

文章编号:1001-4179(2015)07-0080-04

长江口局部河段三维潮流数值模拟研究

汤 任¹, 宋 双², 葛天明³, 路川藤³

(1. 江苏金港湾投资有限公司, 江苏 连云港 222042; 2. 江苏省大丰市港口管理局, 江苏 大丰 224100; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:为了准确深入地认识长江口区水动力特征,基于非结构网格有限体积法,建立了长江口南支、南北港局部河段三维潮流数学模型。模型验证结果良好,说明其能够正确反映水流的三维运动形式。在此基础上,分析了北港入口处表底层水流特征以及新桥通道垂向水流结构。结果表明,北港入口处,落急值在表层与底层差别较大,涨急值差别相对较小。新桥通道处,涨急时,中上层与中下层垂向流速梯度差异明显,落急差异相对较小。

关键词:非结构网格; CJK3D-WEM; 三维潮流; 数学模型; 河口

中图法分类号: TV143

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.07.021

近年来,随着水力学理论及计算机科学的发展,三维数学模型得到广泛应用,对三维水流运动的机理进行了较多研究,并解决了许多工程实际问题。A. Khosronejad 利用弯道水槽研究了水流、泥沙的三维运动问题^[1]。O. Mehmet 研究了博斯普鲁斯海峡的水动力问题^[2],为航道安全及水工建筑物的设计提供了技术支撑。于守兵等采用水位积分平衡法,并引入边壁滑移系数,建立了三维模型^[3],研究了淹没丁坝的水流结构问题。刘金贵等将非结构网格三维数学模型成功应用于崖门水道水流计算,并取得了不错的成果^[4]。王志力等建立了强潮河口瓯江口三维数学模型,并模拟了瓯江口盐度输运^[5]。华祖林等提出了基于三角形网格的隐式差分算法,并模拟了长江南通河段流场及浓度场,模拟结果令人满意^[6]。丁道扬等针对宽浅河道水流的特点,建立了基于分层积分降维数值解法的三维浅水紊流数值模型^[7],并指出该数学模型特别适用于解决宽浅河道及河口水流问题。

本文在前人研究的基础上,建立了长江口局部三维潮流数学模型,并分析了北港入口处水流特征,以期加深对长江口水动力特征的认识。

1 控制方程

CJK3D-WEM 于 2014 年取得国家软件著作权登记,适用于江河湖泊、河口海岸等涉水工程中的水动力、泥沙、水质、温排、溢油模拟预测研究,其 σ 坐标系下的浅水运动方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial \sigma} = 0 \\ \frac{\partial uH}{\partial t} + \frac{\partial u^2 H}{\partial x} + \frac{\partial uvH}{\partial y} + \frac{\partial uW}{\partial \sigma} + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fHv = \\ \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} (N_z \frac{\partial u}{\partial \sigma}) + \frac{\partial}{\partial x} (N_x \frac{\partial u}{\partial x}) + H \frac{\partial}{\partial y} (N_y \frac{\partial u}{\partial y}) \\ \frac{\partial vH}{\partial t} + \frac{\partial v^2 H}{\partial y} + \frac{\partial uvH}{\partial x} + \frac{\partial vW}{\partial \sigma} + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + fHu = \\ \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} (N_z \frac{\partial v}{\partial \sigma}) + H \frac{\partial}{\partial x} (N_x \frac{\partial v}{\partial x}) + H \frac{\partial}{\partial y} (N_y \frac{\partial v}{\partial y}) \end{cases} \quad (1)$$

直角坐标系下垂向速度分量可表示为

$$\begin{aligned} w &= W + u(\sigma \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial x}) + \\ &v(\sigma \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial y}) + (\sigma + 1) \frac{\partial \zeta}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

收稿日期:2014-12-23

作者简介:汤 任,男,工程师,主要从事港口等工程项目管理工作。E-mail:jgw_tr@126.com

通讯作者:路川藤,男,工程师,博士,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail:lct000abc@163.com

式中, x, y, z 为一原点 o 置于某一水平面, z 轴垂向向上的直角坐标系坐标; u, v, W 分别为流速矢量 V 沿 x, y, z 方向的速度分量; N_x, N_y, N_z 分别为 x, y, z 向水流紊动黏性系数; g 为重力加速度; t 为时间; ζ 为水位; H 为水深; σ 坐标, $\sigma = \frac{z - \zeta}{H}$ 。

2 数值方法

控制体物理量布置见图 1, 垂向流速布置在控制体上下表面, 其他物理量布置在控制体中心。

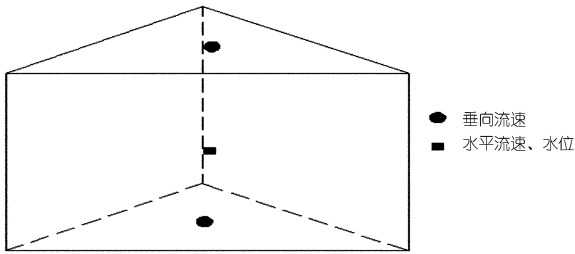


图 1 控制体物理量分布

采用有限体积法求解控制方程(1)^[8], 三维数学模型的实现条件如下。

- (1) 给定初始潮位值及流速值。
- (2) 将三维水流运动方程(1)沿垂向积分, 三维问题变成二维问题, 求解水位值。
- (3) 将求解的水位值带入动量方程, 求解分层水平流速 u, v 。
- (4) 将分层流速 u, v 代入式(2)求解分层垂向流速。

3 定解条件

3.1 开边界

开边界分为急流开边界和缓流开边界, 本文采用缓流开边界^[9]。

3.2 闭边界

采用镜像法处理。在闭边界外侧虚拟一个单元, 边界上两侧的法向流速相反, 切向流速相同, 即 $D_R = D_L, u_{n,R} = -u_{n,L}, u_{\tau,R} = u_{\tau,L}$, 其中, u_n, u_τ 分别表示单元法向和切向流速。

3.3 水面边界条件

$$\frac{\partial u}{\partial \sigma} = \frac{\tau_{fx} H}{\rho N_x}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} = \frac{\tau_{fy} H}{\rho N_y}, W = 0 \quad (3)$$

以上, τ_{fx}, τ_{fy} 分别为风应力 $\vec{\tau}_f$ 沿 x, y 方向的分量。

3.4 床面边界条件

$$\frac{\partial u}{\partial \sigma} = \frac{\tau_{bx} H}{\rho N_x}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} = \frac{\tau_{by} H}{\rho N_y}, W = 0 \quad (4)$$

以上, τ_{bx}, τ_{by} 分别为底部切应力矢量 $\vec{\tau}_b$ 沿 x, y 方向的分量。

4 算例

4.1 风生流试验

通过风生流试验检验三维算法, 其分层水平流速解析解为

$$u = \frac{\tau \sigma H (3\sigma + 2)}{4N_x \rho}$$

设计水槽长 5 000 m, 宽 2 000 m, 水深 10 m。网格步长 100 m, 网格如图 2 所示。水槽表面风应力 2 N/m^2 , 沿水槽 x 方向。水槽垂向分 10 层, 时间步长为 0.4 s, 垂向紊动黏性系数取常数 $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$, 水槽底部为无滑移边界, 边壁为部分滑移边界。

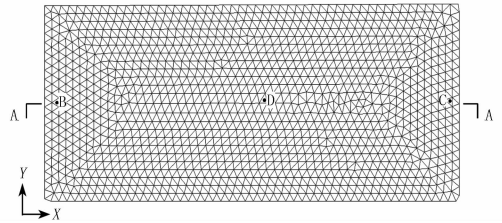


图 2 水槽网格及采样点、采样断面布置

图 3, 4 为水槽表层流场与水槽 A-A 纵剖面流场。从图可知, 水槽东西两侧水平流速明显小于水槽中部, 且水槽纵剖面具有明显的环流现象。图 5 为 D 点分层水平流速计算值与解析解比较。图 5 表明计算值与解析解吻合良好, 说明该模型具有良好的模拟水流运动能力。



图 3 水槽表层流场

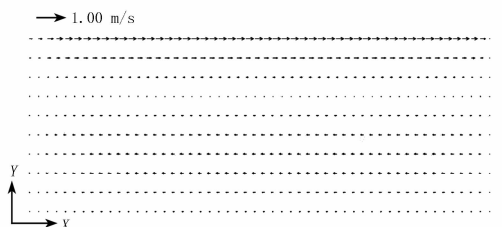


图 4 A-A 断面分层水平流场

4.2 长江口局部三维潮流数学模型

4.2.1 模型范围及计算参数

模型上边界至长江口南支中段,下边界至横沙岛南北两侧,总长 6.6 km,见图 6。最小网格长 100 m,最大网格为 500 m,时间步长为 4 s,垂向分 10 层,水平紊动黏性系数 $0.7\text{ m}^2/\text{s}$,垂向紊动黏性系数采用经验公式估算^[10]。

4.2.2 模型验证

模型验证时间为 2011 年 8 月大潮。由验证结果与实测值比较可知,潮位计算误差均在 0.1 m 之内,相位偏差在 20 min 内,满足规范要求。潮流验证底层及 0.8 层流速误差较大,主要原因是验证点处网格相对较粗,地形有所偏差,其他各层验证良好,满足规范要求。

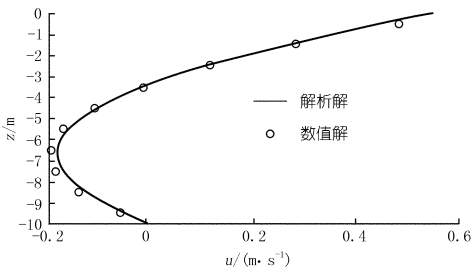


图 5 D 点解析解与计算值比较

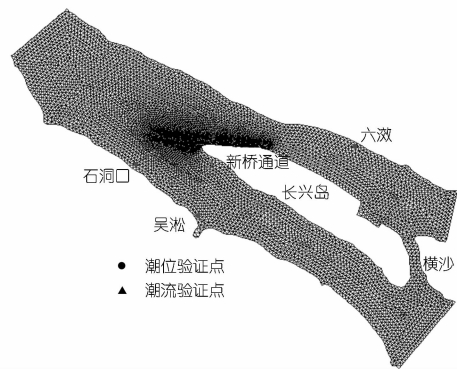


图 6 模型范围

4.2.3 北港入口水流特征分析

4.2.3.1 平面流场特征

图 7 为北港入口底层与表层落急流速分布。由图知,1~4 号断面,表层及底层落急流向差别较小,底层落急流速值远小于表层。北港入口处 1 号断面落急流向呈辅聚形态,2 号断面与 1 号断面恰好相反,落急流向呈发散形态,断面北侧 2 号-1、2 号-2 点流向向北

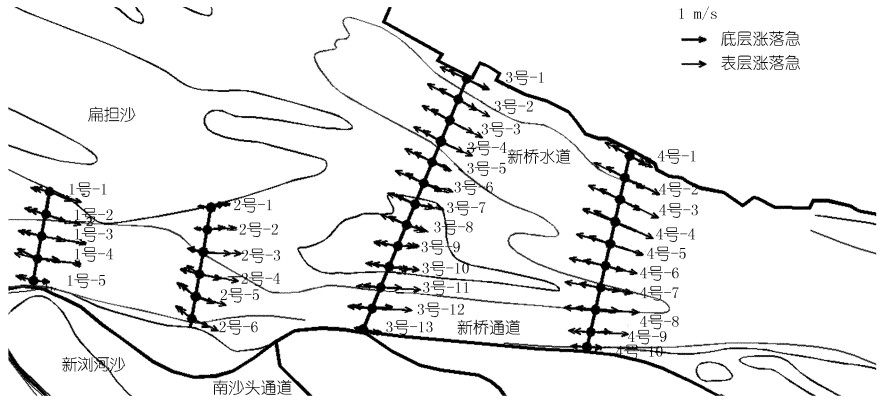


图 7 北港入口平面水流特征

偏转,这是地形与水流相互适应的结果。3 号断面横跨新桥水道、扁担沙尾部及新桥通道,新桥水道及新桥通道表层落急流速远大于扁担沙尾部,而底层落急流速差别相对较小。4 号断面与 3 号断面落急流速纵向分布较类似,但两侧落急流速与扁担沙尾落急流速差别较小。1、3 号及 4 号断面涨落急流路趋于一致,而 2 号断面差别较大;2 号断面 4、5、6 点与南沙头通道较近,受南沙头通道涨潮流影响,该处涨急流向北偏转。

4.2.3.2 垂向流速特征

以 1 号-2、2 号-5、3 号-12 和 4 号-9 四个点代表新桥通道不同位置,不同测点的垂向水流特征见图 8。

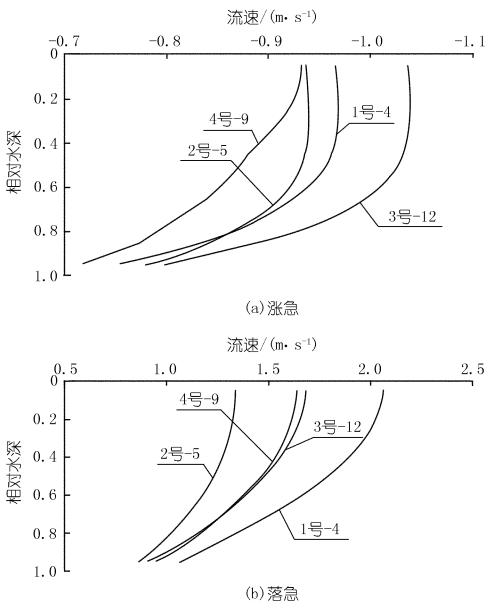


图 8 新桥通道垂向水流特征

由图 8 知,新桥通道 3 号-12 点涨急流速最大,平均涨急流速约 1.01 m/s。4 号-9 点涨急流速最小,平均涨急流速约 0.86 m/s。新桥通道 1 号-2 至 3 号-12 段,水体受扁担沙及新浏河沙等沙体影响,涨急流速垂向结构形状相似,中上层垂向流速梯度小,中

下层大。4 号 - 9 点靠近北港中段主槽,垂向流速梯度较平缓。1 号 - 2 点位于南支主槽与北港交界处,断面水深较大,最大水深约 20 m(理论基面),落急流速最大,平均落急流速约 1.73 m/s。2 号 - 5 点处,断面落潮流分散,水深较浅,落急流速最小,平均落急流速约 1.20 m/s。3 号 - 12、4 号 - 9 点落急垂向流速大小比较接近。

5 结 论

(1) 采用 CJK3D - WEM,基于非结构网格 FVM 方法,建立了风生流数学模型,解析解与数值解吻合良好,模型能够准确模拟三维水流运动。建立的长江口局部三维潮流数学模型,验证结果良好,能够反映长江口局部潮流运动。

(2) 北港入口处表底层水流结构为,落急值表层与底层差别较大,涨急值差别相对较小,1 号、3 号及 4 号断面涨落急流路较一致,2 号受南沙头通道涨潮流影响,部分区域涨急流向北偏转。

(3) 新桥通道涨急流速最大值位于 3 号 - 12 附近,落急流速最大值位于新桥通道进口处。新桥通道 1 号 - 2 至 3 号 - 12 段,涨急垂向流速梯度中上层与

中下层差异明显,落急差异相对较小。

参考文献:

[1] Khosronejad A,Rennie C D,Salehi Ne A A,et al. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in channel bend[J]. J. Hydraul. Eng.,2007,(133):1123 - 1134.

[2] Mehmet O,Berna A,Burak A,et al. 3D modeling of stratified flows: case study of the Bosphorus Strait[J]. Journal of Waterway, Port Coastal, Ocean Engineering,2012,(138):406 - 419.

[3] 于守兵,王万战. 基于非结构网格的三维浅水模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,(39):195 - 200.

[4] 刘金贵,李瑞杰. 非结构网格 FVM 模型及崖门水道三维模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2009,(24):49 - 55.

[5] 王志力,陆永军. 强潮河口三维无结构网格盐度数学模型[J]. 海洋工程,2008,(26):43 - 53.

[6] 华祖林,褚克坚. 基于三角形网格的潮汐潮汐水域水流水质的一种计算模式[J]. 河海大学学报,2001,(29):32 - 37.

[7] 丁道扬,吴时强. 三维宽浅河道水流数学模型研究[J]. 中国工程科学,2010,(12):32 - 39.

[8] 路川藤. 长江口潮流传播数值模拟及主要影响因素分析[D]. 南京:南京水利科学研究院. 2012.

[9] 林岩,路川藤. 连云港旗台防波堤工程二维潮流泥沙数值模拟[J]. 水运工程. 2014,(3):30 - 35.

[10] 孙文心,江文胜. 近海环境流体动力学数值模型[M]. 北京:科学出版社,2011.

(编辑:李 慧)

3D numerical simulation for tidal flow in local sections of Yangtze estuary

TANG Ren¹, SONG Shuang², GE Tianming³, LU Chuanteng³

(1. Jiangsu Gempu Investment Co., Ltd., Lianyungang 222042, China; 2. Dafeng Port Administration Bureau of Jiangsu Province, Dafeng 224100, China 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China)

Abstract: To further understand the hydrodynamic characteristics of Yangtze estuary, a 3D mathematical model is established for several locations such as south branch, Nangang and Beigang waterway in south branch, based on the unstructured grid in FVM. The verification shows that the model can simulate the flow structure of Yangtze estuary correctly. Therefore, the characteristics of surface and bottom flow in the entrance of Beigang waterway and the vertical flow structure in Xinqiao passage channel are analyzed. It suggests that for the entrance of Beigang waterway, the tidal ebb difference of surface and bottom is larger, while the tidal surge difference is smaller. For the Xinqiao passage channel, during a tidal surge, the difference of vertical velocity gradient at the upper - middle layer and middle - lower layer is significant, while it is smaller during a tidal ebb.

Key words: unstructured grid; CJK3D - WEM; 3D tidal flow; mathematical model; estuary