,主要从事水利工程建设运行管理工作。E-mail: 1134415878@qq.com

的逐渐扩展的出水槽,保证排涝口门的畅通,防止两侧海塘堤脚受到冲刷破坏。外侧出水河道两侧为管桩护岸,采用抛石护底护坡。

近年来,城镇化加快导致下垫面变化及区域调水需要,龙泉港出海闸作为金山区唯一出海口门,排水频度加大,运行人员未严格按照规程要求操作,水闸实际运行水位差及过闸流量大大超过原设计工况,导致出水河道河床冲刷。根据2017年4月、7月和9月3次测量成果:外海防冲板桩以外30.8 m抛石护滩段出现冲刷,4月份最大冲刷深度为3.39 m,7月份最大冲坑深度为4.13 m,9月份冲刷坑最大深度达5 m,可以看出冲刷在逐步加深,如果不尽快采取除险加固和改善运行工况的措施,将对工程安全及区域防汛安全产生极大影响。

1 冲刷机理及加固方案

1.1 冲刷机理

出海闸地基表层土强度低,抗冲刷能力低,地基土从上往下依次为①₂层冲填土、③₁层淤泥质粉质黏土、③₂层灰色黏土、④层灰色淤泥质黏土、⑤₁层灰色淤泥质粉质黏土及⑤₂层灰色砂质粉土等。冲刷主要在防冲槽末端导流堤之间的河道。究其原因主要有两方面:一是过闸水流由于落差大,虽经消力池消能,但动能消除未尽,出消力池后水流仍存在波状水跃,局部存在折冲水流,导致水流对河床冲刷作用能力增强;二是抛石体趾脚河床被淘刷,导致石头滚动或滑动的趋势增强,当块石量不足时,就导致河槽下切和护岸损坏。

河道冲刷是水流与河道边界相互作用的结果,作用在河底泥沙颗粒上的作用力 F_s 与环绕该颗粒周边的水流有关,且与流速的平方和颗粒截面面积成正比,即,

$$F_s = \alpha \rho g \frac{\pi d^2 v^2}{4 \cdot 2g} \quad (1)$$

式中: F_s 为作用在河底泥沙颗粒上的作用力; v 为作用在颗粒上的水流流速; d 为泥沙颗粒直径; ρ 为水流密度; α 为系数; g 为水重力加速度。而与之相抵抗的水平力 T_s 为:

$$T_s = f(\rho_s - \rho) g \frac{\pi d^3}{6} \quad (2)$$

式中: T_s 为作用在河底泥沙颗粒上的水平力; ρ_s 为泥沙颗粒密度。

当 F_s 大于 T_s 时,即, $v \geq \sqrt{\frac{4f(\rho_s - \rho)gd}{3\alpha\rho}}$ 时,泥沙

颗粒被冲刷^[4]。

可以看出,不冲流速与颗粒直径及摩擦系数的平方根成正比。当摩擦系数取0.4,颗粒直径为0.5 m时,不冲流速为2.80 m/s;当颗粒直径为0.05 m时,不冲流速为0.88 m/s;当颗粒直径为0.005 m时,不冲流速为0.28 m/s。

当抛石下泥沙冲刷,块石所在支撑点形成斜坡面,继而抛石在水流作用及下切力作用下,绕着前点倾覆滚动滑落,如图1所示。

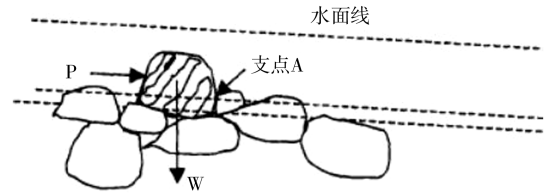


图1 块石滚落受力示意图

设块石的直径为 d ,块石受到自重及水流作用力,块石的浮重为:

$$W = (\rho - \rho_0) g \frac{\pi d^3}{6} \quad (3)$$

式中: W 为块石浮重; ρ 为块石的密度; ρ_0 为水的密度。

将 W 分解为顺坡向的切向分力 $T = W \sin \theta$,垂直于坡面的分力 $N = W \cos \theta$ (θ 为坡面对水平面的倾角)。水流对块石作用力 P 的力臂为 $\gamma_1 d$, T 对点A的转动力臂为 $\gamma_2 d$, N 对A点的转动力臂为 $d/2$ 。

定义块石的倾覆系数 K 为促使块石倾覆的力矩和抵抗块石倾覆的力矩的比值,则

$$K = \frac{N \frac{d}{2}}{P \gamma_1 d + T \gamma_2 d} = \frac{0.5N}{P \gamma_1 d + T \gamma_2 d} \quad (4)$$

K 值越小,块石越容易倾覆。当作用力 P 和 W 一定时,块石滚落倾覆安全系数取决于 γ_1 和 γ_2 ,坡面越陡, γ_1 和 γ_2 越大,滚落安全系数越小。因此当块石下泥沙冲刷到一定程度时,形成一定陡坡,块石滚落,河底河坡直接裸露于水中,直接遭受水流冲刷,如此循环作用,形成冲坑。

1.2 加固方案

本工程水闸加固施工期间需排水运行,不宜断水施工,常见的水下护坡(底)方案主要有模袋混凝土与合金钢丝网兜石笼石。表1为从施工、防冲刷性能、耐久性方面的比选。

考虑到模袋混凝土深水施工难度大,综合考虑后,采取合金钢丝网兜石笼进行护坡护底加固。合金钢丝网笼尺寸为高0.5 m,宽2 m,长度为2 m、

表 1 护坡(底)加固材质方案比选

项目	模袋混凝土	合金钢丝网兜石笼	备注
施工难易程度	较难	容易	1. 模袋混凝土广泛应用于市政、水利工程的水下护底、护坡结构中 2. 合金钢丝网兜石笼广泛应用于生态护坡、水下工程的护坡、护底结构中,透水性、整体性好
防冲刷性能	一般	好	
耐久性	一般	对防腐要求高	
工程造价	较低	一般	

3 m、4 m。加固前若不考虑抛石,河底土抗冲流速约 0.6 ~ 0.7 m/s,加固后合金网笼抗冲流速 5.5 m/s,有效提高防冲强度。

根据不同部位的冲刷深度,采取具体加固措施:对于冲刷深度小于 0.70 m 处,先铺设复合土工布(380 g/m²),然后用 0.20 m 厚袋装碎石找平,再铺设复合土工布(380 g/m²)和 0.50 m 厚合金钢丝网兜石笼;对冲刷较深处先铺设复合土工布(380 g/m²),然后用袋装碎石找平,上铺复合土工布(380 g/m²)和 0.50 m 厚合金钢丝网兜石笼护到 -3.30 m 高程。

2 水位流量现场试验研究

为保障龙泉港出海闸及配套建筑物消力池除险加固后安全运行,需要进一步研究龙泉港出海闸水位流量曲线,掌握不同水位下的流量大小,尽可能减少退潮时高水位落差对闸基的冲刷震动影响。

2.1 水位流量率定

在水闸上游 1.0 km 处与下游 220 m 处各设 1 个测流断面,流量测验采用简易悬索缆道悬吊声学多普勒流速仪(走航式 ADCP)测验,往返 1 次为 1 个测回。有效流量测次共 74 次,同步实时观测上、下游水位。三孔闸门全开运行,实测上游水位变幅为 1.61 ~ 2.49 m,下游水位变幅 1.00 ~ 2.37 m,实测最大水位差 0.64 m,实测流量 155 ~ 332 m³/s。

采用落差法确定水位流量关系曲线。根据实测水位、流量点据及计算水位差采用试错法,定出下游水位与 Q_c 的关系曲线(拟合公式)及上、下游水位差 ΔZ 与流量比 Q/Q_c 的关系曲线(拟合公式),如图 2、图 3 所示。

通过分析计算,得龙泉港出海闸淹没式堰流流量计算公式:

$$Q = 379Z_L^{0.336} \Delta Z^{0.475} \quad (5)$$

式中: Q 为堰流流量; Z_L 为下游水位; ΔZ 为上下游

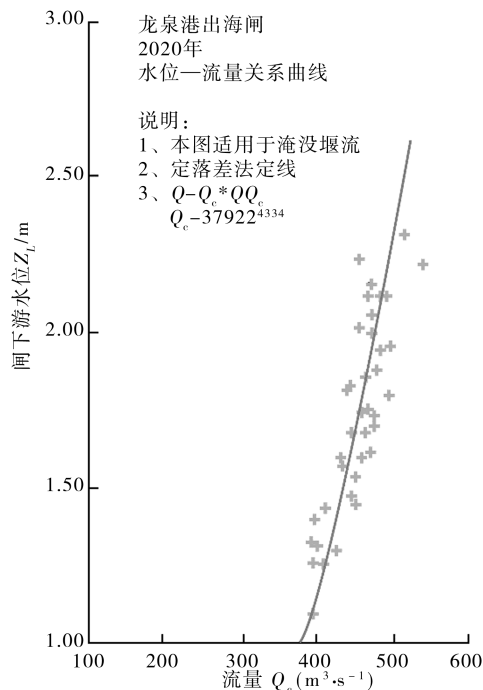


图 2 闸下游水位 Z_L 与 Q_c 的关系曲线

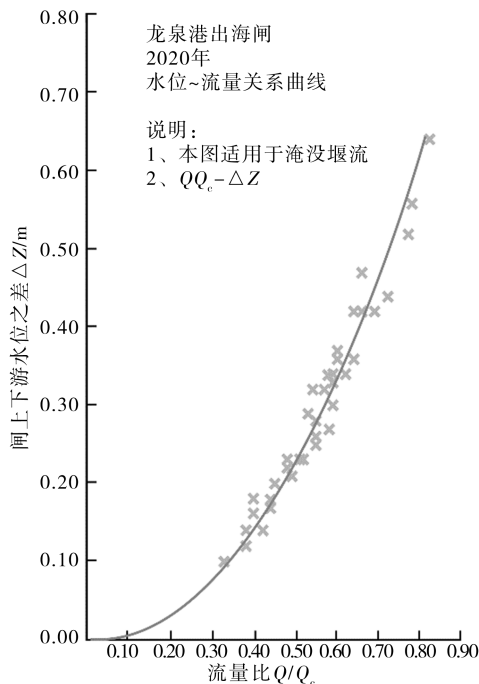


图 3 闸上下游水位差 ΔZ 与流量比 Q/Q_c 的关系曲线

水位差。

2.2 率定公式与规范公式对比

分别用率定公式与《水闸设计规范》(SL 265-2016)公式模拟计算下游水位 1.1 m, 上游水位 2.4 m 条件下开闸运行时过闸流量变化过程, 计算流量结果对比如图 4, 由图 4 可知: ①水位条件相同时, 规范公式计算流量相对率定公式计算流量小, 主要是由于实测时, 开闸泄水一段时间后, 近闸前水位降低、闸后水位相对升高, 因此闸前后水位差较开闸瞬时减少; ②水位差越小, 偏差值越大。说明率定公式更适用于自由出流的堰流, 规范公式求解需准确计算堰流流量系数、淹没系数及侧收缩系数等。

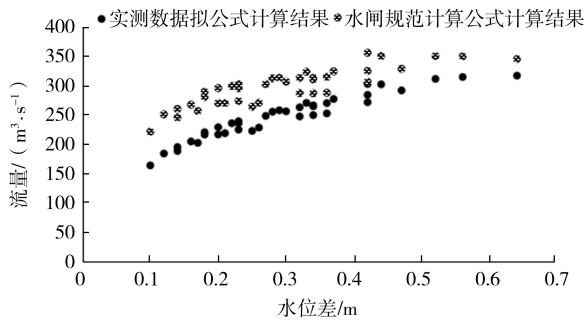


图 4 率定公式与规范公式计算结果对比

3 水闸运行调度方案优化

3.1 水闸过闸流量与消能防冲计算

为保证水闸加固后运行安全, 需考虑在现有水闸消能工安全的前提下, 同时尽可能发挥水闸防洪除涝功能。消能工安全主要在于防止导流堤末端未加固段及现有加固段冲刷, 即要求导流堤内加固段最大水流流速不超过合金网兜石笼允许不冲流速 5.5 m/s, 导流堤外侧最大流速不超过现状河道土不冲流速 0.8 m/s。根据前述试验率定的过流公式, 对不同水位组合下水闸过闸流量进行计算, 同时根据规范公式计算导流堤内及末端最大流速, 计算结果见表 2。

3.2 运行调度优化建议

根据计算结果, 考虑满足水闸运行安全与便于实际操作的要求, 对水闸运行控制提出以下建议:

(1) 开闸前应检查上下游水位, 最低外河水位不宜小于 1.20 m。

(2) 严格按照水闸运行操作规程, 做到平潮开闸(内、外河水位差小于 0.2 m), 严禁出现上游水位骤降的工况。

(3) 为保证水闸安全, 开闸时上下游水位应满

表 2 水闸过闸流量与消能防冲计算成果

外河侧水位/ m	允许最大上下游 水位差/m	内河侧水位/ m	过闸流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	导流堤内最大 流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	导流堤末端最大 流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1.20	0.70	1.90	340	1.80	0.66
1.30	0.70	2.00	349	1.83	0.64
1.40	0.70	2.10	358	1.78	0.65
1.50	0.60	2.10	341	1.76	0.70
1.60	0.60	2.20	348	1.90	0.70
1.70	0.60	2.30	355	1.90	0.68
1.80	0.50	2.30	332	1.79	0.62
1.90	0.50	2.40	338	1.63	0.64
2.00	0.50	2.50	344	1.69	0.64
2.10	0.50	2.60	350	1.65	0.68
2.20	0.50	2.70	355	1.75	0.58
2.30	0.50	2.80	360	1.49	0.58

(续表 2)

外河侧水位/ m	允许最大上下游 水位差/m	内河侧水位/ m	过闸流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	导流堤内最大 流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	导流堤末端最大 流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
2.40	0.40	2.80	329	1.48	0.71
2.50	0.40	2.90	334	1.81	0.66
2.60	0.40	3.00	338	1.68	0.72
2.70	0.40	3.10	342	1.79	0.72
2.80	0.40	3.20	347	1.79	0.72
2.90	0.40	3.30	351	1.79	0.66
3.00	0.40	3.40	355	1.61	0.62
3.10	0.40	3.50	359	1.51	0.68
3.20	0.40	3.60	354	1.62	0.57
3.30	0.40	3.70	357	1.50	0.56
3.40	0.30	3.70	323	1.47	0.54
3.50	0.30	3.80	326	1.42	0.51

注:1. 率定公式适用条件为淹没堰流;2. 水闸设计最大过闸流量为 $360 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

足表 3 要求^[5-6],不得超标运用。

(4)三孔闸门同时启闭进行操作,尽量均匀分级启闭,如不能同时启闭,可由中孔向两侧对称启闭,关闭时与上述顺序相反。

表 3 水闸运行控制水位

外河侧水位/ m	允许最大上下游 水位差/m	内河侧水位/ m
1.2 ~ 1.4	0.70	$1.90 < Z \leq 2.10$
1.4 ~ 1.7	0.60	$2.00 < Z \leq 2.30$
1.7 ~ 2.3	0.50	$2.20 < Z \leq 2.80$
2.3 ~ 3.3	0.40	$2.70 < Z \leq 3.70$
3.3 ~ 3.5	0.30	$3.60 < Z \leq 3.80$

4 结 论

(1)本文分析了感潮河口闸下冲刷机理,得出不冲流速与地基土颗粒粒径关系及冲刷坑形成原因。

(2)提出了采用适应变形能力强的柔性合金网

兜石笼护底、护坡加固方案。

(3)通过现场试验数据,率定了过闸流量与上下游水位及水位差的关系,并提出了适合本工程的运行调度方案,为本工程安全运行提供技术支撑,为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 王斌,韩晓维,刘云等.滨海水闸闸下冲刷成因及布置优化分析[J].中国农村水利水电,2018(3):98-103.
- [2] 韩晓维,王斌.滨海水闸闸下冲刷特征及机理研究[J].人民长江,2018,49(7):91-95.
- [3] 文恒,智泓,牟献友.水闸消能防冲条件的确定[J].水利水电科技进展,2005,25(6):17-20.
- [4] 单海涛.淮河入海水道海口枢纽下游河道冲刷及防护措施研究[D].南京:河海大学,2005:30-44.
- [5] 李占松,高双聚,杨玲霞.平原区水闸闸下消能防冲与闸门控制运行[J].水利水电科技进展,2011,31(5):46-48.
- [6] 刘珊珊.拦潮闸消能设计探讨与研究[J].广东水利水电,2010(11):81-82.