



基于航槽冲刷效率的丁坝护底宽度确定方法^{*}

杨燕华¹, 王建军^{1,2}, 杨 阳¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 天津大学, 天津 300072)

摘要: 考虑丁坝护底可压缩一般性的无效冲刷范围, 以达到增加丁坝有效作用效率这一重要功能, 提出基于航槽冲刷效率的丁坝护底宽度确定方法。通过理论分析、数值模拟和物模试验研究, 得到主要结论: 丁坝有效作用效率系数为动床航槽单宽流量增值与定床航槽单宽流量增值的比值。建立了丁坝有效冲刷效率的计算公式, 通过该公式可计算丁坝护底宽度。公式表明: 丁坝的有效冲刷效率为常数; 当护底从丁坝坝根一直护到航槽边缘、形成定床条件时, 丁坝的有效冲刷效率可达到 100%。采用该方法可合理确定护底的宽度, 减小丁坝坝头的一般性无效冲刷范围、增加丁坝对航槽的有效冲刷效率, 使工程作用后的航槽改善效果更好。

关键词: 丁坝; 护底; 作用效率系数; 定床; 动床

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0113-07

Determining method for the bottom protection width of spur dike based on the scouring efficiency of waterway

YANG Yan-hua¹, WANG Jian-jun^{1,2}, YANG Yang¹

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport, Tianjin 300456, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Whereas the bottom protection of spur dike can compress the general ineffective scouring range to increase the effective action efficiency of spur dike, a method for determining the bottom protection width of spur dike based on the waterway scour efficiency has been proposed. The main conclusions are drawn as follows through theoretical analysis, numerical simulation, and physical model test research: the effective action efficiency coefficient of the spur dike is the ratio of the increase in the single-width flow of the movable bed waterway to the increase in the single-width flow of the fixed bed waterway. Calculation formula for the effective scouring efficiency of the spur dike is established, which can be used to calculate the bottom protection width of the spur dike. The formula shows that the effective scouring efficiency of the spur dike is constant; when the bottom protection is from the spur dike root to the edge of the waterway to form a fixed bed condition, the effective scouring efficiency of the spur dike can reach 100%. By this method, the width of the bottom protection can be reasonably determined. Therefore the general invalid scouring range of the spur dike head can be reduced, and the effective scouring efficiency of the spur dike on the waterway can be increased. In this way, the improvement effect of the navigation channel after the engineering is better.

Keywords: spur dike; bottom protection; action efficiency coefficient; fixed bed; movable bed

丁坝属于内河航道整治工程常用的整治建筑物, 通过束水攻沙, 使水流动力轴线发生偏转,

趋向对岸, 达到增加航槽水深的功能, 广泛应用于长江中下游航道整治工程^[1]。由于丁坝束窄了

收稿日期: 2020-12-22

^{*}基金项目: 国家自然科学基金项目(51979132); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(TKS190405)

作者简介: 杨燕华(1985—), 女, 博士, 副研究员, 从事内河航道方面研究。

通讯作者: 王建军(1980—), 男, 硕士, 副研究员, 从事内河航道方面研究。E-mail: wangjianjunb@126.com。

河道断面，改变了周围的水流条件^[2-3]，丁坝坝头附近存在复杂的三维涡流^[4-5]，导致丁坝坝头出现局部冲刷坑^[6-8]，往往引起丁坝水毁，危害建筑物安全。为了维护丁坝的稳定，一般采用护底对丁坝基础进行防护^[9]。目前常用的护底宽度确定方法均是以丁坝冲刷坑深度和范围为依据^[10]，因此，冲刷深度是丁坝设计的重要参数^[11-12]，学者们对丁坝坝头冲刷深度提出了众多计算公式^[13-19]。长江中下游已建丁坝工程均布置护底^[20]，护底形成一个定床床面。随着护底防护范围的增加，局部冲刷坑位置离坝体越远冲刷坑深度也越小^[21-22]；丁坝通过挑流将水流送至对面航槽的程度越高，航槽流速的增加也越明显。即丁坝护底在维持丁坝稳定性的同时，也在一定程度上提高了丁坝对航槽的冲刷效率，提升了工程的航道整治效果。

目前已实施的丁坝工程中，为了防止坝头局部冲刷坑，多设置护底工程，常用的计算方法见公式(1)，核心是在局部冲刷坑的深度基础上来确定护底宽度。

$$L=k_p\Delta h_p\sqrt{1+m^2}\tag{1}$$

式中： L 为软体排横向护底余排长度(m)； k_p 为褶皱系数，取 1.1~1.3； Δh_p 为预计冲刷深度(m)； m 为河床稳定边坡系数， $m=\cot \alpha$ ，其中 α 为河床冲刷后的坡脚。

上述护底范围的确定方法核心是建立在在局部冲刷坑的冲刷深度预测的基础上，目的是维持建筑物的稳定性。未考虑“丁坝护底可压缩一般性

的无效冲刷范围，以达到增加丁坝有效作用效率”这一重要功能。本文将基于这一认识，从提高丁坝冲刷航槽效率的角度为切入点，并以长江下游口岸直河段为研究河段，通过开展该河段数学模型计算和物理模型认识性试验，推导提出丁坝护底宽度的计算公式和确定方法。

1 研究思路

在传统的丁坝航道整治工程中，当航道冲刷动力不足时，往往通过增加丁坝长度进一步束窄河床、加大丁坝自身输水攻沙强度、增加航槽的冲刷，以冲深航槽。

图 1 为丁坝定床作用下的流速分布，假设定床条件下丁坝作用后航槽流速增加值为 Δv_1 。图 2 为丁坝动床作用下河床冲刷示意。由图 2 可见，对于河床可冲的沙质河床或卵石河床，航槽临坝边缘至坝头间纵向流速增加值大导致一般性冲刷幅度大(ΔB_2)，再加坝头附近的局部冲刷坑(ΔB_1)形成后的吸流作用，航道临坝边缘至坝头间单宽流量将明显大于图 1 定床条件，导致动床条件下的航槽流速增加值 Δv_2 明显小于定床条件下的航槽流速增加值 Δv_1 ，丁坝束水攻沙效率较定床预期降低。由此可见，丁坝动床冲刷条件下航槽单宽流速和单宽流量增加值小于定床的原因有两个方面，一是由丁坝坝头局部冲刷坑引起；二是由航道临坝边缘至坝头间的一般性无效冲刷引起。

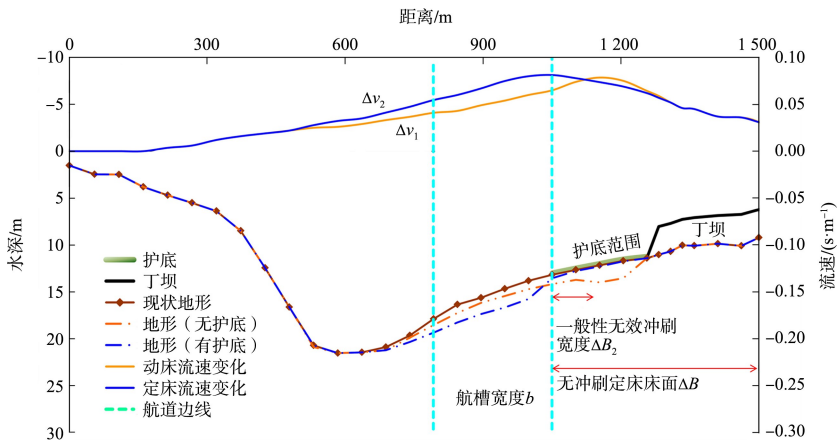


图 1 丁坝作用下的流速分布及河床冲刷情况

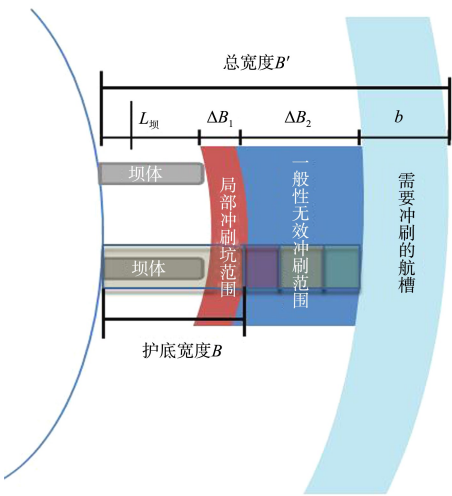


图 2 护底宽度计算示意

为抗拒这种降效行为，往往会通过缩窄整治线宽度进一步压缩河宽，以获得航槽内必要的流速增加值^[23]，但同时又会带来更大的局部冲刷坑 ΔB_1 和航道临坝边缘至坝头间更深的一般性的无效冲刷 ΔB_2 。即便通过缩窄整治线宽度可以实现设计目标，对于中小河流可能可行，但对于长江这样的大江大河，由于防洪等外部条件的限制^[24]，实现增加丁坝长度的方案难度很大。

本文基于长江干线航道整治工程需控制丁坝长度的现实和丁坝一般设置护底的情况，将两者结合起来考虑，提出一种新的思路，即通过扩大现有公式计算的丁坝护底宽度，在原一般性的无效冲刷 ΔB_2 靠近丁坝一侧的一定范围内，形成免冲河床，以尽可能压缩 ΔB_2 无效冲刷的范围，使得航槽内的流速增加，冲刷深度在可变河床条件下仍能达到设计指标。并在上述思路下，提出基于提高航槽冲刷效率的丁坝坝头护底范围确定方法。

采用工程前后流量的变化值 Δq 做为衡量丁坝作用效率的特征指标。

定义系数：

$$K=\frac{\Delta q_2}{\Delta q_1}$$

(2)

式中： Δq_1 为定床条件下丁坝实施后航槽单宽流量增值(m^3/s)； Δq_2 为动床条件下丁坝实施后航槽单宽流量增值(m^3/s)。即用工程前后流量的变化值

表征丁坝作用后动床航槽单宽流量增值 Δq_2 与定床航槽单宽流量增值 Δq_1 的比值，称之为丁坝的有效作用效率指标 K 。

2 护底宽度确定方法

2.1 护底宽度计算公式

护底宽度指沿河宽、垂直水流方向的尺寸参数。根据图 2 护底宽度计算示意，在丁坝尺度一定的条件下，对于护底丁坝而言，丁坝的有效作用效率系数 K 主要与航槽宽度 b 、护底宽度 B 、总宽度 B' 等因素有关。

基于量纲分析原理，丁坝有效作用效率系数 K 可由下式表示：

$$K=(1-C)\left(\frac{B}{B'-b}\right)^m+C$$

(3)

式中： C 为系数，根据试验资料确定； B 为护底宽度(m)； m 为指数，根据试验资料确定； B' 为丁坝坝根至航槽外边缘总宽度(m)。

其中：

$$B'=L+\Delta B_1+\Delta B_2+b$$

(4)

式中： L 为丁坝长度(m)； ΔB_1 为丁坝坝头局部冲刷坑宽度(m)； ΔB_2 为一般无效性冲刷宽度(m)； b 为航槽宽度(m)。

由式(4)可知，护底宽度与丁坝作用效率关系曲线见图 3。

- 1)当丁坝不设置护底，即护底宽度 $B=0$ 时，丁坝的有效冲刷效率为常数，即 $K=C$ 。
- 2)当护底从丁坝坝根一直护到航槽临坝边缘时，此时护底范围最大，即护底宽度 $B=B'-b$ 时，丁坝的有效冲刷效率最大，即 $K=100\%$ 。

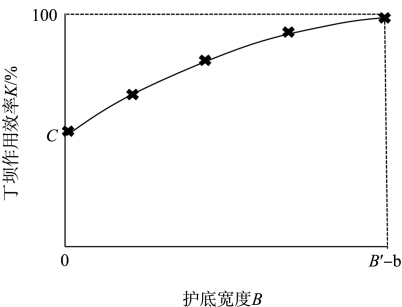


图 3 护底宽度与丁坝作用效率关系

2.2 指标参数率定

式(2)中:

$$\Delta q_1 = H_1 v_1 - H_0 v_0 \approx H_0 (v_1 - v_0) = H_0 \cdot \Delta v_1 \tag{5}$$

$$\Delta q_2 = H_2 v_2 - H_0 v_0 = (H_0 + \Delta H_2) v_2 - H_0 v_0$$
$$= H_0 v_2 - \Delta H_2 v_2 - H_0 v_0 = H_0 \cdot \Delta v_2 - \Delta H_2 \cdot v_2 \tag{6}$$

式中: H_0 、 v_0 分别为丁坝实施前航槽平均水深和平均流速; H_1 、 v_1 分别为定床条件下丁坝实施后航槽平均水深和平均流速; H_2 、 v_2 分别为动床条件下丁坝实施后航槽平均水深和平均流速; Δv_1 为定床条件下丁坝实施后航槽流速增加值; Δv_2 为动床条件下丁坝实施后航槽流速增加值。

将式(5)、(6)代入式(2)有:

$$K = \frac{H_0 \cdot \Delta v_1}{H_0 \cdot \Delta v_2 - \Delta H_2 \cdot v_2} \tag{7}$$

式(3)中 C 和 m 为待定的率定系数。开展典型代表河段多组次模型试验, 不同试验组次中给丁坝设置不同的护底宽度 B , 获取 H_0 、 v_0 、 H_1 、 v_1 、 Δv_1 、 H_2 、 v_2 、 Δv_2 。将上述试验数据代入式(7), 可计算得到不同宽度 B 条件下的丁坝作用效率 K 值。再将不同组次的 K 值和对应的 B 值代入式(3), 可以率定得到 C 和 m 。

2.2.1 试验河段选取

长江中下游成型的过渡性浅滩段较为常见, 如南京以下的世业洲右汊进口顺直段、三益桥浅滩、鳊鱼沙过渡段浅滩等, 从河型、水流、浅滩形态等方面考虑, 选取条件相对简单的口岸直水道鳊鱼沙过渡段作为典型河段。

鳊鱼沙整治工程设计方案主要包括在鳊鱼沙滩脊纵向布置一条潜堤及横向布置 11 对护滩丁坝, 其中潜堤全长约 8 200 m, 各护滩丁坝高度在 150~300 m。图 4 为鳊鱼沙河段设计方案建筑物平面布置。本试验重点关注护滩丁坝坝头冲刷及对开航道的条件改善, 对潜堤效果不做主要分析。具体地, 通过开展护滩丁坝无护底局部冲刷试验和不同护底宽度试验, 分析护底对提高丁坝冲刷效率的作用。

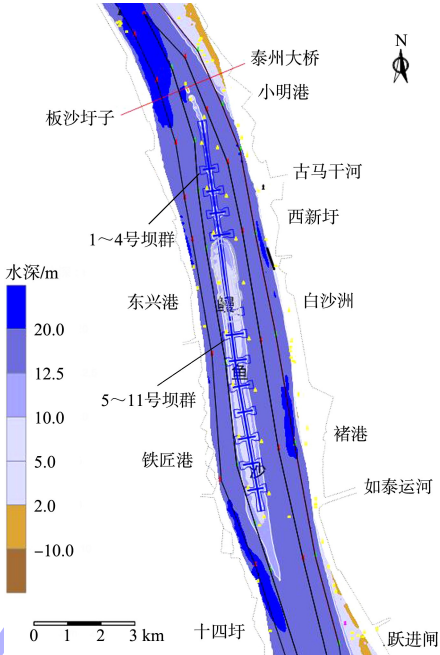


图 4 鳊鱼沙河段护滩丁坝方案平面布置

2.2.2 定床模型试验

2.2.2.1 定床数学模型试验

二维水流数学模型采用 TK-2DC 软件^[25]。计算水文条件选择平均洪水流量(57 500 m³/s)、造床流量(46 000 m³/s)和多年平均流量(28 500 m³/s)。通过数学模型计算, 得到定床条件下丁坝实施后航槽的平均水深 H_1 和平均流速 v_1 。

2.2.2.2 动床局部冲刷模型试验

由于关注的是不同护底范围下冲刷坑的发展、航槽冲刷效率的变化, 为使无护底条件下丁坝坝头冲刷坑较为明显(对航槽冲刷不利), 便于方案之间的效果对比, 水文条件应考虑较大流量, 因此, 选择多年平均洪水流量(57 500 m³/s)、造床流量(46 000 m³/s)和多年平均流量(28 500 m³/s), 水文条件的选取与数学模型定床认识性试验一致。

2.2.2.3 定床数模和动床局部冲刷模型一致性分析

在正式进行试验之前, 为了使模型满足试验需要, 对模型进行了水流率定。数据主要从原有河段数学模型提取, 根据数学模型计算结果对局部冲刷模型进行率定, 由流量为 57 500 m³/s 时的率定结果(图 5)可知: 模型流速测值与数学模型计算值间相对误差在 5% 以内, 建筑物特征部位流

向与数学模型计算值基本一致, 流速的吻合性较好, 物理模型和数学模型计算结果一致性较好, 可用于本文公式参数率定。

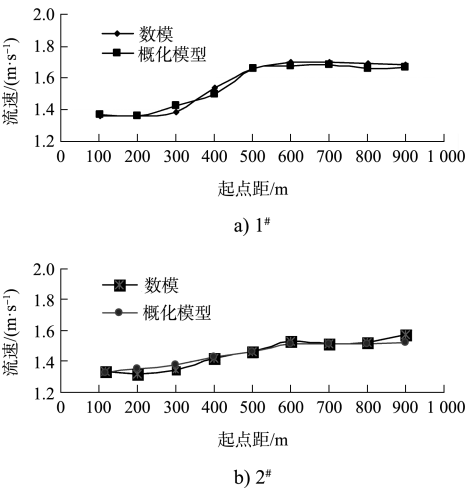
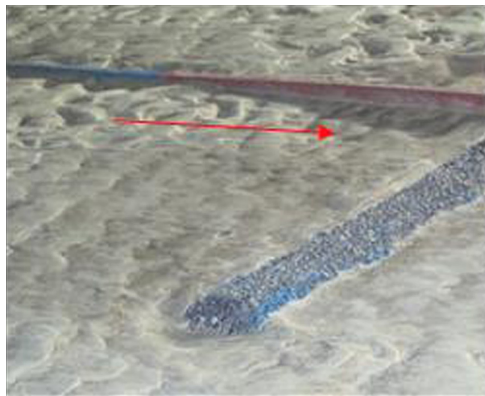
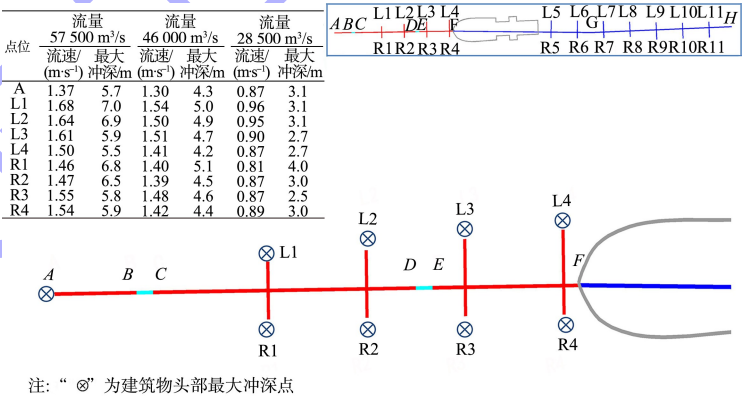


图 5 典型断面定床数模和动床局部冲刷模型流速比较



a) 护滩丁坝局部冲刷试验照片

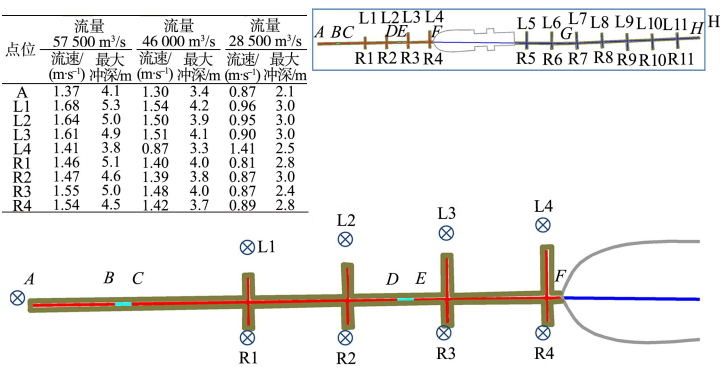


b) 护滩丁坝局部冲刷特征值

图 6 鳗鱼沙心滩左侧无护底时局部河床冲刷情况



a) 护滩丁坝局部冲刷试验照片



b) 护滩丁坝局部冲刷特征值

图 7 鳗鱼沙心滩左侧护底方案 4 局部河床冲刷情况

2.2.2.4 局部冲刷试验及结果

为丁坝设置不同护底宽度, 见表 1。开展各组的局部极限冲刷试验, 以确定动床条件下丁坝实施后航槽平均水深 H_2 、平均流速 v_2 及航槽流速增加值 Δv_2 。

表 1 护滩丁坝护底宽度设计参数					
护底方案	1	2	3	4	5
护底宽度/m	0(无护底)	15	35	55	65

对照图 4, 以图中鳗鱼沙心滩左侧 1~4 号坝群区域为例, 说明试验情况。图 6 为该区域无护底时局部河床冲刷情况, 包括 3 种流量级下特征位置处的流速、最大冲深值, 图 7 为该区域护底方案 4 局部河床冲刷情况。根据图 4 中鳗鱼沙心滩左侧 1~4 号坝群区以及心滩右侧 5~11 号坝群区域的述实测数据, 可以得到航槽平均水深 H_2 、平均流速 v_2 及航槽流速增加值 Δv_2 。

2.2.3 参数率定结果

根据上述口岸直鳊鱼沙河段认识性试验数据,对无量纲参数 C 和 m 进行回归分析,确定了式(3)待定系数: $C=0.5$, $m=1.1$, 得到丁坝有效冲刷效率 K 的计算公式:

$$K=0.5\left(\frac{B}{B'-b}\right)^{1.1}+0.5 \tag{8}$$

通过式(8)可反算得到丁坝坝头护底宽度 B 。

2.3 代表河段应用

仍以鳊鱼沙河段为例,对本文提出的丁坝护底宽度确定方法进行应用。

根据鳊鱼沙河段 12.5 m 航道整治规划目标,航槽宽度为 $b=300$ m。

对于图 4 中的丁坝布置方案,根据鳊鱼沙河段 2014 年 7 月实测地形图,量测得到丁坝坝根至实测地形图中 12.5 m 航槽离坝侧的宽度 $B'=830$ m。

根据鳊鱼沙河段航道设计目标,如要求丁坝有效冲刷效率达到 80%,则有 $K=80\%$ 。

将 $B'=830$ m、 $b=300$ m、 $K=80\%$ 代入式(8),反算丁坝坝头护底宽度 $B\approx 330$ m。

物理模型试验结果表明,通过本文提出的丁坝护底宽度确定方法,可有效增加航槽内有效冲刷范围,工程实施后,鳊鱼沙两槽流速有所增加,左槽进口及右槽出口航道条件得到改善,其中鳊鱼沙左槽达到设计要求的航道尺度,在不利条件下右槽出口航槽存在少量回淤。

3 结 论

1) 丁坝动床冲刷条件下航槽单宽流速和单宽流量增加值小于定床的原因有两个方面,一是由丁坝坝头局部冲刷坑引起;二是由航道临坝边缘至坝头间的一般性无效冲刷引起。由于丁坝护底可压缩一般性的无效冲刷范围,提出护底具有增加丁坝有效作用效率这一重要功能,并提出可基于规划的航槽冲刷效率确定丁坝护底宽度这一思路。

2) 提出了用动床航槽单宽流量增值 Δq_2 与定床航槽单宽流量增值 Δq_1 的比值来衡量动床条件下

的丁坝的有效作用效率,其表达式为 $K=\Delta q_2/\Delta q_1$ 。

3) 提出丁坝有效冲刷效率 K 的计算公式。通过该公式可反算得到丁坝护底宽度 B 。该式表明,当丁坝不设置护底时,丁坝的有效冲刷效率为常数 C ;当护底从丁坝坝根一直护到航槽边缘、形成定床条件时,丁坝的有效冲刷效率可达到 100%。

4) 以长江下游口岸直河段为研究河段,开展了定床二维水流数学模型计算和动床物理模型典型河段局部冲刷试验,基于试验数据进行无量纲分析,确定了待定系数 C 和 m 的值。并以口岸直河段 2014 年 7 月实测地形为例,示范了本文提出的丁坝护底宽度计算方法的使用。

参考文献:

[1] 窦希萍,王向明,姜斌.潮流波浪作用下丁坝坝头概化模型的冲刷试验[J].水利水运工程学报,2005(1):28-33.

[2] 宁健,李国栋,马森.丁坝绕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.

[3] 顾杰,李梦玲.丁坝对弯道水流特性影响的试验研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2018,33(6):786-793.

[4] MCLEAN S R, NIKORA V I. Characteristics of turbulent unidirectional flow over rough beds: Double-averaging perspective with particular focus on sand dunes and gravel beds[J]. Water resources research, 2006, 42(10): 277-305.

[5] METE K, GEORGE C. Flow and turbulence structure around a spur dike in a channel with a large scour hole[J]. Water resources research, 2011, 47(12): 3960-3976.

[6] 张立,孙忠克,徐东坡.丁坝局部冲刷坑形态演变及冲刷平衡临界条件[J].水利学报,2017,48(5):545-550.

[7] 哈岸英,李国栋,杨兰,等.丁坝群间取水建筑物局部流场及其冲淤变形的试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(4):602-611.

[8] ZHANG L, WANG P T, YANG W H, et al. Geometric characteristics of spur dike scour under clear-water scour conditions[J]. Water, 2018(10): 680-693.

[9] 余俊华,夏云峰,徐华,等.护底条件下淹没丁坝坝头局部冲刷试验[J].水科学进展,2016,27(4):579-585.

[10] 天津港湾工程研究所.水运工程土工合成材料应用技

术规范: JTJ239—2005[S].北京: 人民交通出版社, 2005.

[11] 孙志林, 倪晓静, 许丹. 丁坝周围流动图像与局部冲刷深度[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(11): 2189-2196.

[12] PANDEY M, AHMAD Z, SHARMA P K. Estimation of maximum scour depth near a spur dike[J]. Canadian journal of civil engineering, 2015, 43(3): 270-278.

[13] RAUDKIVI J. Functional trends of scour at bridge piers[J]. Journal of hydraulic research, 2015, 43(3): 270-278.

[14] HOFFMANS G J C M, BOOIJ R. Two-dimensional mathematical modeling of local-scour holes[J]. Journal of hydraulic research, 2010, 31(5): 615-634.

[15] ALIREZA M, VAHID D, MEHDI A, et al. Experimental study on depth in around a T-shape spur dike in a 180 degree bend[J]. Journal of American science, 2010, 6(10): 886-892.

[16] 万艳春, 黄本胜. 丁坝坝头局部冲深计算方法综述[J]. 广东水利水电, 2003(2): 52-54, 57.

[17] 应强, 曹民雄, 邢素英. 丁坝坝头冲刷坑深度的研究[J]. 南昌水专学报, 1999, 18(1): 16-20.

[18] 黄志才, 吴国雄, 程尊兰. 丁坝局部冲刷深度的计算[J]. 水利与建筑工程学报, 2004, 2(2): 13-15, 23.

[19] 沈焕荣, 陈其慧, 张云, 等. 丁坝局部冲刷深度计算问题探讨[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2001, 33(2): 5-8.

[20] 陈飞, 陈怡君, 陈婧, 等. 护底余排防护条件下潜堤堤身下游局部试验研究[J]. 中国水运航道科技, 2018(1): 74-79.

[21] 付中敏. 护底软体排破坏机理及应对措施[J]. 水运工程, 2015(7): 118-128.

[22] 付中敏, 李雨晨. 护底余排作用下潜坝下游局部冲刷深度计算研究[J]. 水道港口, 2015, 36(3): 229-233.

[23] 张明进, 杨燕华, 平克军, 等. 口岸直水道物理模型试验研究[J]. 水运工程, 2016(4): 1-6.

[24] 张明进, 杨燕华, 张华庆, 等. 三峡水库蓄水后守护型工程对改善长江中游航道条件的作用[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 55-58, 74.

[25] 王建军, 张明进. 长江南京以下 12.5m 深水航道二期工程口岸直河段选槽数学模型[J]. 水运工程, 2013(12): 1-7. (本文编辑 武亚庆)

~~~~~

(上接第 105 页)

参考文献:

[1] 王新, 胡亚安. 向家坝升船机船厢防撞系统实船撞击试验[J]. 水力发电学报, 2019, 38(1): 12-19.

[2] 李中华, 胡亚安, 刘克平. 向家坝升船机承船厢设计水深标准[J]. 水运工程, 2016(12): 153-157.

[3] 王新, 胡亚安, 李中华, 等. 大型升船机船厢出入水受力特性原型观测[J]. 水利水电工程学报, 2019(3): 1-8. (本文编辑 郭雪珍)

[4] 李学义, 胡亚安, 王新, 等. 景洪水力式升船机下游对接过程实船试验[J]. 水运工程, 2017(7): 17-21.

[5] 王新, 孙志峰. 基于升船机实船试验的船舶吃水控制标准影响因素分析[J]. 水道港口, 2020, 41(5): 578-584.

[6] 包纲鉴. 船舶行驶在船厢中最大下沉量的确定[J]. 水利水电科学研究, 1991(3): 279-282. (本文编辑 郭雪珍)

~~~~~

(上接第 112 页)

[37] 孟祥玮, 高学平, 周华兴. 船闸中间渠道尺度对通航水流条件影响的研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(10): 31-36.

[38] MENENDEZ A N, LECERTUA E A, BADANO N D. Optimización del diseño del sistema de llenado/vaciado del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá[J]. RIBAGUA-Revista Iberoamericana del Agua, 2014(1): 4-13.

[39] 杨艳红. 带不同级数的省水池船闸输水水力特性数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018. (本文编辑 武亚庆)