

•水利与土木工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400190



本刊网刊

## 船型浮堤布置形式对水流结构影响数值分析

李彬<sup>1,2</sup>, 鲁俊<sup>1,2</sup>, 李超群<sup>1,2\*</sup>, 陈翠霞<sup>1,2</sup>, 任晓光<sup>3</sup>

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 水利部黄河流域水治理与水资源安全重点实验室, 河南 郑州 450003;  
3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

**摘要:** 船型浮堤相比于丁坝, 具有缓流促淤、生态适宜特点, 但将船型浮堤应用于河道整治尚缺乏足够理论支持。为进一步揭示船型浮堤对水流结构的影响, 采用  $k-\epsilon$  模型 ( $k$  为湍动能) 研究船型浮堤淹没比例  $D$  (即吃水深度: 水深)、长度比例  $K$  (即船长: 河宽)、布置角度  $\theta$  ( $\theta > 0$  时下挑) 与床面横向坡度对船型浮堤三维水流特性与湍动能分布的影响, 并利用水槽试验验证。结果表明: 1) 随着  $D$  从 0.2 增至 0.8, 船型浮堤下方最大相对纵向流速 (即  $U/U_{0\max}$ ,  $U$  为局部最大流速,  $U_{0\max}$  为入口平均流速) 增加, 回流长度与  $U/U_{0\max}$  分别从  $1.0L$  ( $L$  为船长) 增至  $3.5L$ 、从  $-0.35$  增至  $-0.51$ , 船型浮堤后方湍流强度随  $D$  增加而增大。2) 随着  $K$  增加, 船型浮堤下方与外侧流速增加, 回流区与缓流区范围增大, 但回流区长度与回流强度保持不变, 湍动能强度增强并在船型浮堤底部与后方形成核心区。3) 船型浮堤向上挑 ( $\theta = -30^\circ$ ) 时阻水作用明显, 近岸处其上游  $U/U_{0\max}$  衰减至 0.4, 底部  $U/U_{0\max}$  (1.53) 小于  $\theta$  为  $30^\circ$  时的  $U/U_{0\max}$  (1.63); 船型浮堤后方缓流区分布范围在下挑时大于上挑, 下挑时水流流态平稳, 湍动能较弱并在船型浮堤后方形成局部加速区与环流。4) 当船型浮堤布置于深水侧时, 水流集中在船型浮堤下方, 回流区强度增加, 河床横向坡度使船型浮堤后方环流增强。上述研究结果表明: 船型浮堤缓流促淤效果在其布置于深水侧、向下挑、淹没比例  $\leq 0.4$ 、长度比例  $\leq 0.5$  时最好, 船型浮堤后方缓流区稳定、环流发育、对底部流场扰动小, 具有生态适宜性。研究结果为实际河流整治工程提供了技术支持与参考。

**关键词:** 船型浮堤; 水动力结构; 河流整治; 数值模拟

中图分类号: TV13

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)02-0278-11

在河流与航道整治中, 丁坝是使用最为广泛的整治建筑物。丁坝可以保持河流或航道所需水深, 使主流偏转防止水流冲刷破坏, 减小对河岸的侵蚀<sup>[1-2]</sup>并改善水生生物栖息地环境<sup>[3-5]</sup>。当水流经过丁坝时, 在丁坝上游出现三维水流分离并在丁坝下游出现马蹄涡, 复杂的流态促进冲刷坑发育<sup>[6-7]</sup>, 水流不稳定会产生不利的流态与河势, 影响河流的稳定与整治工程的安全<sup>[8]</sup>。丁坝影响区域内的泥沙输移与水流结构、湍流相关, 冲刷区域和冲刷坑发育与床面形态密切相关<sup>[9-11]</sup>。

传统航道整治建筑物侧重于整治工程效果而在一定程度上忽略了对河流生态的影响。传统的护岸和丁坝利用水泥、砂浆、混凝土等作为主要建筑材料, 形成封闭的结构, 阻隔了上下游水流与生态系统物质与能量交换, 破坏了生境。为改善底栖生物群落生存环

境, 研究者提出了透空型丁坝形式<sup>[12]</sup>, 研究了梯形透空丁坝局部冲淤演变<sup>[13-14]</sup>、泥沙输移特征<sup>[15-16]</sup>及其对底栖生物群落、鱼类活动的影响<sup>[17-18]</sup>。Wan 等<sup>[19]</sup>对长江重庆段的生态丁坝的水流特征与浮游生物群落进行了研究, 结果表明, 丁坝下游浮游生物多样性高于上游, 这与丁坝下游处溶解氧显著增加, 水体浊度与流速显著降低有关。相比固定于河床上的整治建筑物, Huang<sup>[20]</sup>和黄卫<sup>[21]</sup>等认为浮在水面上的结构 (如浮堤与浮筏) 具有对河流泥沙输移影响较小、更好适应上游来水来沙、对河床与生态环境影响较小等优势。浮堤结构常见于水电站拦污导漂<sup>[22-23]</sup>、泵站进水口不良流态整治<sup>[24]</sup>、海岸浮式防波堤消浪<sup>[25-27]</sup>等。目前, 将浮堤结构应用于河道整治的研究较少, 缺乏浮堤对水流与泥沙运动作用机理的研究。

收稿日期: 2024-03-20 修回日期: 2024-08-31 网络出版日期: 2024-09-10

基金项目: 国家重点研究计划项目 (2022YFC3202405); 开封市科技发展计划项目 (2503010)

作者简介: 李彬 (1994—), 男, 工程师。研究方向: 河流动力学。E-mail: Libin0425@tju.edu.cn

\* 通信作者: 李超群, 正高级工程师, E-mail: c.q.li@163.com

在实际应用中可将小型船舶充当浮堤结构,这种结构称为船型浮堤。本文针对浮堤的布置形式对水流结构与湍流特征的影响开展数值模拟研究,利用黄卫等<sup>[21]</sup>的浮堤局部三维水流特性试验结果进行验证。以往对丁坝的研究围绕丁坝的几何形状、河床泥沙特性与上游来流条件对丁坝周围水流结构与冲刷模式<sup>[28]</sup>的影响,本文从船型浮堤几何尺寸(船体长度、吃水深度)与布置形式(挑角、岸边水深)方面分析船型浮堤对水流结构的影响,探究船型浮堤的保护岸滩的效果与生态适宜性。

### 1 工况说明与模型建立

整治工程对水流结构影响的数值模拟模型包含 RNG  $k-\varepsilon$  模型<sup>[29-30]</sup>、雷诺应力模型<sup>[31]</sup>和大涡模拟模型<sup>[4,32]</sup>。魏文礼等<sup>[33]</sup>采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型对弯道内布设丁坝后的水流结构进行了数值模拟分析。RNG  $k-\varepsilon$  模型在大尺度运动中体现出小尺度运动影响,常用于模拟高应变率及流线弯曲较大的流动,具有较高的稳定性和计算精度。RNG  $k-\varepsilon$  模型的动量方程与湍动能、湍动能耗散率方程分别如式(1)~(3)所示<sup>[34-35]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho g_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho G - \rho \varepsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon}^* G - C_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $x_i, x_j$ 分别为水流在*i, j*方向坐标, m;  $u_i, u_j$ 为流速在*i, j*方向上的速度分量, m/s;  $p$ 为压力, Pa;  $\rho$

为密度, kg/m<sup>3</sup>;  $g_i$ 为在*i*方向上重力加速度分量, m/s<sup>2</sup>;  $\varepsilon$ 为湍流耗散率, m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>;  $k$ 为湍动能, m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>;  $\mu_t$ 为湍流黏性系数,  $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ , Pa·s;  $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{2\varepsilon}$ 均为经验系数,  $C_\mu = 0.085, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 0.7179, C_{2\varepsilon} = 1.68$ ;  $\mu$ 为分子黏性系数, Pa·s;  $G$ 为湍动能产生项,  $G = \frac{\mu_t \partial u_i}{\rho \partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ , m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>;  $C_{1\varepsilon}^*$ 为与 $\mu$ 相关的函数。

利用粒子图像测速法(PIV)可获得精细的流场结构<sup>[36]</sup>,黄卫等<sup>[21]</sup>通过水槽试验,利用高分辨率PIV系统测量浮堤周围局部三维水流特性。为增加研究成果的可靠性,本文构建的数值模型与黄卫等<sup>[21]</sup>的物理试验模型相同。本次模拟区域长 1.40 m, 宽 0.30 m, 深 0.05 m, 底部坡降 0.001, 船型浮堤布置于左岸( $X=0, Y=0, Z=0.50$  m,  $X$ 为水流方向坐标,  $Y$ 为横向坐标,  $Z$ 为垂向坐标, 底部 $Z=0$ ), 区域平面图如图 1 所示。表 1 为本次数值模拟工况,  $W$ 为河宽,  $h_0$ 为水深, 分析船型浮堤的几何尺寸(长度  $L$ 、淹没深度  $d$ )、布置角度  $\theta$ (上挑为-, 下挑

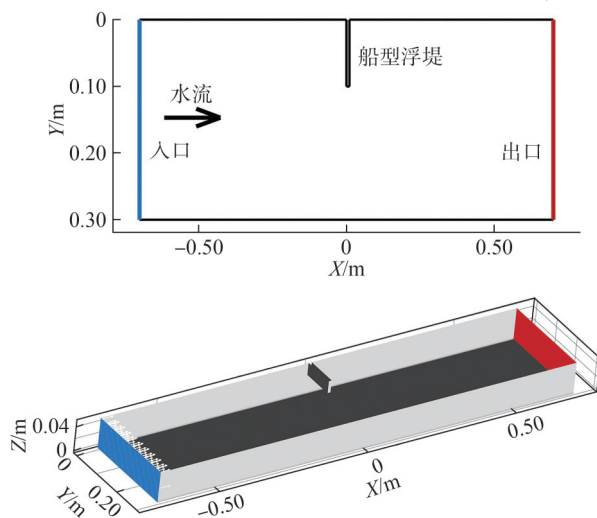


图 1 计算区域平面图

Fig. 1 Plain view of computation domain

表 1 船型浮堤模拟工况

Tab. 1 Simulation cases of ship-shaped floating dike

工况编号	淹没深度 $d/cm$	淹没比例 $D(D=d/h_0)$	船型浮堤长度 $L/cm$	长度比例 $K(K=L/W)$	船型浮堤宽度 $B/cm$	船型浮堤角度 $\theta(^{\circ})$	河床横向坡度 $S_L$
1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	0.4	10	1/3	1	0	0
3	1	0.2	10	1/3	1	0	0
4	4	0.8	10	1/3	1	0	0
5	2	0.4	5	1/6	1	0	0
6	2	0.4	15	1/2	1	0	0
7	5	1.0	10	1/3	1	0	0
8	2	0.4	15	1/2	1	-30	0
9	2	0.4	15	1/2	1	+30	0
10	2	0.4	15	1/2	1	+30	-0.1
11	2	0.4	15	1/2	1	+30	0.1

为+)与横向坡度 $S_L$ (船型浮堤处水深小于对岸为负)对水流结构的影响。本次模拟工况1~6与黄卫等<sup>[21]</sup>试验工况1~6相同;所有工况边界条件保持一致,入口处水流为恒定流,水深 $h_0$ 为0.05 m,断面平均流速 $U_0$ 为0.19 m/s,入口处雷诺数 $Re$ 为9 405.94, Froude数 $F_r$ 为0.27;出口处为自由出流,水槽固体壁面与船型浮堤为无滑移边界,采用标准壁面函数处理。所有工况在船型浮堤处网格加密(最小网格尺度为1 mm),总网格数在1 500万网格以上。考虑到模拟工况的 $F_r$ 较低,对于水面可采用刚盖假定<sup>[4]</sup>,即水面假定为一个无切应力的平面。计算过程采用RNG  $k-\varepsilon$ 模型,速度与压力的耦合方程采用半隐式SIMPLE算法求解,离散格式中对流项、扩散项与源项采用二阶迎风格式,采用并行计算,计算过程使用天玑算(www.phadcalc.com)平台,算力配置如下:CPU型号为64核EPYC 7H12,主频为2.6 GHz。

## 2 模型结果与试验结果对比

为提高本次数值模拟结果可靠性,将本文工况2的模拟结果与Huang等<sup>[20]</sup>进行的物理模型试验结果在纵向流速 $U$ 与横向雷诺切应力 $R_s$ 分布方面进行对比。附录A图A1为工况2中 $U$ 在 $Y$ 为5.0、7.5、15.0 cm纵剖面上的分布(附录A图A1(a)、(c)、(e)),以及物理模型PIV测量结果(附录A图A1(b)、(d)、(f))。由结果可知:水流经过船型浮堤时,近表面水流受到船型浮堤的阻挡向另一侧流动,另一部分水体经过船型浮堤下方时在船型浮堤下方出现水流分离区,其后方 $U$ 增加至0.25 m/s,在 $Y$ 为1/2 $L$ 近底处 $U$ 增加至0.29 m/s,在 $Y$ 为15.0 cm处由于船型浮堤减小过流断面, $U$ 为0.26 m/s。船型浮堤后方回流范围与流速达到最大,回流长度 $>L$ ,最大回流流速为-0.08 m/s,为0.42 $U_0$ ;在 $Y=7.5$  cm处回流范围与强度减小,回流中心向船型浮堤移动。以上结果与Huang等<sup>[20]</sup>分析结果相符。

附录A图A2为工况2中各纵剖面上横向雷诺切应力 $R_s$ 的对比结果。可知:在船型浮堤下方 $R_s < 0$ , $R_s$ 达到-0.37 Pa;在船型浮堤后方 $R_s$ 增大,在距离边壁7.5~10.0 cm处, $R_s$ 从1.5 Pa衰减至1.1 Pa。在远离边壁处( $Y$ 为12.5 cm), $R_s$ 强度和范围逐渐减小,模拟结果与试验结果基本相符。横向雷诺切应力分布表明,船型浮堤对流场的扰动影响集中于船型浮堤下侧及距离船型浮堤后方 $L$ 处以内。

## 3 船型浮堤布置对水流结果影响

不同的船型浮堤布置对水流的扰动结果不同,Huang等<sup>[20]</sup>的分析结果受PIV观测区域限制无法分析平面上的流场分布。本文补充分析了船型浮堤吃水深

度、长度、角度以及河床横向坡度对流场结构的影响,围绕纵向流速 $U$ 、横向流速 $V$ 及湍动能 $k$ 进行分析。

### 3.1 船型浮堤吃水深度影响

图2中为不同船型浮堤淹没比例 $D$ 下典型纵剖面上相对纵向流速 $U/U_0$ 分布结果。由图2可知:随着 $D$ 从0.2增加至1.0,底部 $U/U_0$ 最大值 $U/U_{0max}$ 在 $D$ 为0.2、0.4、0.8时分别为1.35、1.52、1.69,船型浮堤后方回流长度分别为1.0 $L$ 、1.5 $L$ 、3.5 $L$ ,回流区 $U/U_{0max}$ 分别为-0.35、-0.48、-0.51,即船型浮堤后方回流区域的强度与范围随着淹没比例的增加而增加。在 $Y$ 为12.5 cm处,船型浮堤处 $U/U_0$ 随着 $D$ 的增加而增加;在船型浮堤后方, $U/U_0$ 随 $D$ 增加呈现先增加后减小趋势,与不同淹没比例下回流分布范围有关。

图3中为各横剖面上不同淹没比例(工况2、3、4、7)下 $U/U_0$ 分布。由图3可知:在近水面( $\eta=(h_0-Z)/h_0=0$ , $\eta$ 为归一化水深),船型浮堤外侧 $U/U_0$ 随 $D$ 增大而增大,回流分布随 $D$ 增大向对岸与船型浮堤后方扩散。当 $D \neq 1$ 时,船型浮堤后方回流中心靠近船型浮堤边缘处;当 $D \geq 0.8$ 时,船型浮堤后方形成两处回流中心,随着 $D$ 增大,靠近船型浮堤的回流中心向岸边移动,在下游的回流中心流速增大。在船型浮堤下方的床面处( $\eta \approx 1$ ),当 $D$ 为0.2~0.4时,仅在船型浮堤处形成局部加速,对船型浮堤后方流场影响较小;当 $D$ 为0.8~1.0时,船型浮堤上游回流强度增加,即 $U/U_0$ 从-0.11变至-0.45,船型浮堤在 $D=0.8$ 时,底部 $U/U_{0max}=1.70$ ,在距离船型浮堤下游6 $L$ 处,回流强度增加至-0.89 $U_0$ 。随着 $D$ 增加,船型浮堤对底部流场的影响越大,在船型浮堤下方与外侧纵向流速增大,船型浮堤后方的回流中心在 $D \neq 1$ 时分布在船型浮堤边缘处,在 $D \geq 0.8$ 时,在距船型浮堤后方6 $L$ 处形成第2个回流中心且在近床面处占主导。

附录A图A3为各纵剖面上不同淹没比例下相对湍动能TKE(记为 $K_E$ , $K_E=k/u_*^2$ , $u_*$ 为摩阻流速, $u_*=\sqrt{gRJ}$ , $g$ 为重力加速度, $R$ 为水力半径, $J$ 为底部坡降)分布。当 $D \neq 1$ 时, $Y=5$  cm时,船型浮堤下方,TKE在 $D$ 为0.2、0.4、0.8时,分别为17.9、21.6、32.9。随着船型浮堤下方过水断面减小,TKE增加,增加了水流对河床的侵蚀强度。随着 $D$ 增加,TKE核心区增大,且分布在距船型浮堤2 $L$ 内。 $Y=9.5$  cm处TKE减弱,分布范围缩小。 $Y=12.5$  cm处,当 $D \leq 0.4$ 时,船型浮堤对TKE影响较弱;当 $D=0.8$ 时,TKE $\geq 10$ 的分布范围扩大;当 $D=1$ 时,在船型浮堤所在处,TKE达到峰值,在5 $L$ ~6 $L$ 形成第2处TKE核心区。从减小船型浮堤造成的不良流态及湍流强度分布方面考虑,船型浮堤的淹没比例不应超过0.8,船型浮堤附近的湍流强度随着 $D$ 的增大而显著增加。

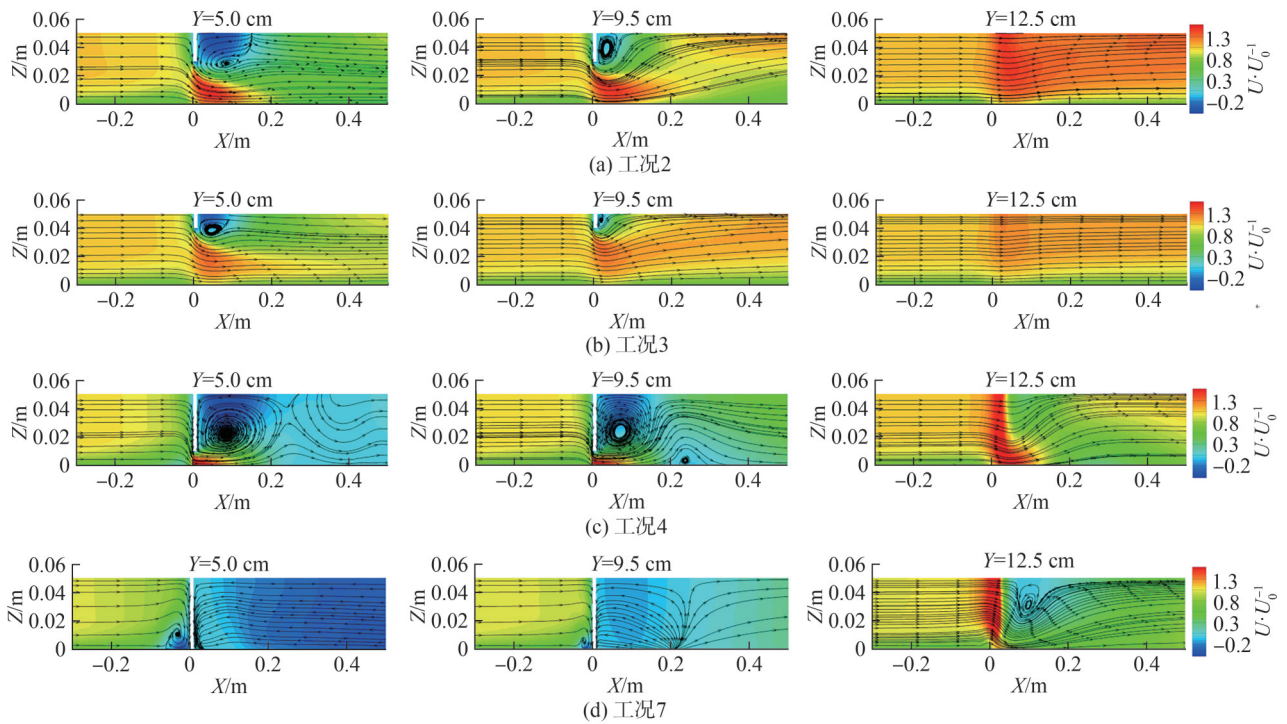


图 2 不同淹没比例下典型纵剖面上相对纵向流速分布

Fig. 2 Distribution of normalized streamwise velocity on different longitudinal profiles under different submerged ratios

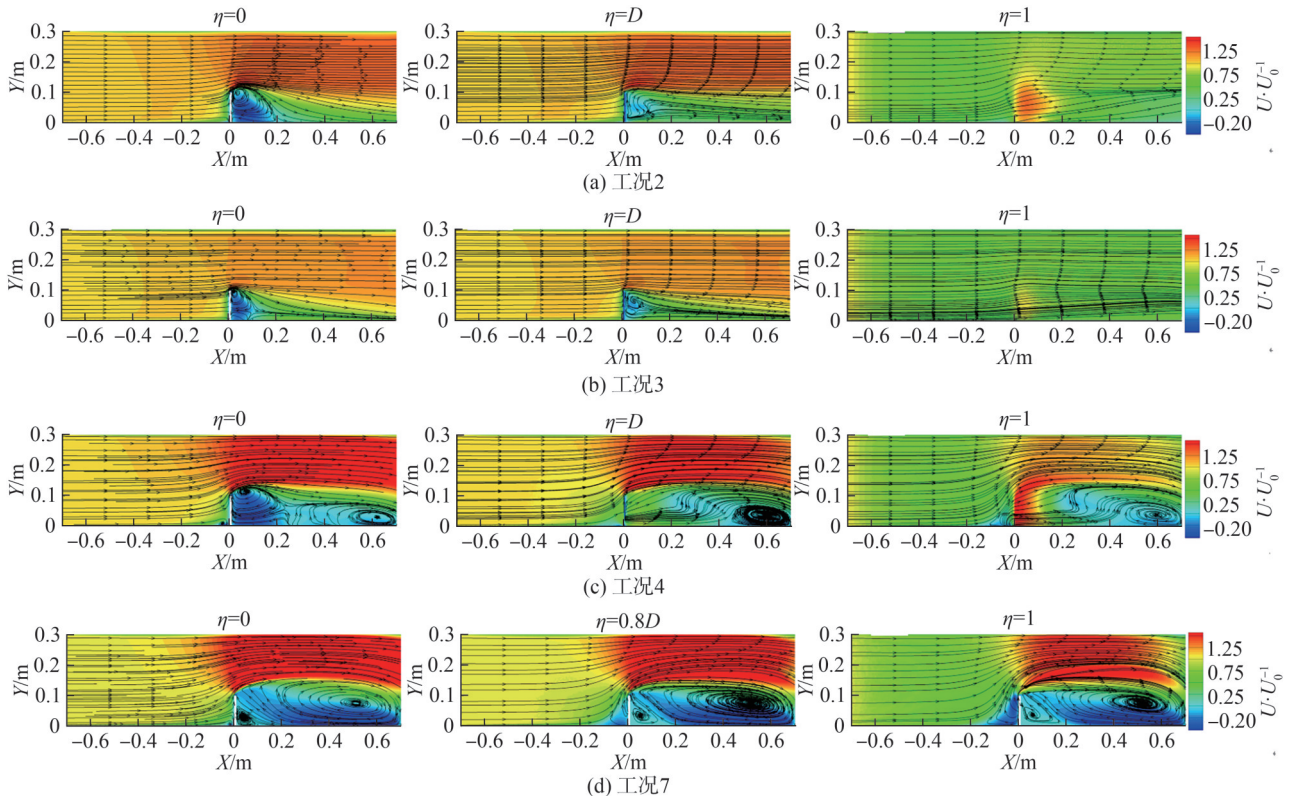


图 3 不同淹没比例下典型横剖面相对纵向流速分布

Fig. 3 Distribution of normalized streamwise velocity at different relative height under different submerged ratios

3.2 船型浮堤长度影响

图 4 为典型纵剖面不同长度比例  $K$  (工况 2、5、6) 下  $U/U_0$  分布。由图 4 可知,随着船型浮堤  $K$  增加,船型浮堤下方与外侧的  $U/U_0$  增加。当  $Y=1/2L$  时,船型浮堤

底部  $U/U_{0max}$  在  $K$  为  $1/6$ 、 $1/3$ 、 $1/2$  时,分别为 1.33、1.49、1.73,底部流速加速区范围随着  $K$  的增加而增加,回流区  $U/U_{0max}$  分别为  $-0.40$ 、 $-0.41$ 、 $-0.46$ ,船型浮堤长度对底部过流区的影响大于后方回流区,回流区长度与船

型浮堤长度一致。在  $Y=L$  处,回流区减弱,随着  $K$  增加,船型浮堤后方  $U/U_0$  增加,容易将船型浮堤底部泥沙挟

带至后方落淤。在  $Y=1.5L$  处,船型浮堤后方  $U/U_0$  随  $K$  的增加而增加。

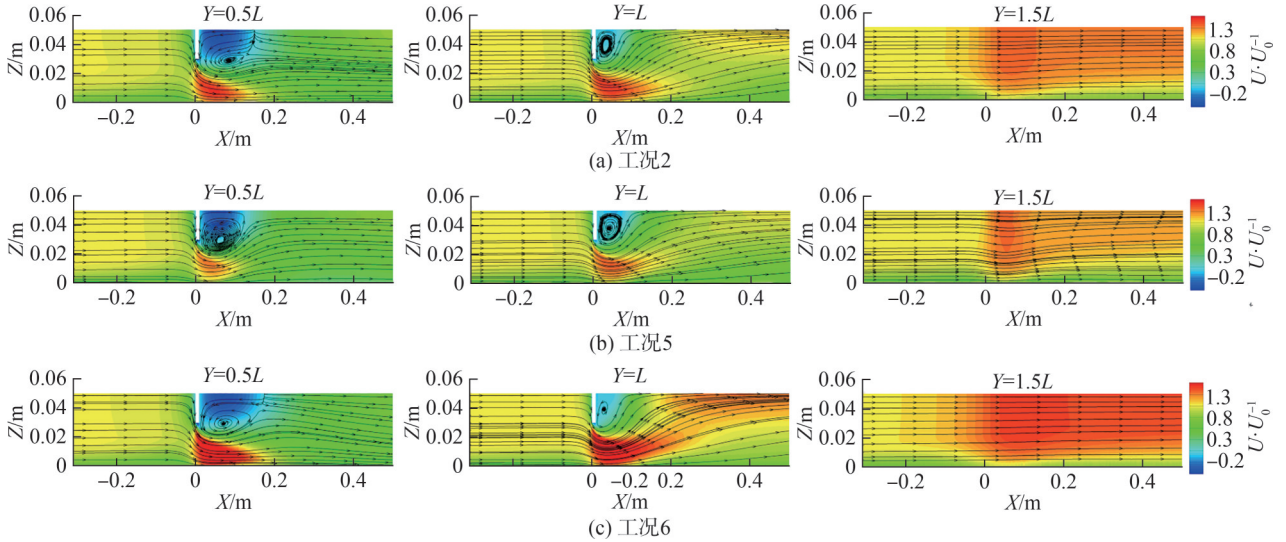


图 4 不同长度比例下典型纵剖面上相对纵向流速分布

Fig. 4 Distribution of normalized streamwise velocity on different longitudinal profiles under different length ratios

图 5 为典型横剖面上不同长度比例下  $U/U_0$  分布。由图 5 可知,在横剖面上,在近水面处,回流区随  $K$  增大而增加,回流区强度与长度并未增加。船型浮堤后方缓流区随着  $K$  增加向水槽中央扩展,在船型浮堤边缘形成最大流速区,  $U/U_{0max}$  随着  $K$  增大而增大,如  $K$  为  $1/6$ 、 $1/3$ 、 $1/2$  时,  $U/U_{0max}$  分别为  $1.40$ 、 $1.50$ 、 $1.71$ 。在船型浮堤下方,回流区强度衰减,船型浮堤后方缓流区与外侧主流区保持不变。在近床面处,船型浮堤下方存在局部加速区,在

$K \geq 1/3$  时,随着  $K$  增加,近床处加速区强度逐渐增强。

从各纵剖面上船型浮堤不同长度比例下 TKE 分布可知(附录 A 图 A4),在距离边壁  $Y=1/2L$  处, TKE 强度与分布范围随  $K$  增加而增加,在船型浮堤底部与后方形成核心区, TKE 最大值在  $K$  为  $1/6$ 、 $1/3$ 、 $1/2$  时分别为  $17.4$ 、 $17.2$ 、 $21.7$ 。在船型浮堤边缘处、船型浮堤底部形成 TKE 核心区, TKE 强度与分布区域减小。在  $Y=1.5L$  处,船型浮堤对 TKE 没有影响。

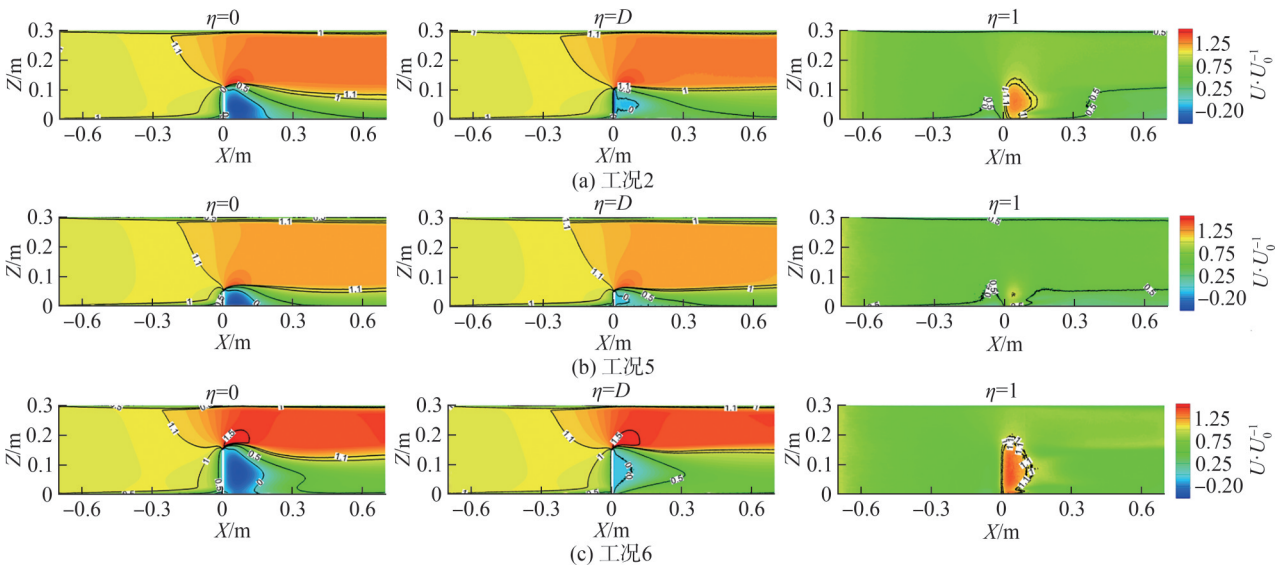


图 5 不同长度比例下典型横剖面上相对纵向流速分布

Fig. 5 Distribution of normalized streamwise velocity at different relative height under different length ratios

### 3.3 船型浮堤挑角影响

图 6 显示了船型浮堤与水流垂直( $\theta=0$ ,即工况 6)、上挑( $\theta=-30^\circ$ ,即工况 8)与下挑( $\theta=30^\circ$ ,即工况 9)3 种布置形式对水动力结构与湍流结构的影响。由图 6 可知:相比于  $\theta$  为  $0$ ,  $\theta$  为  $-30^\circ$  时靠近岸壁处 ( $Y=1/6L$ ) 船

型浮堤的阻水作用明显,水流在船型浮堤上游减速明显 ( $U/U_0=0.4$ ),此时在船型浮堤底部  $U/U_{0max}$  ( $1.53$ ) 小于  $\theta$  为  $0$  时  $U/U_{0max}$  ( $1.72$ ),船型浮堤后方回流区域向底部扩散,水流紊乱。当  $\theta$  为  $30^\circ$  时,船型浮堤底部  $U/U_{0max}$  为  $1.63$ ,回流区  $U/U_{0max}$  ( $-0.29$ ) 小于  $\theta$  为

0 时  $U/U_{0max}$  (-0.4), 在距离船型浮堤  $L$  处近水面,  $U/U_0$  形成局部加速区, 其与船型浮堤后方形成的环流相关。在  $Y=1/2L$  处, 当  $\theta$  为  $-30^\circ$  时船型浮堤底部高流速区扩大, 回流区强度减小; 当  $\theta$  为  $30^\circ$  时, 船型浮堤后方回流区扩大, 环流减弱。在  $Y=L$  处, 当  $\theta$  为  $-30^\circ$  时

船型浮堤对流场的扰动大于  $\theta$  为  $30^\circ$  时。综上可知: 当船型浮堤向上挑时, 对流场的影响作用较强, 近岸处流态紊乱, 船型浮堤外侧流速增强; 当船型浮堤向下挑时, 船型浮堤后方环流作用增强, 水流流态平稳。

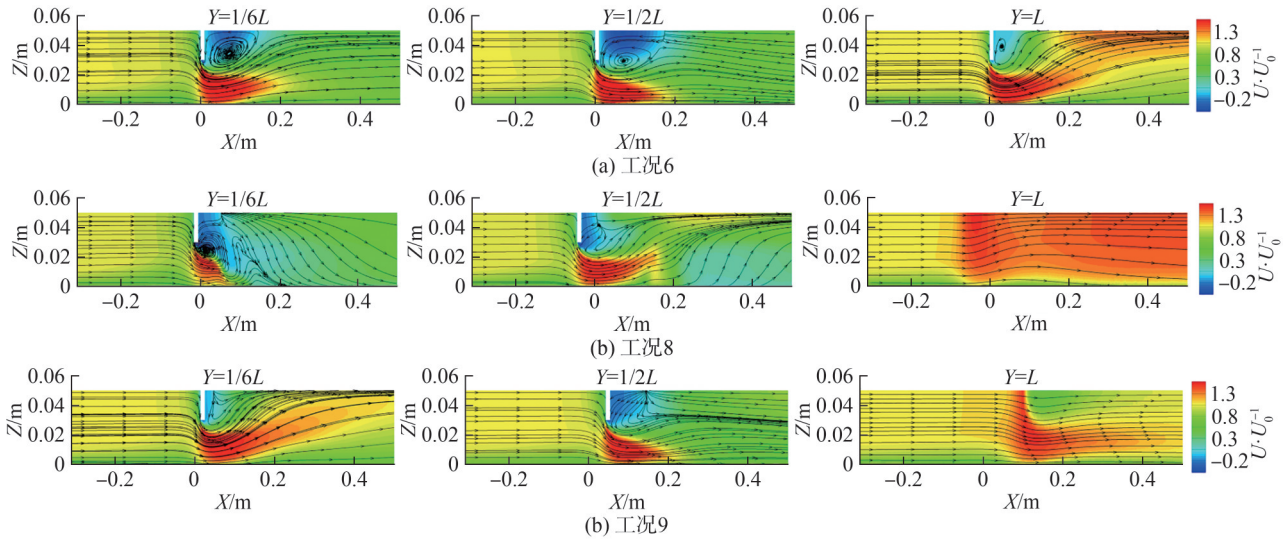


图 6 不同挑角下典型纵剖面上相对纵向流速分布

Fig.6 Distribution of normalized streamwise velocity on different longitudinal profiles under different tilted angles

图 7 为不同挑角下典型横剖面上  $U/U_0$  分布。由图 7 可知: 相比于  $\theta$  为 0 时的情况, 当  $\theta$  为  $-30^\circ$  时, 船型浮堤上游缓流区扩大, 后方回流区显著减小, 回流范围从近表面到船型浮堤下侧逐渐增大, 船型浮堤后方高流速区侵入缓流区。当  $\theta$  为  $30^\circ$  时, 流场特征与  $\theta$  为  $-30^\circ$  时相反, 船型

浮堤后方缓流区稳定性增加, 在近岸处形成加速区, 加速区在船型浮堤下方达到最强。近床面处, 不同挑角布置对底部流场影响较小, 在船型浮堤下方形成局部加速区。上述流场分布表明, 当船型浮堤布置为向下挑时, 船型浮堤后方的环流作用达到最强, 且在近岸处形成局部加速区。

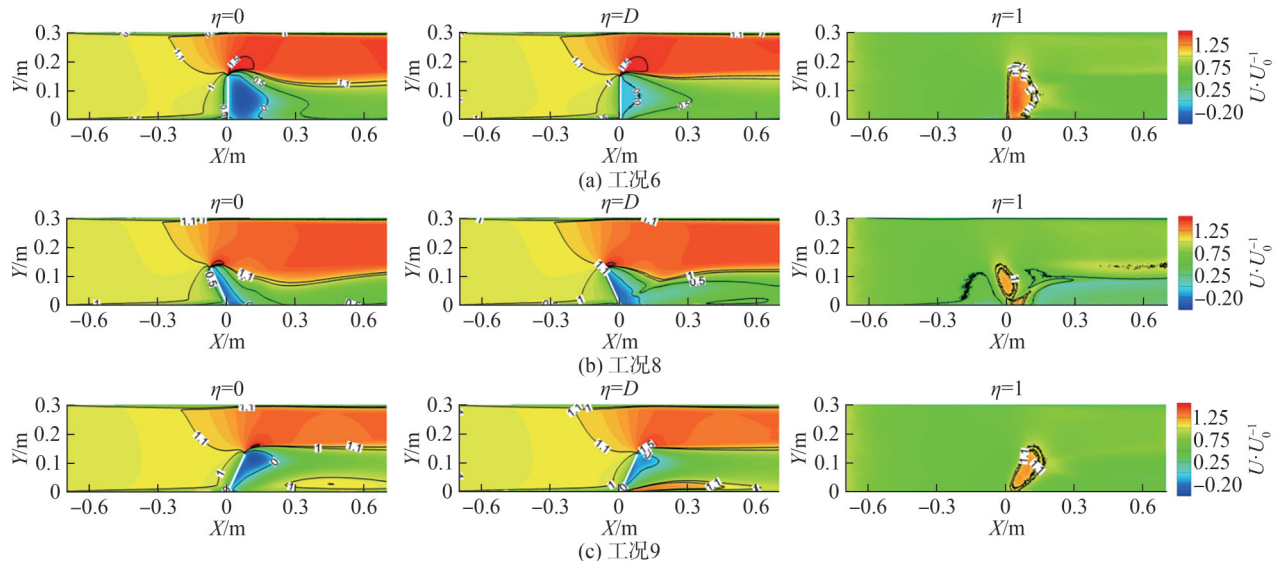


图 7 不同挑角下典型横剖面上相对纵向流速分布

Fig.7 Distribution of normalized streamwise velocity at different relative height under different tilted angles

附录 A 图 A5 为不同挑角下典型纵剖面相对湍动能分布。由附图 5 可知: 当  $\theta$  为  $-30^\circ$  时, 近壁处的湍动能分布散乱, TKE 最大值 (记为  $K_{Emax}$ ) 为 10.3, 小于  $\theta$  为 0 时的  $K_{Emax}$  (19.6); 在距离边壁  $Y=1/2L$  处, TKE 向水面

扩散。当  $\theta$  为  $30^\circ$  时, 近壁处 TKE 在船型浮堤处下方形成核心区,  $K_{Emax}$  为 19.8, 在船型浮堤后方 TKE 核心区向水面扩散, TKE 强度弱于  $\theta$  为 0 时, 在  $Y=1/2L$  处 TKE 向底部扩散。综上, 当船型浮堤呈现上挑或下挑时水

流的湍动能明显弱于与水流垂直布置时,当 $\theta$ 为 $30^\circ$ 时近岸处环流强度较强使TKE向水面扩散。

### 3.4 横向河床坡度影响

在实际应用中,河床往往存在横向坡度 $S_L$ ,将船型浮堤布置在横断面上深水侧与浅水侧对流场结构影响不同。将工况10( $S_L=-0.1$ )与工况11( $S_L=0.1$ )、工况9( $S_L=0$ )进行对比,图8为工况9~11在典型纵剖面上 $U/U_0$ 分布结果。由图8可知:在 $Y=1/6L$ 处, $S_L$ 为 $-0.1$ 时,船型浮堤处水深较浅,船型浮堤底部过流减少, $U/U_{0max}$ 为1.58,在船型浮堤后方形成回流区与缓流区, $U/U_0$

分布与图2(c)相似(工况4)。在 $S_L$ 为0.1时,船型浮堤处水深增大,水流集中在深水区,在其下方形成高流速区, $U/U_{0max}$ 为1.61,略小于 $S_L$ 为0时的 $U/U_{0max}$ (1.63);在船型浮堤后方,回流区分布保持不变,其 $U/U_{0max}$ 为 $-0.36$ ,强度略大于 $S_L$ 为0与 $-0.1$ 的 $U/U_{0max}$ (分别为 $-0.29$ 、 $-0.22$ )。在 $Y=1/6L$ 处,船型浮堤后方的缓流区范围( $U/U_0 < 1$ )在 $S_L \geq 0$ 时缩小,并出现增速区( $U/U_0 > 1$ )。当 $Y=1/2L$ 时,船型浮堤后方的回流区增大,回流强度基本保持不变,随着 $S_L$ 从 $-0.1$ 增至0.1,船型浮堤底部 $U/U_{0max}$ 逐渐增强。

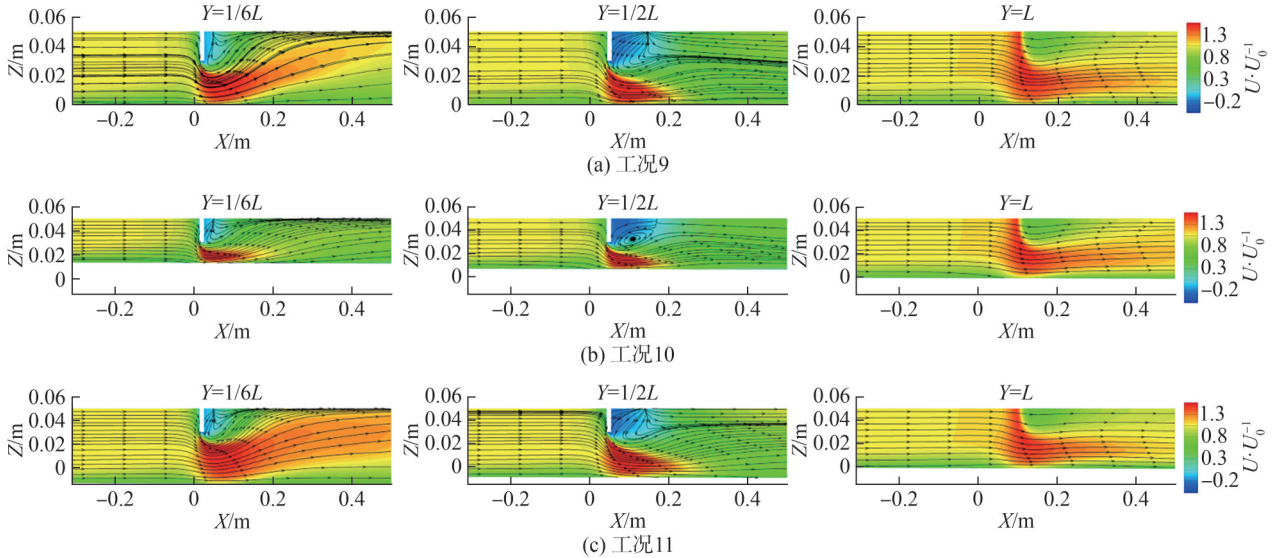


图8 不同河床横向坡度下典型纵剖面上相对纵向流速分布

Fig. 8 Distribution of normalized streamwise velocity on different longitudinal profiles under different cross-section lateral slopes

图9为典型横剖面上不同 $S_L$ 下 $U/U_0$ 分布。由图9可知,在近水面处, $S_L$ 对流场分布影响较小,缓流区能保持较长范围的稳定。当 $S_L \geq 0$ 时,缓流区近壁侧出现

增速区,且随着 $S_L$ 增大而加强,在 $\eta=D$ 处增速区达到最大。 $\theta=30^\circ$ 时,船型浮堤对水流的阻碍作用较小,在船型浮堤后方形成环流使得船型浮堤下方高流速水

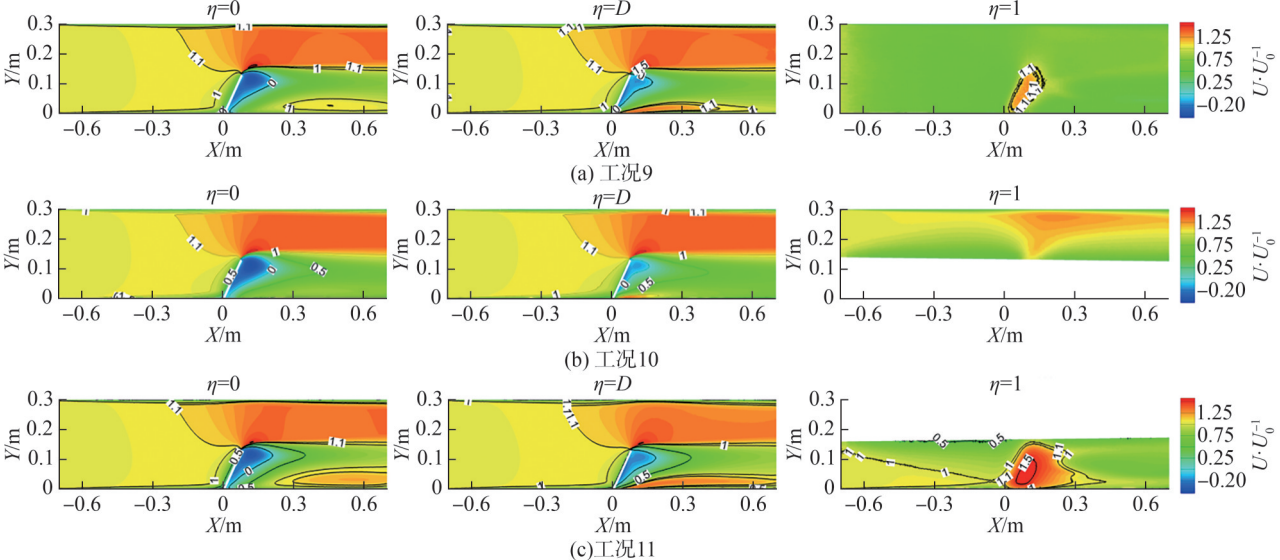


图9 不同河床横向坡度下典型横剖面上相对纵向流速分布

Fig. 9 Distribution of normalized streamwise velocity at different relative height under different cross-section lateral slopes

流向边壁输移,  $S_L > 0$  时环流强度增强。当  $\eta = 1$  时, 工况 10 中, 水流聚集在对岸深水区, 在船型浮堤所在处形成加速; 工况 9 中, 仅在船型浮堤下方形成加速区; 工况 11 中, 船型浮堤下方形成高流速区, 靠近床面的水流分布验证了在船型浮堤淹没范围内缓流区内出现增速区是受环流影响的结果。

附录 A 图 A6 为不同河床横向坡度下各纵剖面上湍动能分布。由附录 A 图 A6 可知: 当  $S_L = -0.1$  时, TKE 核心区与底部平行; 当  $S_L \geq 0$  时, 船型浮堤后方 TKE 向水面扩散并逐渐衰减。在  $Y = 1/2L$  处: 当  $S_L = -0.1$  时, TKE 分布范围小于  $S_L \geq 0$  时的范围; 当  $S_L = -0.1$  时, TKE 向床面扩散, 表明靠近边壁与远离边壁处水流紊动受到环流的影响。在  $Y = L$  处, 工况 9~11 的 TKE 分布相同, 表明 TKE 仅受到船型浮堤导致过流断面减小的影响。

取不同横断面上相对横向流速 ( $V/U_0$ ) 分析船型浮堤后方二次环流分布, 结果如附录 A 图 A7 所示。由附录 A 图 A7 可知: 在  $X = 0$  时,  $Y = 0$  处受到船型浮堤阻挡, 水流向对岸流动; 在  $X = 0.1$  m 处形成环流, 底部  $V/U_{0\max}$  位于区间  $[-0.31, -0.32]$ , 随着  $S_L$  从  $-0.1$  增加至  $0.1$ , 近水面处  $V/U_{0\max}$  从  $0.49$  增至  $0.60$ , 二次环流在船型浮堤外侧消失; 当  $X$  为  $0.15 \sim 0.25$  m, 在  $S_L = -0.1$  时, 环流强度衰减速度远大于  $S_L \geq 0$  时的衰减速度, 船型浮堤后方环流分布从机理上解释了缓流区以及近壁处增速区分布, 也说明了船型浮堤的缓流促淤的工程效果。

## 4 结论

本文对船型浮堤的几何尺度、挑角与底床横向坡度对水流动力结构与湍动能分布的影响进行了数值模拟, 模拟结果与水槽试验结果较为吻合。本文的主要结论为:

1) 随着淹没比例 ( $D$ ) 增加, 船型浮堤底部最大相对纵向流速 ( $U/U_{0\max}$ ) 从  $1.35$  增加至  $1.69$ , 船型浮堤后方回流区中心紧靠船型浮堤, 回流范围与强度增加; 当  $D \geq 0.8$  时, 在船型浮堤下游形成第 2 个回流中心; 当  $D \neq 1$  时, 船型浮堤底部与外侧过流区湍动能随着  $D$  增大而增加。

2) 随着长度比例 ( $K$ ) 增加, 船型浮堤下方与外侧  $U/U_{0\max}$  增大, 湍动能强度与分布范围增大, 回流区相对长度与强度变化不大, 当  $K \geq 1/3$  时近床处船型浮堤下方流速显著增加。

3) 当船型浮堤向上挑时, 对流场的影响作用较强, 阻水作用明显, 近岸处流态紊乱, 船型浮堤外侧流速增强; 当船型浮堤向下挑时, 船型浮堤下游环流作用增强, 在缓流区近岸处形成局部加速区, 回流范围与强度较小, 水流流态平稳。

4) 当船型浮堤在深水侧且下挑布置时, 对水力阻碍作用较小, 底部加速区范围增大, 回流区受到压缩, 环流作用较船型浮堤布置于浅水区时增强。

从保护岸滩的缓流促淤效果与构建生态适宜区的角度出发, 船型浮堤具有较大的优势, 特别是当船型浮堤长度比例小于等于  $0.5$ , 淹没比例小于等于  $0.4$ , 向下游挑且布置在深水区一侧时。在环流作用下, 船型浮堤下游的缓流区在近岸处形成局部增速区, 降低岸滩稳定性, 在未来的研究中可进一步分析船型浮堤以不同间距布置时对缓流区内局部增速区的影响。

附录见本刊网络版, 扫描标题旁的二维码可阅读网络全文。

## 参考文献:

- [1] Haider R, Iqbal S, Abbas F M, et al. CFD analysis of flow dynamics around the series of dikes with alternative length layout[J]. Natural Hazards, 2025, 121(7): 8241–8260.
- [2] Gu Jie, Li Mengling. Experimental study on the influence of a spur dike on flow characteristics in bend channel[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2018, 33(6): 786–793. [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.]
- [3] Ma B, Dong F, Peng W Q, et al. Evaluation of impact of spur dike designs on enhancement of aquatic habitats in urban streams using 2D habitat numerical simulations[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 24: e01288.
- [4] Kang S, Lee J, Kim Y, et al. Experimental and numerical study on the flow characteristics around spur dikes at different length-to-depth ratios[J]. Advances in Water Resources, 2023, 175: 104428.
- [5] Xu Wei, Zhao Jinyong, Wang Qi, et al. Study on habitat improvement of typical reaches of Hanjiang River based on ecological spur dike group construction technology[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(12): 35–46. [徐伟, 赵进勇, 王琦, 等. 基于生态丁坝群构建技术的汉江上游典型河段栖息地质量改善研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(12): 35–46.]
- [6] Jeon J, Lee J Y, Kang S. Experimental investigation of three-dimensional flow structure and turbulent flow mechanisms around a nonsubmerged spur dike with a low length-to-depth ratio[J]. Water Resources Research, 2018, 54(5): 3530–3556.
- [7] Kang S, Khosronejad A, Yang Xiaolei. Turbulent flow characteristics around a non-submerged rectangular obstacle on the side of an open channel[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(4): 045106.
- [8] Divya T, Law A W, Chong T H, et al. Effect of floodplain submergence and riparian vegetation on flow dynamics

- and mass transport near a spur dike[J]. *Physics of Fluids*, 2025,37(7):076647.
- [9] Pandey M, Valyrakis M, Qi Meilan, et al. Experimental assessment and prediction of temporal scour depth around a spur dike[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2021,36(1):17–28.
- [10] Mehraein M, Schleiss A J, Goodarzi M. The effects of a spur dike location in a 90° sharp channel bend on flow field: Focus on anisotropy degree and anisotropy nature[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2023,48:15–30.
- [11] Yu Tao, Wang Pingyi, Chen Li, et al. Local scour of spur dike in unsteady flow[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2014,46(3):31–36. [喻涛, 王平义, 陈里, 等. 非恒定流作用下丁坝局部冲刷研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2014,46(3):31–36.]
- [12] Hu Jielong. Hydraulic characteristics of a new permeable spur dike and its effect on fish behavior[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. [胡杰龙. 新型透水丁坝水力特性及其对鱼类行为影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.]
- [13] Akbar Z, Pasha G A, Tanaka N, et al. Reducing bed scour in meandering channel bends using spur dikes[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2024,39(2):243–256.
- [14] Iqbal S, Pasha G A, Ghani U, et al. Flow dynamics around permeable spur dike in a rectangular channel[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(5): 4999–5011.
- [15] Mao Liang, Li Yujian, Zhou Zhengping, et al. Numerical simulation on influence factors of flow and sediment diversion of permeable sheet piling spur dike[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(9):216–222. [毛亮, 李玉建, 周正平, 等. 插板透水丁坝分流分沙影响因素数值模拟[J]. *人民长江*, 2021,52(9):216–222.]
- [16] Gu Zupeng, Akahori R, Ikeda S. Study on the transport of suspended sediment in an open channel flow with permeable spur dikes[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2011,26(1):96–111.
- [17] Liu Mingyang, Li Yong, Wang Rui, et al. Application of ecological spur dike repairing schizothorax prenanti spawning ground[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2014,46(3):37–43. [刘明洋, 李永, 王锐, 等. 生态丁坝在齐口裂腹鱼产卵场修复中的应用[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2014,46(3):37–43.]
- [18] Chang Liuhong, Zhang Fujun, Wang Hanrui, et al. Impact of local erosion and sedimentation evolution of trapezoidal hollow spur dike on benthic animal communities[J]. *Water Resources Protection*, 2023,39(5):170–177. [常留红, 章富君, 王瀚锐, 等. 梯形透空丁坝局部冲淤演变对底栖动物群落的影响[J]. *水资源保护*, 2023,39(5):170–177.]
- [19] Wan Yu, Huang Guiquan, Du Hongbo, et al. Effects of waterway regulation structures on the planktonic community in the Upper Yangtze River[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 155:111049.
- [20] Huang Wei, Ni Yufang, Creed M, et al. Experimental analysis of 3D flow structures around a floating dike[J]. *Water*, 2023,15(4):703.
- [21] Huang Wei, Qian Honglu, Yu Sihan, et al. Experimental study on the 3D flow structures around the floating dike[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(5):35–44. [黄卫, 钱红露, 於思瀚, 等. 浮堤局部三维水流特性试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2023(5):35–44.]
- [22] Cai Ying, Xie Xuelun, Huang Guobing. Research and practice of pontoon-type floating row applied in front of Three Gorges Dam to remove floating debris[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016,33(10):63–66. [蔡莹, 谢学伦, 黄国兵. 浮桥式治漂浮排在三峡坝前的应用研究与实践[J]. *长江科学院院报*, 2016,33(10):63–66.]
- [23] Pal A, Sood D H. Floating bridges: A comprehensive historical review[J]. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2023,11(11): 215–221.
- [24] Duan Wengang, Huang Guobing, Zhang Hui, et al. Experimental research on vortexes eliminating of several typical hydraulic intakes[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011,28(2):21–27. [段文刚, 黄国兵, 张晖, 等. 几种典型水工建筑物进水口消涡措施试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2011,28(2):21–27.]
- [25] Jin Zhefei, Zhang Jinfeng, Zhang Qinghe, et al. Study on numerical model of hydrodynamics of mooring line floating breakwater under wave actions[J]. *The Ocean Engineering*, 2021,39(1):21–31. [金哲飞, 张金凤, 张庆河, 等. 波浪作用下锚链系泊浮式防波堤动力响应的数值模型研究[J]. *海洋工程*, 2021,39(1):21–31.]
- [26] Chen Yongkun, Liu Yong, Meringolo D D, et al. Study on the hydrodynamics of a twin floating breakwater by using SPH method[J]. *Coastal Engineering*, 2023,179:104230.
- [27] Wu Shixian, Sun Pengnan, Zhou Minli, et al. Experimental study on a new floating breakwater with openings, arc-shaped wings, and plates[J]. *Physics of Fluids*, 2024,36(7): 077166.
- [28] Zaghoul N A. Local scour around spur-dikes[J]. *Journal of Hydrology*, 1983,60(1/2/3/4):123–140.
- [29] Gu Zhenghua, Cao Xiaomeng, Jiao Yueteng, et al. Appropriate CFD models for simulating flow around spur dike group along urban riverways[J]. *Water Resources Management*, 2016,30(13):4559–4570.

- [30] Bai Yuchuan, Li Bin, Xu Haijue, et al. Rectifying analysis of multi-herringbone diversion piers scheme for large span pumping station in forebay[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(6): 75–79. [白玉川, 李彬, 徐海珏, 等. 大跨度泵站多人字型前池导流墩整流分析[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(6): 75–79.]
- [31] Han Xun, Lin Pengzhi, Parker G. Numerical modelling of local scour around a spur dike with porous media method[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2022, 60(6): 970–995.
- [32] Bai Jing, Fang Hongwei, He Guojian. Study of non-submerged groin turbulence flow in a shallow open channel by les[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2013, 45(2): 151–157. [白静, 方红卫, 何国建. 非淹没丁坝绕流的三维大涡模拟研究[J]. *力学学报*, 2013, 45(2): 151–157.]
- [33] Wei Wenli, Guo Yangyang, Zhang Zewei, et al. Hydraulic characteristics of straight and T-shape spur dikes in 60° channel bend by numerical simulation[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(9): 91–99. [魏文礼, 郭扬扬, 张泽伟, 等. 60°弯道丁坝水流水力特性数值模拟研究[J]. *水力发电学报*, 2017, 36(9): 91–99.]
- [34] Zhang Yan, Wu Yiping, Cui Pengyi, et al. Numerical simulation for the effect of spur dike lengths on the hydraulic characteristics of the bend[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(1): 164–170. [张岩, 吴伊平, 崔鹏义, 等. 丁坝长度对弯道水力特性影响的数值模拟研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(1): 164–170.]
- [35] Ferziger J, Perić M. *Computational methods for fluid dynamics*[M]//Artificial Intelligence and Sustainable Computing. New York: Springer, 2023.
- [36] Tseng C Y, Tinoco R O. Canopy randomness, scale, and stem size effects on the interfacial transfer process in vegetated flows[J]. *Water Resources Research*, 2024, 60(3): e2023WR035220.

## Numerical Study on the Flow Characteristics Around Ship-shaped Floating-dike with Different Layout-forms

LI Bin<sup>1,2</sup>, LU Jun<sup>1,2</sup>, LI Chaoqun<sup>1,2\*</sup>, CHEN Cuixia<sup>1,2</sup>, REN Xiaoguang<sup>3</sup>

(1. Yellow River Engineering Consulting Company Limited, Zhengzhou 450003, China;

2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China;

3. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Company Limited, Tianjin 300222, China)

### Abstract:

**Objective** A spur dike is an in-stream structure that is widely employed for the protection of riverbank erosion. In river engineering, traditional regulating structures exhibit certain limitations, such as occupying large areas, requiring significant quantities of stone, being difficult to maintain, and involving high construction costs, which make them unsuitable for use in some regions. Therefore, scholars propose the application of floating dike structures in river regulation engineering. These structures exhibit advantages such as minimal impact on sediment transport, improved adaptability to upstream water and sediment discharge, and reduced impact on the riverbed and ecological environment. However, research on the effects of floating dikes on flow structure and the riverbed remains insufficient, and the understanding of their practical application is limited. Considering practical application, ships are used as substitutes for floating dikes; therefore, this structure is also referred to as a ship-shaped floating dike. This study focuses on the effects of the submergence ratio ( $D$  is submergence depth/water depth), length ratio ( $K$  is ship length/river width), arrangement angle ( $\theta > 0$  indicates the dike oriented downstream), and transverse bed slope at the location of the ship-shaped floating dike on the surrounding flow field and turbulence characteristics. The findings provide a hydrodynamic basis for further understanding the influence of ship-shaped floating dikes on sediment transport and riverbed evolution, as well as technical support and reference for their application in practical river engineering projects.

**Methods** This study investigated the influence of geometric characteristics, including submergence depth and ship length, as well as arrangement parameters, including ship angle and transverse bed slope, of ship-shaped floating dikes on the surrounding flow field and turbulence structure, with the objective of identifying the optimal arrangement configuration. The same flume dimensions (length is 1.4 m, width is 0.3 m, and height is 0.05 m) and simulation conditions as those used in the physical model experiments were adopted to enhance the reliability of the numerical model. The RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model was employed to simulate the flow structure around the ship-shaped floating dike. Considering the negligible variation in the water surface, the rigid-lid assumption was applied, with a constant inlet velocity and free outflow conditions at the outlet. The velocity-pressure coupling equations were solved using the semi-implicit SIMPLE algorithm.

**Results and Discussions** The numerical simulation results for velocity distribution and Reynolds shear stress across different longitudinal sections were consistent with those obtained from physical experiments, confirming the reliability of the numerical model. The three-dimensional flow structure and turbulence kinetic energy distribution were analyzed by considering variations in the submergence ratio ( $D$ ), length ratio ( $K$ ), arrangement angle ( $\theta$ ), and transverse bed slope ( $S_L$ ) of the ship-shaped floating dike. The numerical results were verified against experimental ob-

servations. The results demonstrated that: 1) As  $D$  increased from 0.2 to 0.8, the maximum relative streamwise velocity below the ship-shaped floating-dike (SSFD), defined as the ratio of local maximum flow velocity/inlet average flow velocity ( $U/U_{0\max}$ ), gradually increased, from 1.52 to 1.69. The length of the back-flow area and  $U/U_{0\max}$  increased from  $1.0L$  to  $3.5L$  ( $L$  is the length of SSFD) and from  $-0.35$  to  $-0.51$ . Increasing  $D$  also intensified near-bed flow velocity and enhanced turbulence intensity downstream of the SSFD. 2) As  $K$  increased, the effective flow-passed cross-section decreased, resulting in increased flow velocity below and outside the SSFD. The area of the back-flow and low-velocity zones expanded with increasing  $K$ , whereas the length and intensity of the back-flow region remained nearly unchanged. Turbulence kinetic energy gradually increased and formed a concentrated core region near the bottom and downstream of the SSFD. 3) When the SSFD was tilted upward with  $\theta = -30^\circ$ , a strong blocking effect was observed, with  $U/U_{0\max}$  upstream of the SSFD reduced to 0.4, while near the shore and bottom of the SSFD,  $U/U_{0\max} = 1.53$ , which was less than  $\theta = 30^\circ$  with  $U/U_{0\max} = 1.63$ , but both were less than  $\theta=0$  with  $U/U_{0\max} = 1.72$ . The distribution of the slow-flow zone behind the SSFD was larger when  $\theta = -30^\circ$ . When  $\theta = 30^\circ$ , the flow remained relatively stable, characterized by weak turbulence kinetic energy, and localized acceleration zones and circulation structures developed downstream of the SSFD. When the SSFD was positioned on the deeper side of the channel, the flow concentrated beneath the structure, resulting in an intensified back-flow region. The transverse slope of the riverbed enhanced downstream circulation. The results indicated that the SSFD achieved optimal slow-flow and sedimentation promotion effects when it was arranged on the deeper side, tilted downward, with a submergence ratio  $\leq 0.4$  and a length ratio  $\leq 0.5$ .

**Conclusions** The geometric dimensions and spatial arrangement of the ship-shaped floating dike, along with the transverse bed slope, play a significant role in influencing the surrounding hydrodynamic characteristics and turbulence structure. As an innovative river regulation structure, the ship-shaped floating dike exhibits advantages including the formation of a stable slow-flow zone downstream of the dike, well-developed secondary circulation, and minimal disturbance to the bottom flow field, which collectively contribute to favorable ecological compatibility. These findings provide valuable technical support and practical reference for the application of ship-shaped floating dikes in river regulation engineering projects.

**Key words:** ship-shaped floating-dikes; hydrodynamic structure; river regulation; numerical simulation

(编辑 吴芝明)

引用格式: Li Bin, Lu Jun, Li Chaoqun, et al. Numerical study on the flow characteristics around ship-shaped floating-dike with different layout-forms[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(2): 278–288. [李彬, 鲁俊, 李超群, 等. 船型浮堤布置形式对水流结构影响数值分析[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(2): 278–288.]