

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.05.002

钟亮, 孙建云, 刘珺洁, 等. 阶梯形丁坝下游回流规律分析[J]. 水利水运工程学报, 2017(5): 9-17. (ZHONG Liang, SUN Jianyun, LIU Junjie, et al. Analysis on law of backflow around step-shaped spur dike[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(5): 9-17. (in Chinese))

阶梯形丁坝下游回流规律分析

钟 亮^{1,2}, 孙建云², 刘珺洁², 周鑫靖³

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 重庆市信息通信咨询设计院有限公司, 重庆 400041)

摘要: 阶梯形丁坝在航道整治中应用广泛, 其回流规律与船舶通航、坝田淤积及堤岸稳定等系列问题密切相关, 但目前研究很少。应用三维水流数学模型研究双级阶梯形丁坝几何尺度及来流条件对回流规律的影响, 结果表明: ①回流长度随一级丁坝相对长度 ε_1 及高度 ψ_1 、二级丁坝相对长度 ε_2 均呈递增变化趋势, 随弗劳德数 Fr 呈先增大后减小的变化趋势; ②回流宽度随 ε_1 , ε_2 和 ψ_1 变化相对明显, 而随 Fr 变化总体较小; ③回流正、负流区宽度比沿程变化曲线总体为上凸状, 负流区宽度相对较大, 在靠近丁坝部位可达正流区宽度的 2.5 倍; ④回流曲线形态与 ε_1 , ε_2 和 ψ_1 有关, ε_1 和 ψ_1 主要影响回流曲线长度, ε_2 影响回流曲线的整体形态; ⑤回流流量一般小于来流量的 10%, 沿程分布曲线不对称, 增流区回流流量变化相对缓慢, 而减流区变化相对剧烈。

关 键 词: 阶梯形丁坝; 回流尺度; 回流曲线; 回流流量

中图分类号: U617.9; TV131.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2017)05-0009-09

丁坝是常见的航道整治建筑物, 具有改善航道、维护河相和保护水生态等功用。航道整治中, 一般可根据滩险碍航特性选用某级水位将丁坝设计成单一断面型式(以下简称“单式断面丁坝”), 但在某些河段, 由于汛期淤积严重, 退水期冲刷不及, 经常出浅碍航, 如果只采用一级整治水位将难以达到设计的航道尺度标准。为使洪水期少淤, 退水期早冲, 必须采用中水整治(或洪水整治)与枯水整治相结合的方法, 同时为减小对洪水壅高的影响, 较高一级整治水位所对应的整治线宽度必须适当增加^[1], 从而形成阶梯形丁坝(或称“复式断面丁坝”)。目前, 阶梯形丁坝已广泛应用于诸多河段的航道整治工程中, 如三峡水库变动回水区胡家滩滩段、珠江三角洲的东平水道、顺德菊花湾险段以及西江中游界首至肇庆河段等^[2]。

丁坝的修建将改变河床局部形貌并形成独特的水流流态, 回流区是丁坝水分区的重要组成部分, 其水力特性直接影响船舶通航、坝田淤积及堤岸稳定, 一直备受学术界和工程界关注。比如回流尺度方面, 冯永忠^[3]探讨了错口丁坝的回流长度、回流与主流分界线及其最大宽度问题; 李国斌等^[4]研究了非淹没丁坝下游回流长度及最大回流宽度的影响因素; 韩玉芳等^[5]分析了丁坝回流长度与丁坝附近河床冲刷发展过程的变化关系; Ettema 等^[6-7]讨论了丁坝回流边线及分离区尺度问题; 陈稚聪等^[8]探讨了丁坝回流横向和纵向分区问题, 分析了回流尺度及流量沿纵向的变化规律; 郑艳等^[9]研究了丁坝长度对回流长度的影响规律; 马永军等^[10-11]讨论了减小丁坝下游回流尺度的有效方法。然而, 上述研究都是针对单式断面丁坝的, 工程实践表明, 当河道水位介于两级整治水位之间形成非淹没阶梯形丁坝时, 下游回流规律将受两级丁坝几何尺度和水流条件的影响, 较单式断面丁坝更为复杂, 但目前相关研究还鲜有涉及。为此, 本文将以非淹没阶梯形丁坝为例, 探讨双级丁坝几何尺度和来流条件对回流规律的影响, 研究结果可为工程设计提供参考。

收稿日期: 2016-11-12

基金项目: 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2017jcyAX0278); 国家自然科学基金资助项目(51509026)

作者简介: 钟 亮(1980—), 男, 江西赣州人, 副教授, 博士, 主要从事航道整治理论与技术研究。

E-mail: zlcqjtu@163.com

1 数学模型及其验证

1.1 模型建立

1.1.1 基本方程 本文应用三维浅水运动数值模拟开展研究,垂向采用分层二维计算方法,基本控制方程为:

$$\text{连续方程; } \partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - f v + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) = A_x \Delta u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + f u + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) = A_y \Delta v \quad (3)$$

$$P = P_0 + \rho g (H - z) \quad (4)$$

式中: x, y, z 为笛卡尔坐标的 3 个方向; u, v, w 分别为 x, y, z 向的流速分量; t 为时间; ρ 为水的密度; P 为水压力; f 为柯氏系数, $f = 2\Omega \sin \phi$, Ω 为地球自转角速度, ϕ 为当地地理纬度; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}$ 分别为剪切应力张量的分量; A_x, A_y 分别为 x, y 向的紊动扩散系数; Δ 为拉普拉斯算子; P_0 为水表面处大气压力; g 为重力加速度; H 为水深。

根据线性 $k-\varepsilon$ 紊流模型,剪切应力张量的分量 τ_{ij} 可表示为:

$$\tau_{ij} = \rho \left[\nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right] \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

式中: ν_t 为紊动黏滞系数; δ_{ij} 为 Kronecker delta 符号, 当 $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$, 否则 $\delta_{ij}=0$; k 为紊动能, ε 为紊动能耗散率, 求解方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon \\ P_k &= -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \varepsilon) \end{aligned}$$

模型中参数取值为: $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

1.1.2 数值方法 基本控制方程组采用有限体积法离散求解,平面为非结构化的三角形网格,垂向选用分层结构化网格。压力和速度场耦合计算采用 SIMPLEC 算法,代数方程组采用交替方向隐式迭代算法(ADI 算法)和三对角矩阵算法(TDMA 算法)求解,计算收敛准则为所有变量的最大无量纲残差小于 10^{-5} 。

1.1.3 边界条件 设定水槽左、右两岸均为陆边界,水流的法向分量恒为 0;进口边界给定初始流速、紊动能及其耗散率;出口边界给定法向零梯度假定;固壁边界考虑壁面影响,将壁面应力加入方程并修正相应的边界系数和源项;采用 VOF 法计算自由水面。

1.1.4 计算参数 计算中最大、最小时间步长分别取 0.2 和 0.001 s;临界柯朗数取 0.8;为避免水深为 0 或较小时出现计算机数值溢出或发散,设置了干湿单元临界值,干水深 $h_d = 0.005$ m,湿水深 $h_w = 0.10$ m,容许淹没水深 $h_f = 0.05$ m。

1.2 模型验证

1.2.1 水槽试验 采用水槽试验资料进行模型验证,试验在重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心进行,整个循环装置包括水池、泵站、平水塔、量水堰、进水前池、矩形直道水槽、尾水闸门和循环水廊道,水槽长 48 m、宽 2 m、高 1 m,其侧面与底面均采用混凝土抹面,底坡为 5‰。丁坝布设在水槽左岸,丁坝轴线距水槽进口断面 28 m,确保来流平顺并接近均匀流,距水槽出口 20 m,使回流得以充分发展和衰减。丁坝采

用双级阶梯形断面,一级丁坝长 $b_1 = 80$ cm、高 $D_1 = 15$ cm,二级丁坝长 $b_2 = 40$ cm、高 $D_2 = 35$ cm,不考虑丁坝顶部宽度和上、下游边坡的影响,设计成顶宽 10 cm 的直立式丁坝,坝头为半圆形,各级丁坝均采用混凝土制作,并在表面涂上一层红漆(见图 1)。

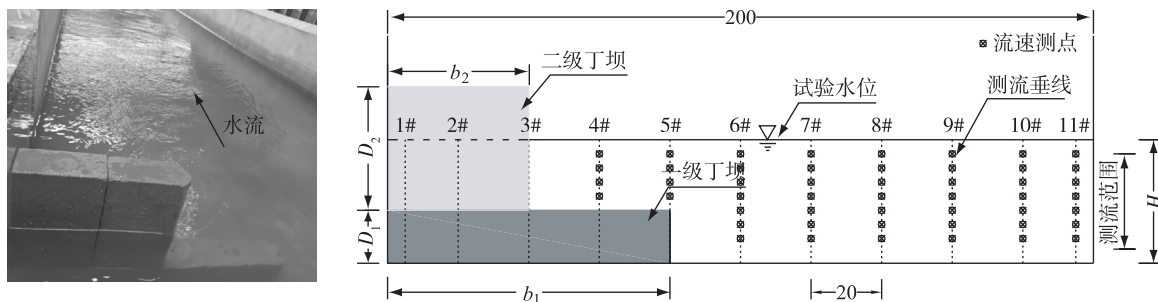


图 1 阶梯形丁坝及流速测点布置(单位: cm)

Fig. 1 Arrangement of step-shaped spur dike and velocity measuring points (unit: cm)

试验流量 $Q = 190$ L/s, 尾门断面水深 $H_0 = 0.35$ m。流量采用量水堰控制。水位采用 SCM60 型测针观测, 沿程布置了 17 个观测断面。流速采用 Vectrino 小威龙流速仪观测, 共布置 7 个观测断面(CS1~CS7), 丁坝轴线位于 CS3, 上游 CS1~CS2 断面距丁坝轴线分别为 75 和 25 cm, 下游 CS4~CS7 断面距丁坝轴线分别为 25, 50, 100 和 150 cm。各断面沿宽度方向均布设 11 条测流垂线, 垂线间距 20 cm (近壁垂线距边壁约 5 cm); 流速采集的水深范围为 4~31 cm, 流速测点间距 4.5 cm, 其中一级丁坝顶部各垂线布置 4 个测点, 其余各垂线布置 7 个测点, 采样点位于流速仪正下方 4 cm 处。

数模计算沿水深方向等分为 9 层, 平面采用三角形网格, 全计算域共 252 045 个单元、14 475 个节点, 丁坝区域计算网格边长 2 cm, 其余区域网格边长逐渐过渡至 8 cm。

1.2.2 水位验证 选择水槽左侧、中轴和右侧 3 条纵向水面线进行验证, 验证结果见图 2, 图中横坐标为采用沿程距离 x 与一级丁坝长度 b_1 之比的相对沿程距离, 纵坐标为采用当地水位 z 与尾门断面水位 z_0 之比的相对水位。结果显示, 丁坝所在的左侧上游自由水面逐渐升高, 至坝前达到最大值, 坝后水面线快速下降, 此后缓慢上升, 至 $x/b_1 = 15$ 处基本保持稳定; 中轴和右侧水面线变化基本一致, 丁坝断面($x/b_1 = 0$)上游水位缓慢下降, 至丁坝前缘受束流影响水位急剧下降, 过丁坝后水流扩散, 水面逐渐上升, 直至保持稳定。从验证效果看, 计算和实测水面线总体吻合, 水位非常接近。

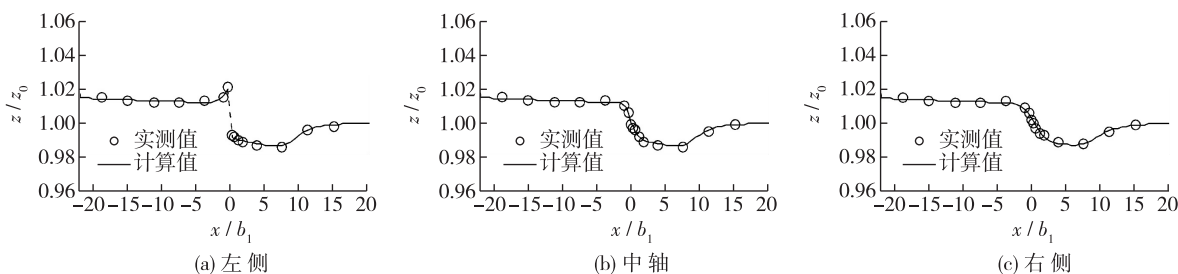


图 2 水位验证

Fig. 2 Verification of water level

1.2.3 流场验证

(1) 平面流速分布 根据水槽试验测流情况, 图 3 给出了距槽底 $0.78H$ 层和 $0.43H$ 层 (H 为丁坝断面平均水深) 的流场分布对比, 可见, 计算和实测流场的流速分布形态及大小较接近, 均揭示了坝头分离流和坝后回流。

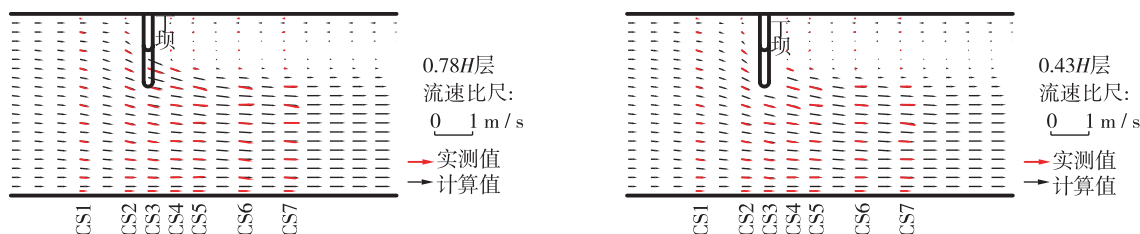


图 3 平面流场验证

Fig. 3 Verification of plane flow field

(2) 垂线流速分布 限于篇幅,图 4 仅给出了丁坝断面(CS3)上 4 条代表垂线的纵向流速垂线分布验证情况,图中 y/B (水槽宽度 $B=2$ m) 为距左侧边壁的相对距离, u/U_0 为采用尾门断面平均流速无量纲化后的流速。验证结果显示,计算与实测流速大小及垂线分布均较为吻合。

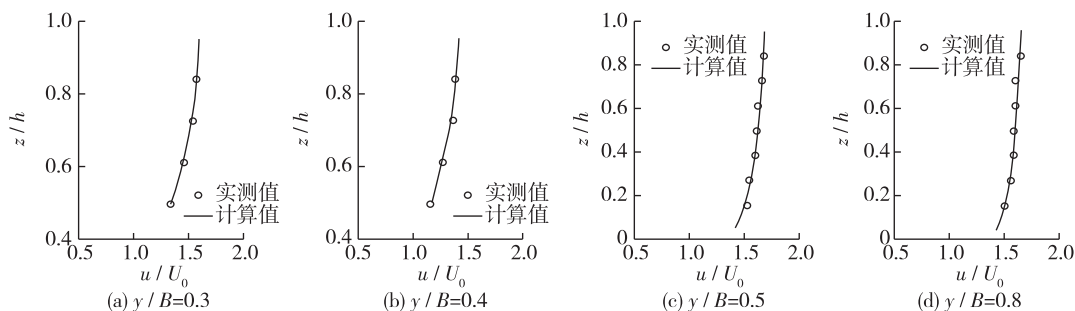


图 4 纵向流速垂线分布验证

Fig. 4 Vertical distribution verification of longitudinal velocity

综上水位和流场验证结果,表明本文数学模型合理,结果可靠,可用于下一步研究。

2 结果与讨论

2.1 丁坝回流区界定

研究^[8]表明,丁坝回流区可进一步划分为正流区和负流区(见图 5),划分方法如下:回流发生并稳定后存在一条曲线 AB ,此线内侧区域为回流区,外侧区域为主流区,主流区流量始终等于上游来流量;回流区内的纵向流速有正有负,正、负向流速交界曲线 AC 的纵向流速为 0,以曲线 AC 为界,内侧区域称为负流区,外侧区域称为正流区,正、负流区的纵向流量绝对值相等而方向相反,处于自成体系的动平衡状态。在回流区,前段(DO 区段)为回流增流区,回流流量沿程逐渐增加,后段(OE 区段)为回流减流区,回流流量沿程逐渐减小,增流区和减流区的分界点 O 处回流流量最大。

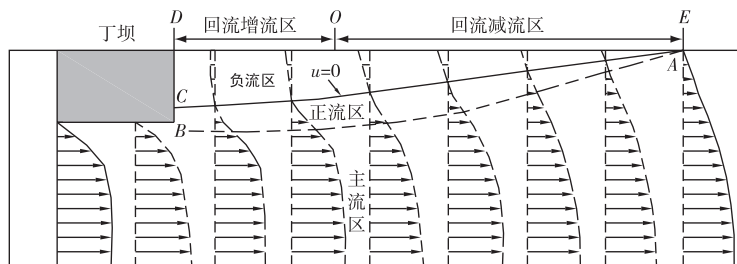


图 5 丁坝回流区划分示意

Fig. 5 Partition of backflow region

2.2 回流参数变化分析

定义一级丁坝相对长度 $\varepsilon_1 = b_1/B$ 、二级丁坝相对长度 $\varepsilon_2 = b_2/B$ 、一级丁坝相对高度 $\psi_1 = D_1/H_0$ 。回流参数包括回流长度、回流宽度、正负流区宽度比、回流曲线形态和回流流量等,下面基于水流数学模型的计算结果(计算工况见表1),探讨阶梯形丁坝几何尺度 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \psi_1$ 和水流条件 Fr 对上述参数的影响规律,成果分析时在丁坝下游回流区每隔 0.25 m 布置一个统计断面,沿断面方向每隔 0.10 m 布置一条统计垂线,各垂线有 9 个流速点据。

表1 水流数学模型计算工况

Tab. 1 Calculation condition of flow mathematical model

工况	$Q/(L \cdot s^{-1})$	H_0/cm	ε_1	ε_2	ψ_1	Fr	工况	$Q/(L \cdot s^{-1})$	H_0/cm	ε_1	ε_2	ψ_1	Fr
1	190	35	0.20	0.20	0.43	0.147	14	190	35	0.40	0.20	0.14	0.147
2	190	35	0.30	0.20	0.43	0.147	15	190	35	0.40	0.20	0.23	0.147
3	190	35	0.40	0.20	0.43	0.147	16	190	35	0.40	0.20	0.34	0.147
4	190	35	0.50	0.20	0.43	0.147	17	190	35	0.40	0.20	0.57	0.147
5	190	35	0.60	0.20	0.43	0.147	18	190	35	0.40	0.20	0.71	0.147
6	190	35	0.70	0.20	0.43	0.147	19	190	35	0.40	0.20	0.86	0.147
7	190	35	0.80	0.20	0.43	0.147	20	190	15	0.40	0.20	1.00	0.522
8	190	35	0.40	0.05	0.43	0.147	21	190	20	0.40	0.20	0.75	0.339
9	190	35	0.40	0.10	0.43	0.147	22	190	25	0.40	0.20	0.60	0.243
10	190	35	0.40	0.15	0.43	0.147	23	190	30	0.40	0.20	0.50	0.185
11	190	35	0.40	0.25	0.43	0.147	24	190	40	0.40	0.20	0.38	0.120
12	190	35	0.40	0.30	0.43	0.147	25	190	50	0.40	0.20	0.30	0.086
13	190	35	0.40	0.35	0.43	0.147							

注: ε_2 变化、 ψ_1 变化和 Fr 变化的计算工况均包括工况 3。

2.2.1 回流长度 图6给出了 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \psi_1$ 和 Fr 对无量纲回流长度 l/b_2 (l 为回流长度) 的影响规律。结果表明:① l/b_2 (或 l/B) 随 ε_1 和 ε_2 均呈递增变化, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 越大, l/b_2 递增变化速度越缓, 回流长度一般可达二级丁坝长度的 20~30 倍;② l/b_2 随 ψ_1 也呈递增变化, ψ_1 越大, l/b_2 递增变化越明显, 这主要因为一级丁坝长度大于二级丁坝, 其高度增大后对坝后回流尺度的影响将更为突出;③ 由于 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 和 ψ_1 的变化将改变河道糙率, 丁坝回流长度与河道糙率有关^[4], 因而 l/b_2 将发生相应变化;④ l/b_2 随 Fr 呈先增大后减小的趋势, l/b_2 最大值出现在 $Fr=0.35$ 附近, 比较而言, Fr 对回流长度的影响较 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \psi_1$ 更不明显;⑤ 阶梯形丁坝回流长度随丁坝坝长的增大而增大, Fr 对回流长度影响较小等变化规律与现有单式断面丁坝的研究结论^[12] 基本一致。

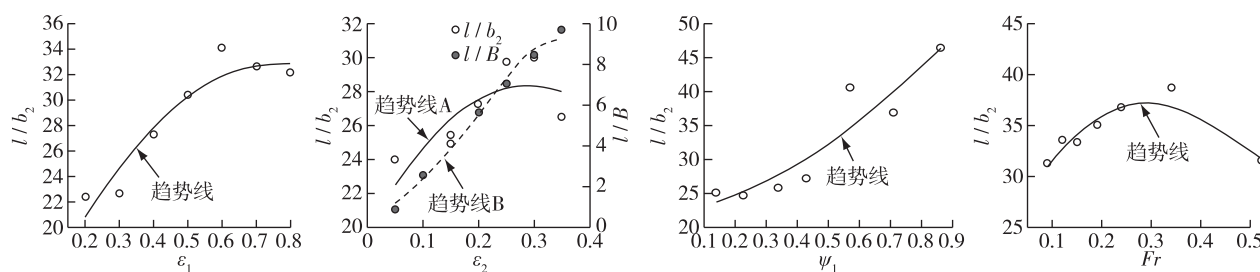


图6 回流长度随影响因素的变化

Fig. 6 Change of backflow region length with influencing factors

2.2.2 回流宽度 图7给出了回流宽度参数(回流宽、正流宽和负流宽)最大值及平均值随 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \psi_1$ 和 Fr 的变化情况。图中显示:① 回流宽、正流宽和负流宽的最大值及平均值随 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \psi_1$ 和 Fr 的变化趋势总体一

致;② 当 $\varepsilon_1 \leq 0.6$ 时,回流宽度参数随 ε_1 缓慢递增,当 $\varepsilon_1 > 0.6$ 时,回流宽度参数随 ε_1 基本不变,最大回流宽约为二级丁坝宽度的 1.5~2.0 倍,与单式断面丁坝的研究结论^[9] 接近;③ 回流宽度参数 b/B 和 b/b_2 随 ε_2 呈现出相反的变化趋势, ε_2 越大, b/B 越大,而 b/b_2 越小,说明回流宽度随二级丁坝长度的增大而增大,但相对增幅逐渐递减;④ 当 $\psi_1 \leq 0.45$ 时,回流宽度参数随 ψ_1 基本不变,当 $\psi_1 > 0.45$ 时,回流宽度参数随 ψ_1 先增大后减小, b/b_2 的最大值出现在 $\psi_1 = 0.70$ 附近;⑤ 最大回流宽度随 Fr 呈先增大后减小的趋势变化,平均回流宽度随 Fr 的变化相对较不明显。

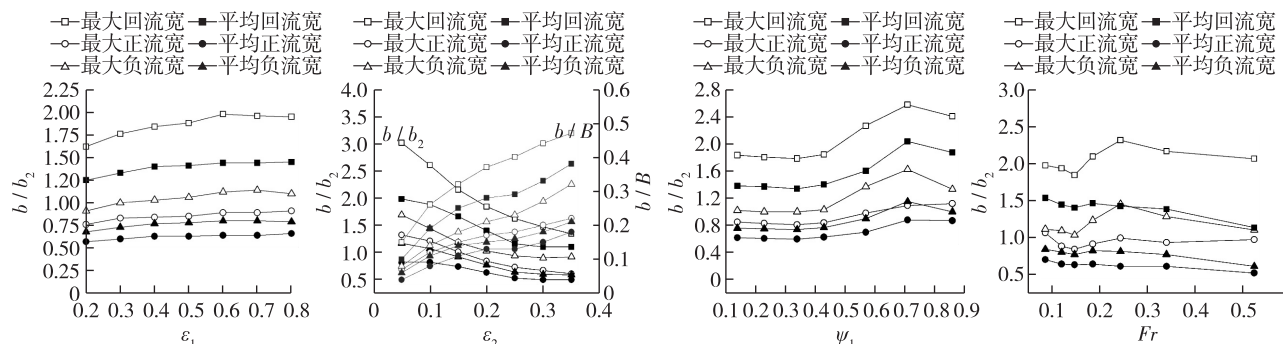


图 7 回流宽度随影响因素的变化

Fig. 7 Change of backflow region width with influencing factors

2.2.3 正、负流区宽度比 图 8 给出了典型计算工况下回流正、负流区宽度比 b_z/b_f 随 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \psi_1$ 和 Fr 的变化趋势(图中 b_z 和 b_f 分别为各统计断面的回流正流区宽度和负流区宽度),图中显示:① b_z/b_f 沿程变化曲线总体为上凸状,多呈先增大、后基本稳定、再减小的变化过程;② b_z/b_f 随 ε_2 变化的波动相对较小,而随 ε_1, ψ_1 和 Fr 的波动相对略大;③ b_z/b_f 值一般小于 1.0,说明负流区宽度相对更大,尤其在靠近丁坝的部位,负流区宽度可达正流区宽度的 2.5 倍。

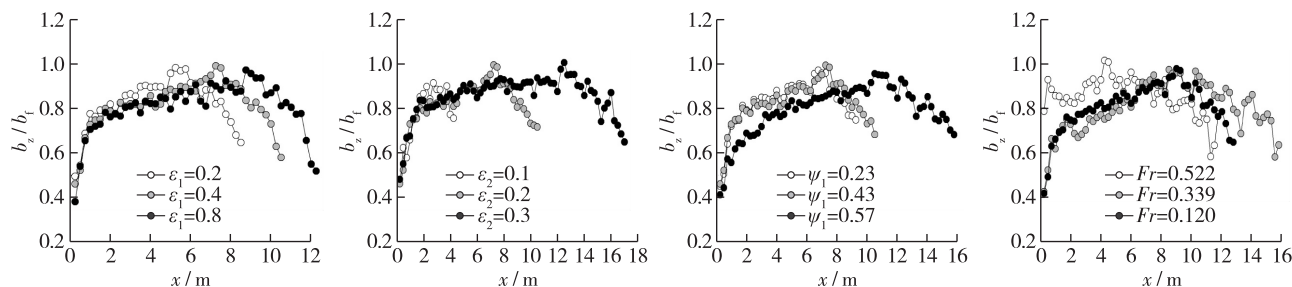


图 8 正、负流区宽度比随影响因素的变化

Fig. 8 Change of positive velocity region width and negative velocity region width with influencing factors

2.2.4 回流曲线形态 图 9 给出了典型计算工况下的回流曲线形态随 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \psi_1$ 和 Fr 的变化趋势(图中 x 为沿程距离, b 为各统计断面的回流宽度),可见:① 与单式断面丁坝回流曲线形态^[8] 类似,阶梯形丁坝的回流曲线也呈纺锤状;② 随着 ε_1 和 ψ_1 的增大,回流曲线最大宽度变化不大,但回流长度逐渐增大,曲线形态逐渐被拉长;③ 不同 ε_2 下的回流曲线差别明显, ε_2 越大,回流曲线长度和宽度也越大,说明 ε_2 对回流曲线形态影响较大;④ 由于 Fr 对回流长度和宽度的影响均较小,回流曲线形态也随 Fr 的变化不大。

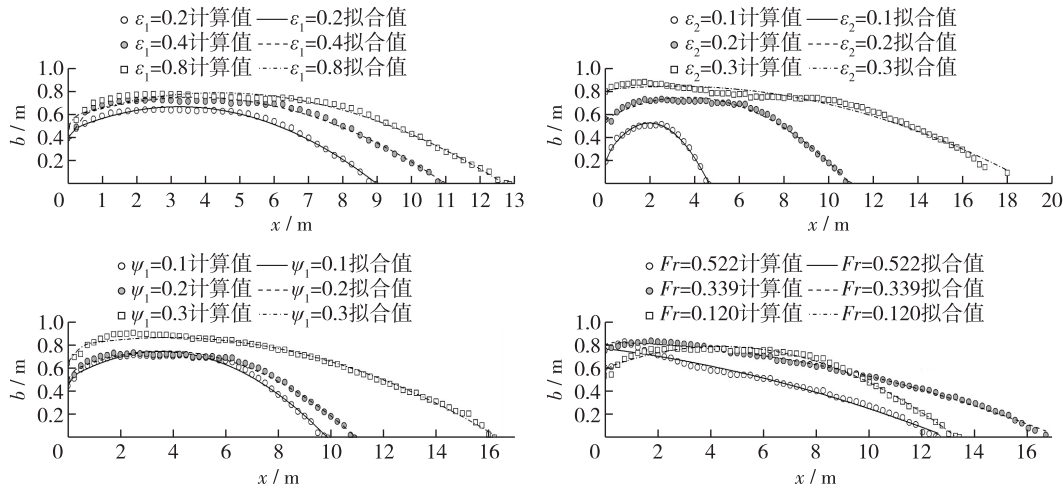


图9 回流曲线形态随影响因素的变化

Fig. 9 Change of backflow curve shape with influencing factors

2.2.5 回流量 根据沿程统计断面的垂线及流速点布置情况,可计算各垂线的分条流量 $Q_i = B_i H_i U_i$, 其中 B_i , H_i , U_i 分别为分条宽度 ($B_i = 0.10$ m)、平均水深和纵向垂线平均流速,从丁坝对岸的右侧向丁坝侧分别计算分条流量 Q_i 。当分条流量之和 ΣQ_i 等于上游来流量 Q 时,该垂线即为统计断面的回流区边界所在位置(实际计算时一般需由相邻两垂线线性内插 $\Sigma Q_i = Q$ 的具体位置);由于回流区正向流动和负向流动的流量之和为0,且各断面流量是闭合的,假定 $Q_i > 0$ 的分条流量和为 Q_1 ,则回流量 $Q_H = Q_1 - Q$ 。根据上述方法,可计算各统计断面的回流流量。

图10给出了典型计算工况下相对回流量 Q_H/Q 的沿程变化情况,结果表明:① Q_H/Q 总体随 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 和 ψ_1 的增大而增大,随 Fr 的增大而减小,各工况下 Q_H/Q 最大值多在 0.04~0.10 范围内变化,说明回流流量一般小于来流量的 10%;② 紧邻丁坝下游端回流流量逐渐增大,为回流增流区,当达到最大值后,回流流量逐渐减小,为回流减流区,增流区和减流区的分界点沿程位置随 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \psi_1$ 和 Fr 的变化范围分别为(2.37~3.38), (1.24~4.64), (2.74~3.14)和(1.24~3.13)倍水槽宽度,说明 ε_1 和 ψ_1 对分界点沿程位置的影响较小,而 ε_2 和 Fr 的影响较大;③回流流量沿程分布呈右偏的不对称曲线,增流区回流流量变化相对缓慢,而减流区变化相对剧烈。

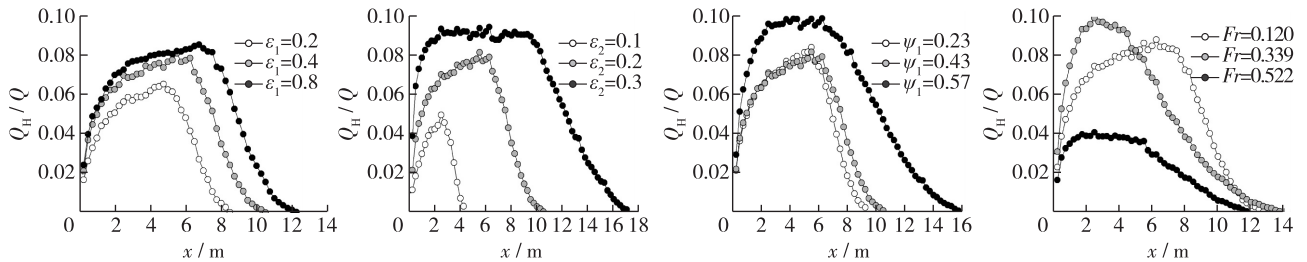


图10 回流量随影响因素的变化

Fig. 10 Change of circumfluence flow with influencing factors

3 结 语

阶梯形丁坝是常见的航道整治建筑物,应用三维水流数学模型并在模型验证的基础上,研究了阶梯形丁坝几何尺度及来流条件对回流规律的影响,主要认识如下:

(1) 阶梯形丁坝回流长度随一级丁坝相对长度 ε_1 及高度 ψ_1 、二级丁坝相对长度 ε_2 均呈递增趋势, 随弗劳德数 Fr 呈先增后减的变化趋势, 回流长度最大值出现在 $Fr=0.35$ 附近。

(2) 回流宽、正流宽和负流宽的特征值随 ε_1 , ε_2 , ψ_1 和 Fr 的变化趋势总体一致; $\varepsilon_1 \leq 0.6$ 时回流宽度缓慢递增, 此后基本不变; 回流宽度随 ε_2 的增大而增大, 但相对增幅逐渐递减; $\psi_1 \leq 0.45$ 时回流宽度基本不变, $\psi_1 > 0.45$ 时回流宽度随 ψ_1 先增大后减小; 最大回流宽度随 Fr 呈先增大后减小的趋势变化, 平均回流宽度随 Fr 的变化相对较不明显。

(3) 回流正、负流区宽度比沿程变化曲线总体为上凸状, 多呈先增大、后基本稳定、再减小的变化过程, 负流区宽度相对较大, 在靠近丁坝部位可达正流区宽度的 2.5 倍。

(4) 阶梯形丁坝的回流曲线呈纺锤状, ε_1 和 ψ_1 主要影响回流曲线长度, ε_2 影响回流曲线的整体形态, 而 Fr 对回流曲线形态影响较小。

(5) 回流流量一般小于上游来流量的 10%, 沿程分布曲线不对称, 增流区回流流量变化相对缓慢, 而减流区变化相对剧烈。

参 考 文 献:

- [1] 周冠伦, 荣天富, 刘书伦, 等. 航道工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 687-688. (ZHOU Guanlun, RONG Tianfu, LIU Shulun, et al. Waterway engineering handbook[M]. Beijing: People's Communication Press, 2004: 687-688. (in Chinese))
- [2] 周鑫靖. 非淹没双级复式断面丁坝三维水流特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016. (ZHOU Xinjing. Three-dimensional flow characteristics of non-submerged spur dike with two-stage compound section[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [3] 冯永忠. 错口丁坝回流尺度的研究[J]. 河海大学学报, 1995, 23(4): 69-76. (FENG Yongzhong. Study on recirculating flow range caused by groins lying alternately[J]. Journal of Hohai University, 1995, 23(4): 69-76. (in Chinese))
- [4] 李国斌, 韩信, 傅津先. 非淹没丁坝下游回流长度及最大回流宽度研究[J]. 泥沙研究, 2001(3): 68-73. (LI Guobin, HAN Xin, FU Jinxian. Study on the length and maximum width of the circulating region caused by a dike[J]. Journal of Sediment Research, 2001(3): 68-73. (in Chinese))
- [5] 韩玉芳, 陈志昌. 丁坝回流长度的变化[J]. 水利水运工程学报, 2004(3): 33-36. (HAN Yufang, CHEN Zhichang. Variation of re-circulation length of spur dikes[J]. Hydro-Science and Engineering, 2004(3): 33-36. (in Chinese))
- [6] ETTEMA R, MUSTE M. Scale effects in flume experiments on flow around a spur dike in flat bed channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(7): 635-646.
- [7] SHARMA K, MOHAPATRA P K. Separation zone in flow past a spur dyke on rigid bed meandering channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 138(10): 897-901.
- [8] 陈稚聪, 黑鹏飞, 丁翔. 丁坝回流分区机理及回流尺度流量试验研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 613-617. (CHEN Zhicong, HEI Pengfei, DING Xiang. Division and flow scale investigation of circulation zone around spur dike[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5): 613-617. (in Chinese))
- [9] 郑艳, 魏文礼, 刘玉玲. 丁坝长度对回流长度影响的数值模拟研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(2): 195-199. (ZHENG Yan, WEI Wenli, LIU Yuling. Influence of spur-dike length on the recirculation scale by numerical simulation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(2): 195-199. (in Chinese))
- [10] 马永军, 陈稚聪, 丁翔. 控制和减小丁坝下游回流影响的实验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(8): 1096-1099. (MA Yongjun, CHEN Zhicong, DING Xiang. Controlling recirculating regions downstream of spur dikes[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2003, 43(8): 1096-1099. (in Chinese))
- [11] 马永军, 陈稚聪, 丁翔. 吸、喷水法减小丁坝下游回流尺度的试验研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 763-768. (MA Yongjun, CHEN Zhicong, DING Xiang. Experimental study on reducing the size of circulating region in the downstream of spur dikes[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 763-768. (in Chinese))
- [12] 窦国仁. 丁坝回流及其相似律的研究[J]. 水利水运科技情报, 1978(3): 1-24. (DOU Guoren. An investigation on the whirlpool flow and its similarity laws[J]. Information of Hydro-Science and Engineering, 1978(3): 1-24. (in Chinese))

Analysis on law of backflow around step-shaped spur dike

ZHONG Liang^{1, 2}, SUN Jianyun², LIU Junjie², ZHOU Xinjing³

(1. *National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*; 2. *Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*; 3. *Chongqing Information and Communication Consulting and Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400041, China*)

Abstract: Step-shaped spur dike is widely used in the waterway regulation, and the law governing the backflow is closely related with the problems such as ship navigation, siltation of dam field (deposition between two groins) and embankment stability, but few studies are conducted in this field. In this research, the influence of spur's geometric scale and inflow condition on the backflow is studied by using a three dimensional mathematical model of water flow. The results show that: ① The backflow region length increases with the increasing of the relative length ε_1 and relative height ψ_1 of the first stage spur dike and the relative length ε_2 of the second stage spur dike, and it increases first and then decreases with the Froude number Fr ; ② The backflow region width changes relatively obviously with ε_1 , ε_2 and ψ_1 , and changes little with Fr overall; ③ The width ratio curve of the positive velocity region and the negative velocity region is overall convex, and the negative flow width is relatively large, which can be 2.5 times the width of the positive velocity region near the spur dike; ④ The shape of backflow curve is related to ε_1 , ε_2 and ψ_1 , and ε_1 and ψ_1 mainly affect the length, while ε_2 affects the overall shape; ⑤ The circumfluence flow is less than 10% of the discharge, and its distribution curve is asymmetric, with slow change in the flow increasing area and relatively severe change in the flow decreasing area.

Key words: step-shaped spur dike; size of backflow region; backflow curve; backflow discharge