

芜申运河三里埂段深坑成因分析

邵雨辰^{1,2}, 丁 坚^{1,2}, 吴德安², 傅茆鸣², 韩文君²

(1. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 用 MIKE21 水动力模块和物理模型对三里埂汇流段流场进行了模拟。经过试验验证, 模拟结果和实测资料吻合较好, 说明两个模型的建立是成功的。数学模型对深槽内水流的水力性质研究表明, 深坑处是深槽沿程受水流剪切力、冲击力以及弯道环流最大的区域。深坑被剥蚀和冲刷下来的泥沙通过弯道环流向对岸高滩输运, 形成高滩不断淤高, 深坑不断冲刷的状况。此外, 由物理模型试验对深坑处流态的观察可知, 深坑处于水流交汇和分汊不断变化区域, 经常出现漩涡、汇流、紊流等不良流态, 这些流态提高了水流紊动能量和挟沙能力, 为深坑的发展提供了有利条件。三里埂汇流段水动力状况的数学模型和物理模型研究为该河段深坑的整治提供了理论依据。

关键词: MIKE21 水动力模块; 物理模型; 深坑; 流态

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)01-0092-06

研究区段位于芜申运河三里埂汇流段, 水系流向在三里埂成十字分汊(如图1), 四条河交汇, 分别为东接黄池河, 南接赵家河, 西接清水河, 北入青山河, 四河在三里埂河宽最窄处交汇, 此处两岸大堤间距仅为180 m。该河段的水流含沙量较低, 多年平均含沙量约为 0.1 kg/m^3 。1981—2007年间, 该段深泓点平面呈左右摆动变化, 深泓点横向摆动相对摆幅在0.52%~3.59%之间, 摆动幅度不大; 深泓点的纵向变化幅度在0.26~0.78 m之间, 变化幅度不大, 此河段除局部断面由于深泓点向右摆动以及由于南岸滩地有一定下切, 深泓点略有淤积造成过水面积减小, 局部断面北岸滩地变化较大, 主槽略有冲刷, 但主槽过水面积未发生较大变化, 大部分河段断面面积变化不大。然而在靠岔口约 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 范围的深坑, 河床冲刷最深处达 -9.0 m , 而且不断朝堤坝方向发展, 影响附近堤坝的安全, 虽然当地水利部门对深坑进行一系列的填埋和加固措施, 但是收效甚微, 被填埋的深坑很快又遭冲刷, 对堤坝威胁仍然存在。因此, 要想从根本上解决深坑冲刷的问题, 首先要对深坑形成的水动力条件进行深入研究。



图1 三里埂汇流段卫星地图

Fig. 1 Satellite map of Sanligeng confluence section

1 模型的建立和验证

为便于研究, 分别运用了 MIKE21 水动力模块和物理模型模拟了三里埂汇流的水流。

收稿日期: 2013-06-25

作者简介: 邵雨辰(1988-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事港口与航道工程专业研究。

E-mail: shaoyuchenxy@sina.com

1.1 数学模型的控制方程和定解条件

利用有限元方法求解, 根据水深平均理论而得到的水深平均二维水流连续方程和运动方程如下:

$$\text{水流连续性方程: } \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(HU)}{\partial t} + \frac{\partial(HUU)}{\partial x} + \frac{\partial(HVU)}{\partial y} = \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho} - gH \frac{\partial(H + Z_b)}{\partial x} + fHV + N_x H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial(HV)}{\partial t} + \frac{\partial(HUV)}{\partial x} + \frac{\partial(HVV)}{\partial y} = \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho} - gH \frac{\partial(H + Z_b)}{\partial y} - fHU + N_y H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \tag{3}$$

式中: t 为时间; x, y 为空间水平坐标; H 为全水深, 即水面到水底的距离; Z_b 为床面高程; U, V 分别为垂线平均流速在 x, y 方向的分量; f 为地转参数, $f = 2\omega \sin\varphi$, ω 为地转角速度, φ 为计算水域的地理纬度; g 为重力加速度; τ_{bx}, τ_{by} 分别为水底摩阻力在 x, y 方向的分量, $(\tau_{bx}, \tau_{by}) = C_f \rho \sqrt{U^2 + V^2} (U, V)$, C_f 为水底阻力系数; τ_{sx}, τ_{sy} 分别为水面风应力在 x, y 方向的分量, $(\tau_{sx}, \tau_{sy}) = C_w \rho \sqrt{W_x^2 + W_y^2} (W_x, W_y)$, C_w 为水面风应力系数, W_x, W_y 分别为水面风速在 x, y 方向的分量; N_x, N_y 分别为 x, y 方向的水流紊动黏性系数。

定解条件的初始条件和边界条件如下:

(1) 初始条件。这里运用冷启动的方式, 将函数初始值近似成一个常数。经过一定时间的运行以后, 初始值产生的误差会逐渐消除^[1]。

$$h(x, y, 0) = h_0(x, y) \quad u(x, y, 0) = u_0(x, y) \quad v(x, y, 0) = v_0(x, y)$$

(2) 边界条件。边界条件包括上下游开边界条件和固壁的闭边界条件。一般情况下, 上游边界给定流量条件, 下游边界给定水位条件。闭边界根据固壁不能穿越的要求, 法向速度取为零, 即 $\bar{V}_n = 0$ 。

1.2 物理模型的设计和制作

在收集初步工程方案图、地形图, 以及主河长 2.4 km 范围水文站资料, 进行水文测验等工作的基础上, 建立定床大比尺准正态物理模型, 可保证试验精度。模型覆盖河段长 2.4 km。根据天然水深和流速, 分析计算得到模型比尺为: 水平比尺 1 : 60, 垂直比尺 1 : 40, 变率 $\xi = 1.5$ 。模型覆盖河段长约 2.4 km, 模型平面尺度为 40 m × 26 m。

1.3 模型验证

在对三里埂汇流段水文资料测量和收集的基础上, 找出典型的水文条件(表 1), 对数学模型和物理模型的流场进行模拟, 并选择试验 1 即项目组现场测量的水情作为控制条件, 对两模型进行验证。

表 1 三里埂汇流段典型水文条件

Tab. 1 Typical hydrological conditions of Sanligeng confluence section

方 案		河流断面日平均流量/(m ³ ·s ⁻¹)				说 明
序号	三里埂汇流水位(黄基)/m	DM1	DM2	DM3	DM4	
试验 1	8.75(2011-06-20)	490.0	390.0	542.0	337.0	实测高水位, 大流量, 模型验证
试验 2	11.2(1996-07-30)	1 820.0	1 420.0	1 995.5	1 240.8	最大洪水水位、流量, 流态分析
试验 3	6.4(1998-04-08)	240.0	172.9	252.7	157.0	低水位, 小流量, 流态分析
试验 4	7.5(1996-06-26)	310.0	250.0	343.9	213.5	中水位, 小流量, 流态分析
试验 5	10.7(1998-08-01)	800.0	108.0	559.7	348.0	最大逆流, 高水位, 中流量, 流态分析
试验 6	10.87(1995-07-03)	502.8	567.7	685.2	385.4	最大通航水位, 中流量, 流态分析
试验 7	10.91(1996-07-02)	720.8	567.7	824.6	463.9	最大通航水位, 洪水流量, 流态分析

数学模型的初始流场内水位为 8.75 m, 各处流速均为 0, 为冷启动, 边界条件根据实测试验 1 的流量和 水位设置(表 1), 模型近清水河断面(DM1)的流量为 490 m³/s, 近赵家河断面(DM2)流量为 390 m³/s, 近青 水河断面(DM3)的水位为 8.75 m, 近黄池河断面(DM4)的水位为 8.75 m。为了让流场计算达到稳定状态,

模拟时间为12 h,时间步长为30 s,并且每30 s输出一次计算结果。底部糙率选用曼宁系数,高滩上的系数一般取0.05左右,深槽处系数根据水深大小取0.01~0.05。采用河海大学研制的“开边界模型多泵控制潮流模拟和量测系统”建立本物理模型边界流量和水位控制系统。计算同时输入试验1情况下各个边界上的控制水位和流量。

数学模型中,提取边界上均匀分布的20个流速测点数据与实测数据对比;物理模型中,在每个断面各选取4个代表性测验点进行流速测量。验证结果表明,两个模型的流速和现场实测基本吻合,对比实测数据,4个边界断面上的流速模拟结果平均误差在10%范围之内(图2),符合规范要求,这说明数学模型和物理模型的建立是成功的。

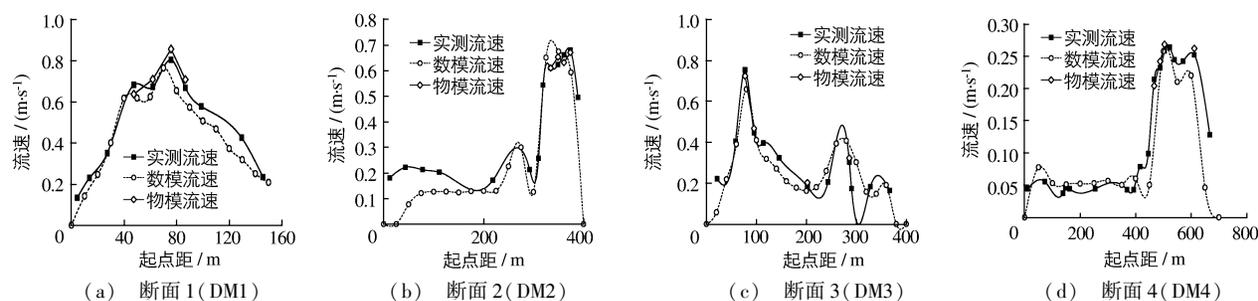


图2 4个断面的流速验证

Fig. 2 Velocity verification results of four sections

2 三里埂汇流段模拟水流流态分析

通过数学模型对三里埂汇流段在不同水文条件下的水流流态进行模拟,发现在不同水文条件下,三里埂的水流流态有很大的不同。首先体现在不同水位下,水流的过水断面有很大变化。低水位时(图3(a)),水流主要集中在深槽内,由于高滩平均高程约7~8 m,高滩上基本没有水流通过。高水位时(图3(b)),水流漫过高滩,整个三里埂汇流段均有水流通过,但高滩上的水流流速明显要小于深槽内的水流流速。洪水位时,整个汇流段流速很大,深槽与高滩的流速相差很小。其次,在不同水文条件下,水流在汉口的分流有很大变化。一般情况下,水流在汉口的分流会受到很多因素的影响。

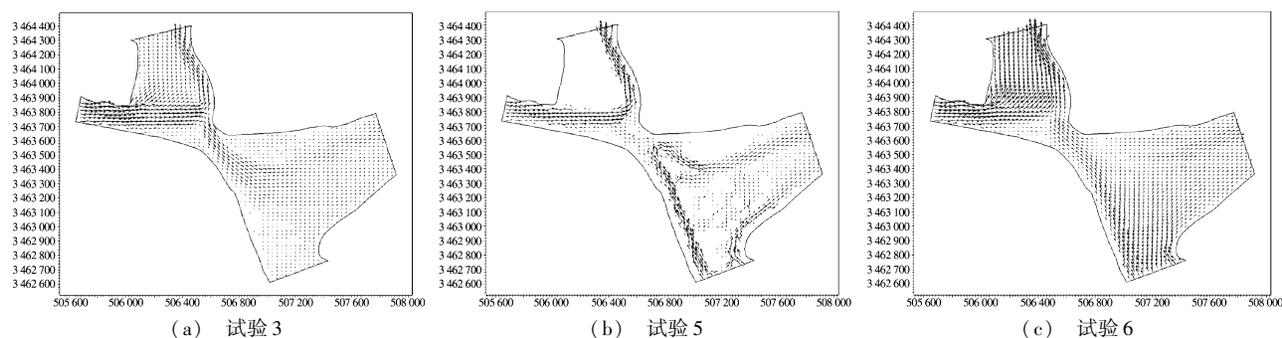


图3 试验数值模拟流场

Fig. 3 Simulated flow field given by tests

在三里埂这种由两股水流成某一角度在汉口交汇形成的十字交叉河段,要研究某一股水流在汉口的分流,除了要考虑常规因素以外^[2-3],还要考虑另一股水流的水文条件和变化情况。根据模拟结果发现,当 $Q_{DM2}/Q_{DM1} \approx 0.72$ 时,DM1的水体和DM2的水体在汉口处不发生交换,即DM1的来流不经过汉口基本都流入DM3断面,DM2断面的来流也不经过汉口向东流入DM4中,如试验3(如图3(a))。当 $Q_{DM2}/Q_{DM1} > 0.72$,DM2的部分来流通过汉口,和DM1的来流在深坑处汇合,通过深槽进入DM3,如试验1,2,4,6和7,其中最

明显的为试验 6(如图 3(c))。当 $Q_{DM2}/Q_{DM1} < 0.72$, DM1 的部分来流会在深坑处分叉, 一部分进入 DM3, 另一部分通过岔口和 DM2 的来流汇合进入 DM4, 如试验 5(如图 3(b))。

物理模型中各水文条件下的模拟结果和数值模型基本一致, 但是在物理模型中, 水流局部的回流、漩涡、紊流等三维流态表现得比数值模型更加明显。

3 深坑形成的原因分析

数学模型中, 在弯道及其上下游深槽区域每隔 50 m 左右布置 1 个测量断面(如图 4), 在计算过程中, 提取断面上的流速、水位和流量数据。对深坑附近的水流条件进行深入研究。

3.1 深槽弯道应力分析

弯道处深槽水深较深, 是主流集中过流的地方。影响主流流速大小和方向的主要因素是河岸和深槽的约束, 因此水流也会给深槽和岸线施加相应的冲击力和剪切力。运用天津水运工程科学研究所提出的弯道岸线冲击力和剪切力计算方法^[4], 将 11 个深槽断面作为控制边界, 每相邻两个控制边界组成一个计算单元(如图 5), 共组成 10 个计算单元, 并假设进入开始边界的水流完全从结束边界流出。根据恒定流动量方程, 可以求出每个单元水流所受到的水平力合力, 再将合力分解成与深槽走向相切的 F_τ 和法向力 F_n , 继而可以求出弯道处深槽和岸线所受水流的剪切应力和冲击应力(图 6)。

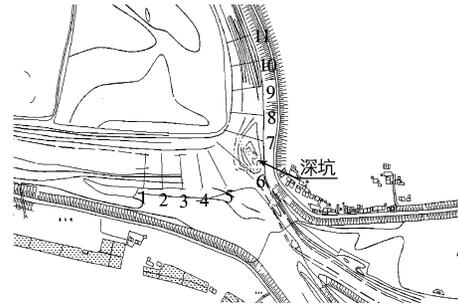


图 4 数学模型中的测量断面布置
Fig. 4 Layout of the measuring sections in a mathematical model

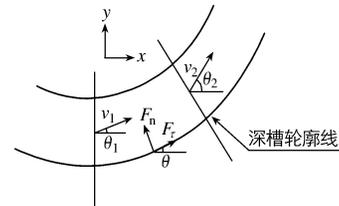


图 5 计算单元动量变化分析
Fig. 5 Momentum change of calculation unit

$$\sum F_x = \rho Q(\beta_2 v_{2x} - \beta_1 v_{1x}) \quad (4)$$

$$\sum F_y = \rho Q(\beta_2 v_{2y} - \beta_1 v_{1y}) \quad (5)$$

$$\sqrt{F_x^2 + F_y^2} = F \quad (6)$$

式中: β 为断面动量修正系数; ρ 为流体密度; Q 为深槽处河道断面流量; $v_{1x}, v_{1y}, v_{2x}, v_{2y}$ 为计算单元上下游过流断面的平均流速在 x, y 在两个坐标方向的投影; $\sum F_x, \sum F_y$ 为作用在计算单元内流体上的所有水平力在 x, y 两个坐标方向上投影的代数和。

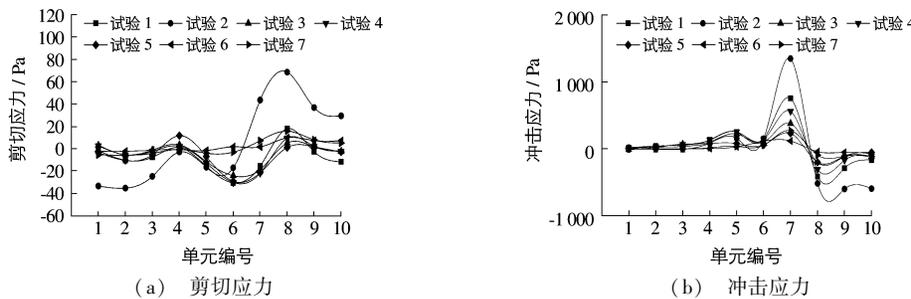


图 6 不同水文条件下深槽所受剪切应力和冲击应力
Fig. 6 Shear stresses and impact stresses on deep pool under different hydrologic conditions

在典型水文条件中(表 1), 试验 2(即洪水水位)的各个断面通过流量是最大的, 因此水流流速在所有条件中也是最大的, 对弯道的剪切应力较其他水文条件大。冲击应力的大小也和过弯道的水流流量密切相关,

试验2对弯道的冲击应力较其他水文条件大。总体来看,单元6~8即深坑处是深槽沿程所受到的冲击应力和剪切应力最大的地方,这就意味着深坑附近的土体较其他地方受到更强的水流剥蚀和冲刷,这是深坑得以形成和发展的重要原因。

3.2 弯道环流的作用

过弯水流的流速和水流的横比降是弯道环流两个重要的水力学要素,两者的大小直接决定了弯道环流的强弱^[5-7],不同水文条件下各断面横比降和平均流速见图7。从纵向分布来讲,横比降峰值主要集中在6~9断面,小流量横比降峰值要比大流量的提前;断面平均流速在断面6附近稍有下降,过弯以后迅速变大,这主要由于深坑附近的断面尺寸较上下游都大。总体来看,深坑附近的横比降和流速在中流量和大流量情况下,都处于较高的水平,此时水流冲刷和剥蚀能力加强,弯道环流较为强烈,在环流作用下,底层被冲刷下来的泥沙不断被水流向高滩一侧搬运,为深坑不断向近侧河岸发展提供了有利条件。

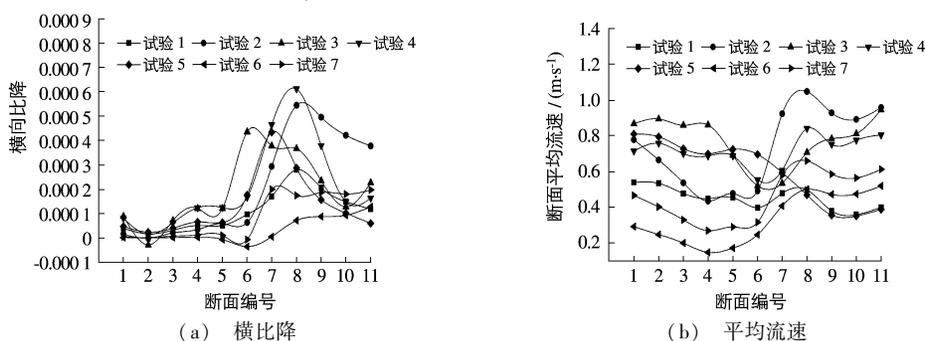


图7 不同水文条件下各断面横比降和平均流速

Fig.7 Transverse slopes and mean velocities of sections under different hydrologic conditions

3.3 水流流态的影响

如前流态的分析,当 $Q_{DM2}/Q_{DM1} > 0.72$, DM2 的部分来流通过汉口,和 DM1 的来流在深坑处汇合,通过深槽进入 DM3。此时 DM2 的来流在与 DM1 的主流交接面上发生强烈混杂,产生漩涡、回流等,水流紊动作用增强^[8],此处水流挟沙能力增强,有利于水流对河床的侵蚀。当 $Q_{DM2}/Q_{DM1} < 0.72$ 时,DM1 的部分来流会在深坑处分叉,水流顶冲深坑附近河岸,也会发生漩涡等不良流态^[9-10],水流的紊动作用同样得到加强,这在物理模型中反映得较为明显。

4 结 语

(1)用 MIKE21 水动力模块和物理模型对三里埂汇流段进行了模拟。经过试验验证,模拟结果和实测资料吻合较好,说明两个模型均能反映出三里埂汇流段水流动力状况。通过对数学模型中 11 个断面流速、水位和流量的计算分析,深坑处是深槽沿程剪切力、冲击力以及弯道环流最大的区域。深坑被剥蚀和冲刷下来的泥沙通过弯道环流向对岸的高滩输运,导致高滩不断淤高,深坑不断掏空冲刷的状况。此外,通过物理模型对深坑处的流态观察,深坑处于水流交汇和分叉不断变化区域,经常出现漩涡、汇流、紊流等不良流态,继而增强了水流的紊动能量,提高了水流的挟沙能力,为深坑的发展提供了有利条件。

(2)在水流模拟过程中,数学模型和物理模型有着各自优点。数学模型在数据后期提取和分析方面有着较大的优越性,而物理模型较数学模型在对水流局部的漩涡、回流等三维流态的模拟更加精确。在实际运用过程中,可以根据研究的需要取长补短。

参 考 文 献:

- [1] 张玮,倪兵,陈乾阳. 长江澄通河段通州西水道整治工程对分流比影响研究[J]. 水道港口, 2013, 34(1): 39-44.
 (ZHANG Wei, NI Bing, CHEN Qian-yang. Research on influence of regulation works on diversion ratio of Tongzhousha west

- channel in Chengtong reach, Yangtze River[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2013, 34(1): 39-44. (in Chinese))
- [2] 陈晓云. 长江太仓—南通河段河道演变特性与航道治理思路分析[J]. *水运工程*, 2012(4): 102-110. (CHEN Xiao-yun. Regulation scheme of Taicang-Nantong deep-water fairway in Yangtze River[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2012(4): 102-110. (in Chinese))
- [3] 仲志余, 王永忠. 论长江澄通河段的综合治理与开发[J]. *人民长江*, 2009(6): 1-5. (ZHONG Zhi-yu, WANG Yong-zhong. Discussion on comprehensive regulation and development of Chengtong reach of the Yangtze River[J]. *Yangtze River*, 2009(6): 1-5. (in Chinese))
- [4] 张丽. 弯道水流二维数值模拟及岸线整治的水动力分析方法研究[J]. *水道港口*, 2012, 33(2): 136-141. (ZHANG Li. 2-D numerical simulation of bend flow and research of hydrodynamic method on renovating bank[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2012, 33(2): 136-141. (in Chinese))
- [5] 唐金芝. 河流横比降试验及改正方法[J]. *湖南水利*, 1994(6): 22-24. (TANG Jin-zhi. Transverse slope test and improved method of rivers[J]. *Hunan Hydro & Power*, 1994(6): 22-24. (in Chinese))
- [6] 唐宏涛, 吴伟. 河流弯道水流特点与冲刷深度探讨[J]. *浙江水利科技*, 2004(1): 7-9. (TANG Hong-tao, WU Wei. Investigation on characteristics and scour depth of flow in river bend[J]. *Zhejiang Hydrotechnics*, 2004(1): 7-9. (in Chinese))
- [7] 宋志尧. 计算弯道环流的通用公式[J]. *泥沙研究*, 2003(4): 19-23. (SONG Zhi-yao. The universal formula on transverse circulation in channel bends[J]. *Journal of Sediment Research*, 2003(4): 19-23. (in Chinese))
- [8] 张丽萍, 杨达源, 朱大奎. 长江渝宜河段深槽分布特征及成因[J]. *南京大学学报: 自然科学*, 2001, 37(3): 311-316. (ZHANG Li-ping, YANG Da-yuan, ZHU Da-kui. Formation causes and distributing characteristics of deep troughs in the Chongqing-Yichang reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2001, 37(3): 311-316. (in Chinese))
- [9] 白静, 李一兵. 长江下游江心洲水道河床演变分析及趋势预测[J]. *水道港口*, 2009, 30(5): 347-351. (BAI Jing, LI Yi-bing. Analysis of riverbed evolution and trend prediction for Jiangxinzhou waterway of the lower Yangtze River[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2009, 30(5): 347-351. (in Chinese))
- [10] 何娟, 陈立, 周迎军, 等. 河床边界条件改变对强约束型分汊河道冲刷调整的影响[J]. *水运工程*, 2009(5): 92-97. (HE Juan, CHEN Li, ZHOU Ying-jun, et al. Influence of riverbed boundary condition on erosion adjustment of strong-restriction braided reach[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2009(5): 92-97. (in Chinese))

Analysis of a deep pool at Sanligeng reach in Wuhu-Shanghai canal

SHAO Yu-chen^{1,2}, DING Jian^{1,2}, WU De-an², FU Min-ming², HAN Wen-jun²

(1. *Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Two mathematical models by using a MIKE21 flow model with a physical model are both established to simulate the flow field of the confluence near Sanligeng reach. Because of good correspondence of simulating results and test data in comparison with each other, the establishment of the two models are both proved to be successful. Hydraulic research results given by the mathematical model show that shear force, impact force and circulation flow in the deep pool are the largest along the groove. The sediment which is disintegrated and washed down from the deep pool will bring about lateral moving because of the transverse circulation. So the sediment of the deep pool near the concave bank will be scoured and deposited in the high beach of the convex bank. In addition, through observation of the flow patterns in the physical model, it is found that the flow often changes in the form of meeting and bifurcating in the deep pool, which leads to adverse flow patterns such as vortex, flow and turbulent flow. The adverse flow patterns can improve the flow turbulence energy and carrying capacity which will provide favorable conditions for the development of the deep pool. The studies of the hydrodynamic condition in the confluence segment of Sanligeng by two models provide a theoretical basis for the regulation of the deep pool in the reach.

Key words: MIKE21 flow model; physical model; deep pool; flow pattern