

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221600

感潮河口闸闸下冲刷机理及运维管理方式优化

杨培杰, 潘世虎, 田利勇, 司鹏飞

(上海市水利工程设计研究院有限公司上海市水务局防汛减灾工程技术研究中心, 上海 200061)

摘要: 针对感潮河口闸闸下冲刷严重的问题, 以上海地区为例, 从运维管理角度出发, 探究闸下冲刷机理及运维管理优化方式。通过流态分析及水跃公式推导, 揭示外河水位与临界水深、跃前弗劳德数之间的变化规律, 提出适用于感潮河口闸运维管理的水位求解式。结果表明, 感潮河口闸受潮汐作用, 外河水位变幅较大, 当外河水位低于临界水深时, 建议关闸; 当外河水位推求的跃前断面弗劳德数介于 4.5~9.0 之间时开闸排水, 可有效发挥河口闸排涝功效, 且可有效减小闸下冲刷。结果可为类似感潮河口闸运维管理提供参考。

关键词: 感潮河口闸; 闸下冲刷; 运维管理; 消能防冲; 公式推演

中图分类号: TV135.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0200-04

1 引言

上海市位于长江三角洲冲击平原, 属于典型的平原感潮河网地区^[1]。受海平面上升、人为活动等影响, 上海地区汛期易受台风、暴雨、潮水、上游洪水多碰头恶劣水情灾害的侵扰。自 1970 年代开始^[2], 上海地区提出水利分片综合治理的理念, 通过闸、泵等控制口门实现片区水位合理调度。目前, 上海地区已建及在建河口闸达 40 余座, 多采用“落平潮开闸, 涨平潮关闸”的运行机制。近年来, 随着地区排涝任务的日益繁重, 闸门超常规频繁启闭, 导致多个河口闸出现严重的闸下冲刷现象, 部分河口闸闸下冲刷坑呈逐年冲深趋势, 危及河口闸安全稳定。水闸闸下冲刷严重的问题已引起广泛关注, 但大多数研究集中于闸门选型^[3]、孔口开度^[4]、断面形状^[5]、泥砂特性^[6]、河床形态^[7]等因素, 利用优化运维管理来减少闸下冲刷的研究则较少。日常运维管理中也常结合维护经验对闸门运行提出管理条例, 但主要集中于避免闸门共振、减小始流呈射流冲刷^[8]等角度, 且多为定性经验。近年来, 河口闸闸下冲刷水毁的险情较多, 严重者甚至危及安全运行。因此, 针对上海地区河口闸闸下冲刷问题, 提出运维管理水位红线, 探究适用于感潮河口闸的运行优化水

位, 对于日常运维管理和防灾减灾具有参考意义。

2 流态及冲刷机理分析

上海地区河口闸基多为淤泥形成的粉砂或淤泥软土, 地基基层的强度低、压缩性大, 稳定性及抗冲能力较差。闸下水流衔接条件及泄流流态对外河河床稳定影响巨大。

当外河水位随潮汐作用逐步抬升时, 河口闸日常运维中常出现几种泄流流态: ①状态 1(图 1(a))(图中, V_0 为行近流速, m/s; H 为测压管水头, m; H_0 为内河总水头, m; h_1 为收缩断面水深, m; h_c 为临界水深, m; h_s 为外河水深, m)。当外河水深小于临界水深(即 $h_s < h_c$)时, 外河为急流出流, 消力池中未形成水跃, 外河水体动能大, 水流衔接条件差, 外河河床冲刷严重; ②状态 2(图 1(b))。当外河水深略大于临界水深(即 $h_s > h_c$)时, 外河为缓流出流, 因外河水深较小, 仅形成

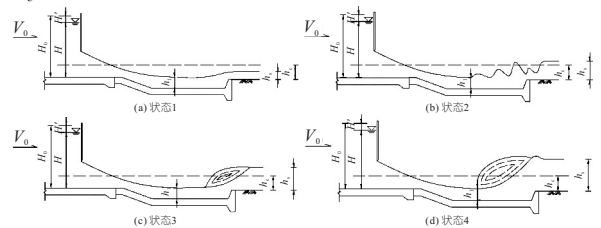


图 1 泄流流态

Fig. 1 Discharge flow regime

收稿日期: 2022-08-03, 修回日期: 2022-10-07

基金项目: 上海市青年科技英才扬帆计划(20YF1443500)

作者简介: 杨培杰(1996-), 男, 硕士、助理工程师, 研究方向为水力学及水工工程设计, E-mail: yangpeijie1996@126.com

通讯作者: 潘世虎(1968-), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为水利水电工程设计, E-mail: psh886@sina.com

波状水跃,消能效率较低,将对外河河床产生一定冲刷;③状态 3(图 1(c))。当外河水深大于临界水深(即 $h_s > h_c$),且外河水深小于跃后水深时,外河为缓流出流,形成远离式水跃,对外河河床稳定有一定影响。由于消力池外河受海漫、防冲槽等结构防护,此流态对外河河床的冲刷相对有限;④状态 4(图 1(d))。当外河水深大于临界水深(即 $h_s > h_c$),且外河水深等于或大于跃后水深时,外河为缓流出流,形成临界式或淹没式水跃,消能效果相对较好。

3 运维水位优化

3.1 外河运维水位与临界水深分析

对于已建河口闸,结合消力池外河侧河床断面形态,可由下式推求临界水深 $h_{临}$:

$$h_{临} = \alpha Q^2 / g = A_c^3 / B_c \quad (1)$$

式中, α 为动能校正系数; Q 为泄流流量, m^3/s ; A_c 为临界水深 h_c 对应的过水面积, m^2 ; B_c 为临

界水深 h_c 对应的水面宽度, m 。

对淀东排涝泵闸、赵家沟东泵闸、张泾河泵闸、金汇港南闸、龙泉港出海闸等上海地区近年典型感潮河口闸工程进行分析,进一步探究外河水位与临界水深的关系。其中淀东排涝泵闸外排黄浦江,承担着青松片区排涝、挡潮的双重功能,其余 4 座均位于一线海塘,承担着片区乃至上海地区的排涝、挡潮任务。河口闸参数见表 1,对应的开度、水位与临界水深关系见图 2(为直观比较,图中临界水深转换为以吴淞零点为基准的水位值)。

由图 2 可知,淀东排涝泵闸、赵家沟东泵闸、张泾河泵闸、金汇港南闸、龙泉港出海闸临界水深随开度、内河水位呈两段式变化,即斜率零段和斜率非零段。其中,斜率零段为堰流出流状态,出流流量不受闸门开度影响,仅随内河水位的升高而增大;斜率非零段为孔流出流状态,出流流量随闸门开度增大而增大,临界水深也随开度增大、内河水位升高而呈增大趋势。

表 1 上海地区典型感潮河口闸外河水位与临界水深关系

Tab. 1 Relationship between water depth and critical water depth outside sluice gate of typical tidal estuary in Shanghai

名称	闸孔参数/m	外河渠道底宽/m	外河边坡系数	外河渠底高程/m	内河控制水位/m	外河多年平均低潮位/m	外河历史最低低潮位/m
淀东排涝泵闸	2×12	55	0	-1.00	2.70	1.44	0.45
赵家沟东泵闸	2×15	75	3	-1.50	2.80	0.87	-0.54
张泾河泵闸	3×10	60	3	-2.00	2.80	-0.30	-1.75
金汇港南闸	30+2×15	100	3	-2.00	2.80	-0.05	-1.52
龙泉港出海闸	3×10	50	3	-2.00	2.80	-0.25	-1.72

注:潮位、高程取用上海吴淞零点基准。

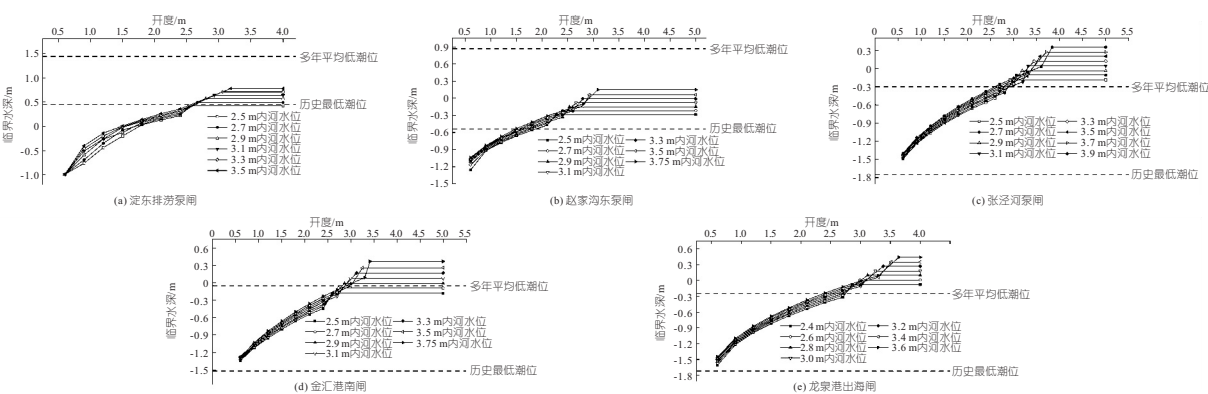


图 2 上海地区典型河口闸外河水位、开度与临界水深关系

Fig. 2 Relationship between water depth and critical water depth outside typical estuary sluice gate in Shanghai

感潮河口闸外河侧水位受潮汐作用明显,外河水位变化显著。由图 2 可知,外河历史最低潮位均低于较大开度下的外河侧临界水深。张泾河泵闸、金汇港南闸、龙泉港出海闸外排杭州湾,受强潮作用更显著,闸门大开度工况均可能出现平均低潮位低于对应的外河侧临界水深的不利出流流态。这也是导致近年金汇港南闸、龙泉港出海

闸闸下严重冲刷,汛后紧急除险加固的重要原因之一。

观察上海沿海水文测站资料发现,外河平均低潮位在空间上呈从北至南降低的趋势,浦东片东南部及浦南东片各感潮河口闸运行维护中均会出现外河平均低潮位低于对应水位、开度下的临界水深的工况。

结合流态分析结果,若感潮河口闸采取“落平潮开闸,涨平潮关闸”的传统运维模式,外河潮位低于临界水深时,闸下泄流呈急流流出流状态,河口闸外河水流衔接条件差,开闸放水将导致闸下无法形成水跃,高速射流对外河河床造成冲刷,对感潮河口闸的安全运行不利。

分析认为,除闸下冲砂和紧急工况外,日常运维管理中,根据水位、开度与临界水深的关系曲线,当外河尾水低于对应的临界水深时,应关闭闸门,减少闸下射流对河床的不利冲刷。

3.2 外河运维水位与跃前弗劳德数分析

当外河水位略高于临界水深时,闸下虽发生水跃,但波状水跃不稳定,消能效率较低。《水力计算手册》中指出^[9]当跃前断面弗劳德数在 4.5~9.0 之间时,可形成较稳定的水跃,消能效率较高。跃前断面弗劳德数由下式计算:

$$Fr_1^2 = v_1^2 / (gh_1) = \eta(\eta + 1) / 2 \quad (2)$$

其中 $\eta = h_2 / h_1$

式中, η 为共轭水深比; h_2 为跃后水深,m; h_1 为跃前水深,m。

根据《水闸设计规范》^[10],水闸消能防冲计算公式分别为:

$$d = \sigma_0 h_2 - h_t - \Delta Z \quad (3)$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{8\alpha q^2}{gh_1^3}} - 1 \right) \left(\frac{b_1}{b_2} \right)^{0.25} \quad (4)$$

$$h_1^3 - T_0 h_1^2 + \alpha q^2 / (2g\varphi^2) = 0 \quad (5)$$

$$\Delta Z = \frac{\alpha q^2}{2g\varphi^2 h_t^2} - \frac{\alpha q^2}{2gh_2^2} \quad (6)$$

式中, d 为消力池深度,m; σ_0 为水跃淹没系数; ΔZ 为出池落差,m; h_t 为外河水深,m; α 为动能修正系数; q 为单宽流量, m^2/s ; b_1 为消力池首宽,m; b_2 为消力池末宽,m; T_0 为消力池底板面起算的总势能,m。

当 $4.5 < Fr_1 < 9.0$ 时,联立式(2)~(4)、(6)可得下式:

$$\alpha' < h_t < \beta' \quad (7)$$

其中 $\alpha' = 5.884\sigma' h_1 - \Delta Z - d$

$\beta' = 12.238\sigma' h_1 - \Delta Z - d$

式(6)中跃前水深 h_1 可由式(5)试算推求。同时,对式(6)一阶求导后整理发现,当 $h_1 \in (0, \sqrt[3]{q^2 / (g\varphi^2)})$ 时, T_0 随 h_1 增大而减小;当 $h_1 \in (\sqrt[3]{q^2 / (g\varphi^2)}, +\infty)$ 时, T_0 随 h_1 增大而增大。

由于宽顶堰上流速系数 φ 为 0.85~0.95,故可得 $h_c = \sqrt[3]{\alpha q^2 / g} < \sqrt[3]{\alpha q^2 / (g\varphi^2)}$,因此在 $(0, h_c)$ 上, T_0 随 h_1 增大而减小。

同时,结合上海地区已建水闸工程内外河水头差普遍较小的工程特性,开闸排涝时外河水深也应满足小于内河水深的正向排水边界条件。整理得 T_0 取上游运行高水位时有:

$$\begin{cases} h_t > \alpha' \\ \alpha' = 5.884\sigma' h_1 - \Delta Z - d \\ T_0 = h_1 + q^2 / (2g\varphi^2 h_1^2) \end{cases} \quad (8)$$

T_0 取上游运行低水位时有:

$$\begin{cases} h_t < \beta' \text{ 且 } h_t < H_0 \\ \beta' = 12.238\sigma' h_1 - \Delta Z - d \\ T_0 = h_1 + q^2 / (2g\varphi^2 h_1^2) \end{cases} \quad (9)$$

根据式(7)、(8)发现,当外河水位介于推求的 (α', β') 区间时,出闸水流的跃前弗劳德数介于 4.5~9.0 之间,外河侧形成较稳定的水跃,消能充分,对于减少外河侧冲刷较为有利。

4 感潮河口闸闸下冲刷机理及运维管理方式优化

为进一步阐述运维优化水位对河口闸的影响,对淀东排涝泵闸 2020 年 7 月~2021 年 6 月间 10⁵ 余组实时运行参数进行分析。淀东排涝泵闸断面见图 3。

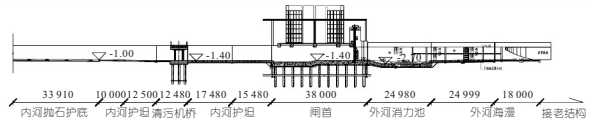


图 3 淀东排涝泵闸结构断面图(单位:mm)

Fig. 3 Sectional view of structure of Diandong drainage pump gate

结合青松片区排涝规划,淀东排涝泵闸内河运行常水位介于 2.50~2.80 m 之间。由式(8)、(9)计算发现,当外河水位介于 0.88~2.80 m 时,闸下可形成较稳定的水跃。计算参数见表 2。淀东泵闸 2020 年 7 月~2021 年 6 月间运维优化前排量与运维优化后排量汇总见表 3。淀东泵闸闸下实测最大冲坑值见图 4。

表 2 输入计算参数

Tab. 2 Input calculation parameter

名称	单位	数值	名称	单位	数值
水跃淹没系数 σ_0		1.05	消力池末宽 b_2	m	27
动能修正系数 α		1.05	消力池深度 d	m	1.3
流速系数 φ		0.95	外河水深 h_t	m	0.88~2.80
消力池首宽 b_1	m	23.00	内河水深 H	m	2.50~2.80

注:内河水深 $H = T_0 - d - \alpha v^2 / (2g)$ 。

表 3 运维优化前排量与运维优化后排量汇总

Tab. 3 Summary of O&M optimization front displacement and O&M optimization rear displacement

月份	优化前 总排量 /10 ⁴ m ³	优化后 总排量 /10 ⁴ m ³	排量 占比 /%	月份	优化前 总排量 /10 ⁴ m ³	优化后 总排量 /10 ⁴ m ³	排量 占比 /%
7	1.97	1.97	100.00	2	3.39	2.95	87.02
8	2.37	2.37	100.00	3	4.37	3.94	90.16
9	2.27	2.27	100.00	4	4.06	3.74	92.12
10	2.66	2.66	100.00	5	4.43	4.28	96.61
11	3.29	3.27	99.39	6	3.80	3.78	99.47
12	3.75	3.47	92.53	合计	40.19	37.75	93.93
1	3.83	3.05	79.63				

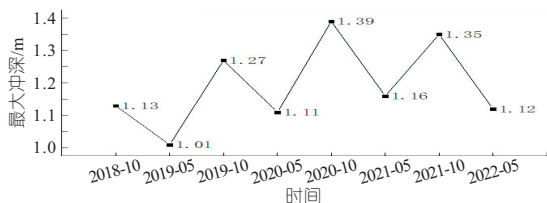


图 4 实测最大冲坑值汇总

Fig. 4 Summary of measured maximum pit value

由表 3 可知,外河水位介于 0.88~2.80 m 时开闸放水,全年总排量呈减小趋势,优化后全年排量约为优化前的 93.93%。其中,汛期(6~9 月)运维优化后排量与优化前排量基本一致,可有效保证汛期河口闸排涝功能的发挥。对比实时监测的水位过程线发现,较非汛期而言,汛期外河平均低潮位较高,出现跃前断面低弗劳德数的频率较低,采用优化后的外河水位进行闸门启闭,对于汛期排涝总流量影响较小。1、2 月运维优化后排量与优化前差异较大,1 月运维优化后排量约为优化前排量的 79.63%。由于非汛期出现台风、暴雨、潮水、上游洪水多碰头组合工况的概率极小,远低于设计重现期标准,故考虑运维优化后非汛期排量也可满足片区常规排水要求。

由图 4 可知,10 月最大冲坑实测值(汛后)均较同年 5 月实测值(汛前)更大,这是由于汛期强排流量大、排涝频率高导致。2018~2021 年间,最大冲坑呈逐年冲深的趋势。2021 年 7 月至今,淀东排涝泵闸采用优化后水位进行闸门启闭管理,最大冲深减小,并较往年同期呈微淤趋势。试运行期间泵闸历经“烟花”等多个台风、暴雨、潮水、洪水多碰头恶劣天气的考验,运行良好,安全度汛。

综上所述,运维优化后运行水位可兼顾排涝流量和闸下河床安全稳定的要求,对于感潮河口闸具有较高的实用性。

5 结论

a. 外河水深小于临界水深时,河口闸闸下出流为急流,闸下无法形成水跃,水流衔接条件差,将对外河河床产生严重冲刷,运维管理中建议关闭闸门。

b. 以本文推演公式推求的水位区间进行河口闸启闭管理,可在一定程度上增大跃前弗劳德数,稳定水跃,减小外河侧河床冲刷。

参考文献:

- [1] 季荣,宋力,侯建宏.特殊工况下平原感潮河网地区防洪(潮)排涝水闸的消能防冲设计—以上海市嘉宝北片区为例[J].水利水电技术,2020,51(增刊1):130-135.
- [2] 张海燕,唐迎洲,徐贵泉,等.上海市骨干河湖分级研究[J].人民长江,2011,42(3):49-52.
- [3] LAISHRAM K, DEVI T T, SINGH N B. Experimental comparison of hydraulic jump characteristics and energy dissipation between sluice gate and radial gate[C]//Innovative trends in hydrological and environmental systems. Springer, Singapore, 2022: 207-218.
- [4] 马广钢,于建忠,傅宗甫,等.大扩散比闸下水流扩散特性的影响因素分析[J].水电能源科学,2019,37(9):83-87.
- [5] DANESHFARAZ R, SADEGHFAM S, AMINVASH E, et al. Experimental investigation of multiple supercritical flow states and the effect of hysteresis on the relative residual energy in sudden and gradual contractions[J]. Iranian journal of science and technology, transactions of civil engineering, 2022, 1-16.
- [6] HAGHIGHI S, KAVIANPOUR M R, NASIRI K. Experimental study of sand sediments effects on submerged hydraulic jump properties[C]//International conference on civil, architectural and hydraulic engineering, 2012, 212: 366-371.
- [7] ALI H M, EL GENDY M M, MIRDAN A M H, et al. Minimizing downstream scour due to submerged hydraulic jump using corrugated aprons[J]. Ain shams engineering journal, 2014, 5(4): 1059-1069.
- [8] 刘顺东. 闸坝开闸瞬间流态模拟及对下游冲刷影响分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(6): 105-107, 100.
- [9] 李炜. 水力计算手册[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [10] 中华人民共和国水利部. 水闸设计规范: SL256-2016[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2016.

应力表现出抑制塑性区发展的特点,而在时效时间较长时,一定程度中间主应力才能促进塑性区的发展。此外,开挖损伤区的存在能促进其内部围岩时效破裂发展,从而扩大塑性区范围。

参考文献:

[1] 陈静. 硬岩时效变形和破坏机制及其工程行为分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.

[2] 苏国韶, 胡诗红, 蒋剑青, 等. 不同中间主应力下花岗岩失稳过程的微震信号演化特征[J]. 水电能源科学, 2023, 41(1): 142-146.

[3] ZHAO J, FENG X T, ZHANG X W, et al. Time-dependent behaviour and modeling of Jinping marble under true triaxial compression [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2018, 110: 218-230.

[4] 沈才华, 张兵, 王文武. 一种基于应变能理论的黏弹塑性蠕变本构模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(12):

3430-3436.

[5] OWEN D R J, HINTON E. Finite elements in plasticity: theory and practice[M]. Pineridge Press, Swansea, 1980.

[6] 姜鹏, 潘鹏志, 赵善坤, 等. 基于应变能的岩石黏弹塑性损伤耦合蠕变本构模型及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 2967-2979.

[7] YANG S Q, HU B, RANJITH P G, et al. Multi-step loading creep behavior of red sandstone after thermal treatments and a creep damage model[J]. Energies, 2018, 11(1): 212.

[8] 潘鹏志. 岩石破裂过程及其渗流-应力耦合特性研究的弹塑性细胞自动机模型[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2006.

[9] 李邵军, 郑民总, 邱士利, 等. 中国锦屏地下实验室开挖隧洞岩体特征与长期原位力学响应分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2021, 61(8): 842-852.

[10] 潘鹏志, 冯夏庭, 邱士利, 等. 多轴应力对深埋硬岩破裂行为的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1116-1125.

Intermediate Principal Stress Effect on Time-dependent Behavior of Deep Hard Rock in Excavation Damage Zone

YU Pei-yang¹, DING Xiu-li¹, PAN Peng-zhi², HUANG Shu-ling¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on elasto-viscoplastic theory of Perzyna and strain energy theory and 3D yield criterion considering the effect of intermediate principal stress, a mesoscopic coupled elasto-viscoplastic-damage model is developed in order to explore the intermediate principal stress effect on the time-dependent behavior of deep hard rock in excavation damage zone. The model is implemented in a software for engineering rockmass fracturing process (CASRock). By comparing modeling results with experimental results, the model and the code are validated. Furthermore, the time-dependent behaviour of #1 laboratory of CJPL-II project is simulated, and the time-dependent fracture process of hard rock in excavation damage zones under different intermediate principal stresses are investigated. The results show that the time-dependent fracture behavior of hard rock exhibits an obvious interval effect of intermediate principal stress. It is found that the interval effect of the intermediate principal stress is affected by time through the isochronous curve clusters of the total viscoplastic strain and the intermediate principal stress. Finally, the existence of the excavation damage zone can promote the development of time-dependent fracture of its internal surrounding rock, thereby expanding the scope of the plastic zone.

Key words: intermediate principal stress; elasto-viscoplastic-damage creep model; time-dependent fracture; excavation damage zone; long-term strength

(上接第 203 页)

Erosion Mechanism and Operation Maintenance Management Mode Under Sluice Gate of Tide-sensing Estuary

YANG Pei-jie, PAN Shi-hu, TIAN Li-yong, SI Peng-fei

(Shanghai Water Authority Engineering Research Center on Flood Control and Disaster Reduction, Shanghai Water Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200061, China)

Abstract: In view of the serious problem of scouring under the sluice gate of the Tidal River, taking the Shanghai area as an example, from the perspective of operation and maintenance management, the scouring mechanism under the sluice and the optimization method of operation and maintenance management were explored. Through the flow state analysis and hydraulic jump formula derivation, the variation law among the water level, the critical water depth of the outer river and Froude number in front of hydraulic jump was revealed. The water level solution formula suitable for the operation and maintenance management of the tidal estuary gate was proposed. The results show that the water level of the outer river fluctuates greatly because the tidal estuary sluice is affected by tidal action; When the water level of the outer river is lower than the critical water depth, it should be prohibited to open the gate; When the Froude number in front of the hydraulic jump section of the outer river level is between 4.5 and 9.0, the drainage of the gate can be effectively exerted, and the erosion under the gate can be effectively reduced. The results can provide a reference for the operation and maintenance management of similar tidal estuarine gates.

Key words: tidal estuary sluices; scouring under gate; operational maintenance management; energy dissipation and anti-scour; formula deduction