



## 连云港旗台防波堤工程二维潮流泥沙数值模拟

林岩<sup>1,2</sup>, 路川藤<sup>3</sup>

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098;

2. 连云港港口集团有限公司, 江苏连云港 222042; 3. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210098)

**摘要:** 以连云港旗台防波堤为研究背景, 基于非结构网格有限体积法建立二维潮流泥沙数学模型, 研究旗台防波堤建前后港区附近潮汐、潮流与悬移质含沙量的变化, 以期为日后连云港港口开发建设提供技术支持。研究认为, 旗台防波堤的建设完成后, 港区内外潮汐特性基本不变; 港区内潮流呈减弱趋势, 防波堤口门处潮流增强, 防波堤内侧港区形成明显的回流区域; 港区外侧高含沙量水体向外海移动, 港区内最大含沙量整体降低。

**关键词:** 连云港; 有限体积法; 数值模拟; 潮流; 泥沙

中图分类号: TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0030-05

### Two-dimensional tidal current and sediment numerical simulation to Qitai breakwater in Lianyungang

LIN Yan<sup>1,2</sup>, LU Chuan-teng<sup>3</sup>

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Lianyungang Port Co., Ltd., Lianyungang 222042, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The 2D tidal current and sediment mathematical model is built with FVM to Qitai breakwater in Lianyungang to study the changing of tide, tidal current and suspend sediment concentration nearby the port after completion of the breakwater, so as to provide technical support for future development of Lianyungang port. Accompanying the completion of Qitai breakwater, the nature of tide is altered neighboring the port and the tidal current is weakened in the harbor district but strengthened in the breakwater gap, the water with high suspend sediment concentration is away from the breakwater and the maximum sediment concentration in the harbor district is reduced.

**Key words:** Lianyungang; FVM; numerical simulation; tidal current; sediment

近年来, 连云港港口与航道建设高速发展, 目前已建成 30 万吨级深水航道一期工程 and 30 万吨级大型矿石码头, 开创了港口经济又好又快的发展局面。研究连云港的学者众多, 张玮<sup>[1]</sup>在数学模型的基础上研究了连云港附近海域的泥沙运动, 该模型能够同时模拟淤泥质与粉砂质泥沙运动。张海文<sup>[2]</sup>研究了连云港进港航道的回淤原因, 认为抛泥是航道回淤的主要来源, 建议加强抛泥工艺研究与管理。曲红玲<sup>[3]</sup>研究了连云港 30 万吨级航道扩建工程防波堤方案的比较, 认为防波堤

工程的实施有利于航道的维护。解晓鸣<sup>[4]</sup>研究了连云港防波堤的建设对于航道回淤的影响, 认为口门处含沙量升高, 口门内外两侧含沙量降低, 航道回淤量与含沙量变化关系一致。张存勇<sup>[5]</sup>、黄卫明<sup>[6]</sup>研究连云港附近海域的潮汐潮流特性, 连云港港区附近潮汐为正规半日潮, 潮波以前进波为主。黄志扬<sup>[7]</sup>在数学模型的基础上, 模拟了连云港附近海域潮流、泥沙运动, 研究了航道的回淤问题。以上学者的研究均基于现场资料或结构网格数学模型, 基本反映了连云港附近海域的

收稿日期: 2013-07-18

作者简介: 林岩(1982—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事港口、航道及港口相关配套基础设施的建设和管理工作。

基本水动力与泥沙概况。本文在前人研究的基础上, 基于非结构网格有限体积法, 建立二维潮流泥沙数学模型, 研究旗台防波堤建成后港区附近潮汐、潮流、水体含沙量的变化, 以期为日后连云港港口开发建设提供技术支持。

## 1 连云港二维潮流泥沙数学模型

### 1.1 二维潮流泥沙数学模型

#### 1.1.1 数值方法

二维浅水潮流泥沙控制方程向量形式可表示为:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \mathbf{E} = \mathbf{M} + \nabla \mathbf{E}^d \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{U} = (H, Hu, Hv, HS)^T$$

$$\mathbf{E} = (\mathbf{F}, \mathbf{G}), \text{ 其中 } \mathbf{F} = \begin{pmatrix} Hu \\ Hu^2 + gH^2/2 \\ Huv \\ HuS \end{pmatrix}, \mathbf{G} = \begin{pmatrix} Hv \\ Huv \\ Hv^2 + gH^2/2 \\ HvS \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{E}^d = (\mathbf{F}^d, \mathbf{G}^d), \text{ 其中 } \mathbf{F}^d = \begin{pmatrix} 0 \\ \varepsilon_x H \partial u / \partial x \\ \varepsilon_x H \partial v / \partial x \\ k_x H \partial S / \partial x \end{pmatrix}, \mathbf{G}^d = \begin{pmatrix} 0 \\ \varepsilon_y H \partial u / \partial y \\ \varepsilon_y H \partial v / \partial y \\ k_y H \partial S / \partial y \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_0 + \mathbf{M}_f = \begin{pmatrix} 0 \\ gH(M_{0x} + M_{fx}) + fv \\ gH(M_{0y} + M_{fy}) - fu \\ -\alpha w(S - S_*) \end{pmatrix}$$

式中:  $x, y$  为原点  $o$  置于某一水平面的直角坐标系坐标;  $u, v$  为流速矢量  $\mathbf{v}$  沿  $x, y$  方向的速度分量;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  为  $x, y$  方向的水平紊动黏性系数;  $g$  为重力加速度;  $t$  为时间;  $H$  为水深;  $f$  为科氏力;  $M_{0x}, M_{0y}$  为  $x, y$  方向的河床底部高程变化;  $M_{fx}, M_{fy}$  为  $x, y$  方向的底摩擦项;  $S$  为含沙量;  $D_x, D_y$  为  $x, y$  方向泥沙扩散系数;  $F_s$  为泥沙源汇函数。

将第  $i$  号控制元记为  $\Omega_i$ , 在  $\Omega_i$  上对向量式的基本方程组 (1) 进行积分, 并利用 Green 公式将面积分化为线积分, 得:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_i} \mathbf{U} d\Omega_i + \oint_{\partial\Omega_i} (\mathbf{E} \mathbf{n}_i - \mathbf{E}^d \mathbf{n}_i) dl = \int_{\Omega_i} \mathbf{M} d\Omega_i \quad (2)$$

方程(2)求解主要分3部分, 一为对流项求解, 二为紊动项求解, 三为底坡项处理。对流项数值通量可采用 Roe 格式的近似 Riemann 解, 紊动项采用单元交界面的平均值计算通过该界面紊动黏性项的数值通量, 有限体积法底坡项若不加任何处理, 则会造成静水的伪流动现象, 本文采用“斜底模型”处理底坡项。

#### 1.1.2 定解条件

##### 1) 水位开边界。

开边界又分为急流开边界和缓流开边界, 因本文所建模型为缓流模型, 故只给出缓流开边界的处理方法。

根据相容关系得:

$$U_R + 2c_R = U_L + 2c_L \quad (3)$$

式中:  $c_L$  和  $c_R$  表示单元左右静水波传播速度。

$$U_R = U_L + 2\sqrt{gh_L} - 2\sqrt{g(Z_R - Z_d)} \quad (4)$$

式中:  $Z_d$  为边界上通量积分点处的底高程。

##### 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  $D_R = D_L$ ,  $u_{n,R} = -u_{n,L}$ ,  $u_{\tau,R} = -u_{\tau,L}$ ,  $u_n, u_\tau$  表示单元法向和切向流速。

##### 3) 动边界技术。

动边界是数学模型的难点, 动边界的处理精确与否直接影响模型计算的质量。非结构网格动边界技术常用的有干湿法、切削法及冻结法, 其中以干湿法应用居多, 本文动边界技术采用干湿法。

##### 4) 初始条件。

$$\begin{cases} \zeta(x, y, t) = \zeta_*(x, y, t) \\ u(x, y, t) = 0 \\ v(x, y, t) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

## 1.2 连云港旗台港区二维潮流泥沙数值模拟

### 1.2.1 数学模型范围

旗台防波堤工程位于连云港港口门段, 2012 年建设完成, 由北防波堤和南防波堤组成。北防波堤从东西连岛东端的羊窝头向东延伸、呈两折线布置, 南防波堤从旗台嘴向东延伸沿规划旗台作业区

南侧边界呈L型布置,南、北防波堤总体呈环抱形布置。数学模型边界北侧至岚山区以北 20 km,南侧至滨海港,总长约 105 km,东侧最远至 -35 m (最低理论基准面)等深线,宽度约 95 km,图 1、2 为数学模型及验证点示意图。

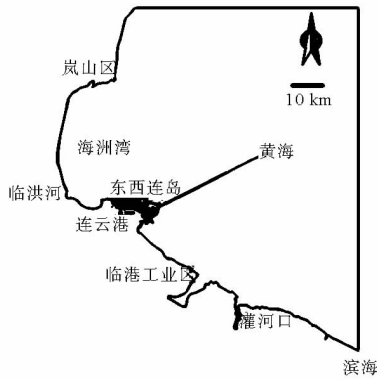


图 1 数学模型范围

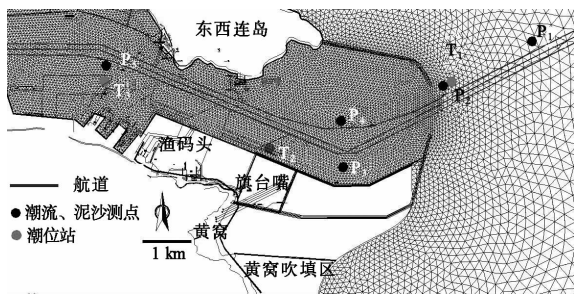


图 2 连云港港区及数学模型验证点示意图

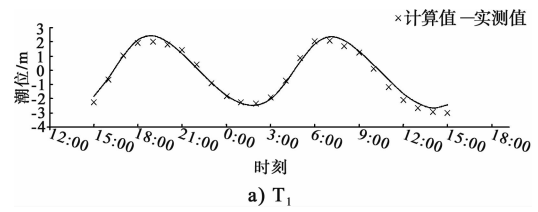
1.2.2 数学模型计算参数

网格单元 31 002 个,空间步长 55 ~ 3 000 m,时间步长 2 s,水平紊动黏性系数 0.1,动边界水深 0.01 m,悬移质泥沙中值粒径 0.007 mm;糙率  $n = n_0 + n'/H$ ,  $n_0$  为基本糙率,  $n'$  为附加糙率;泥沙沉降速度和挟沙力采用窦国仁公式。

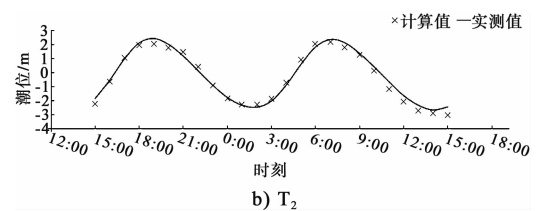
1.2.3 数学模型验证

数学模型地形采用 2005 年大范围海图地形与 2011 年港区航道地形组合而成。模型潮位、潮流、含沙量验证时间为 2012-03-09T15:00—2012-03-10T15:00,验证点位置见图 2。由图 3 ~ 5 知,潮位值偏差均在 10 cm 之内,高低潮位相位偏差在 15 min 内,流速分布地形关系密切。因模型地形与实际地形有偏差,因此流速计算值误差略大,但基本都在 10% 之内,含沙量计算值  $P_5$  点误差较大,主要由现场与数学模型悬沙粒

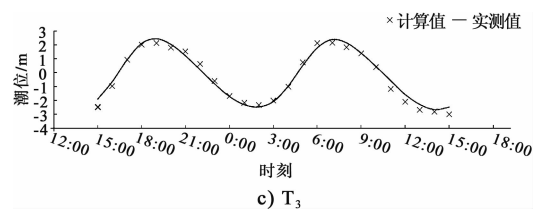
径<sup>[8]</sup>偏差造成,其他各点基本反映了港区内外的含沙量分布。数学模型验证良好,满足规范<sup>[9]</sup>要求,说明本文能够模拟连云港海域潮流泥沙运动。



a) T<sub>1</sub>

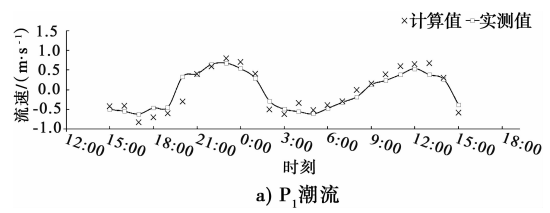


b) T<sub>2</sub>

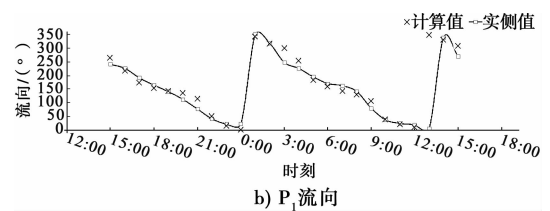


c) T<sub>3</sub>

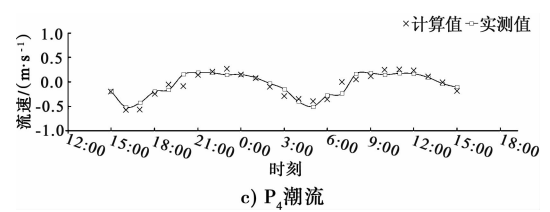
图 3 潮位验证



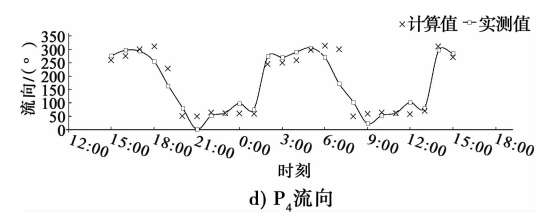
a) P<sub>1</sub>潮流



b) P<sub>1</sub>流向



c) P<sub>4</sub>潮流



d) P<sub>4</sub>流向

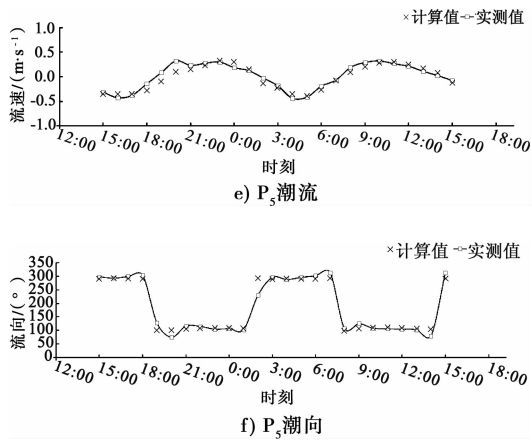


图4 潮流验证

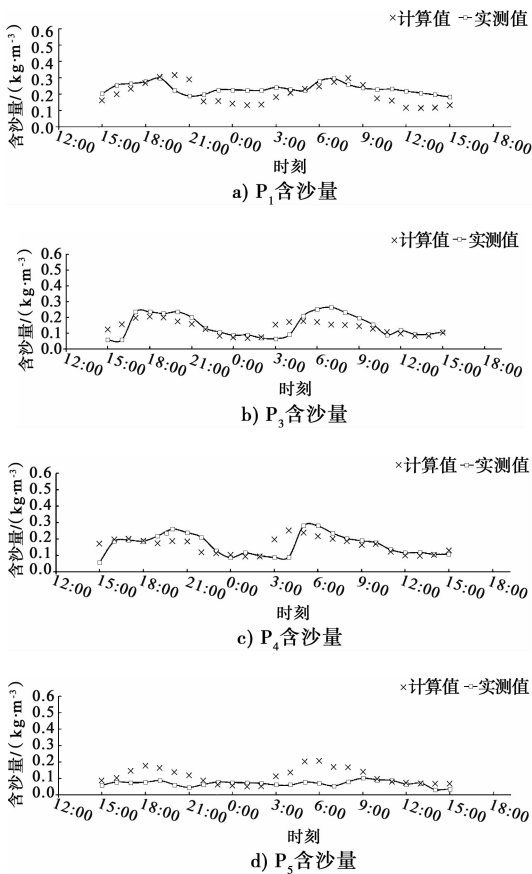


图5 含沙量验证

## 2 旗台防波堤对港区附近潮汐、潮流特性影响分析

### 2.1 潮汐特性

以  $C_3$  和  $C_6$  (图2) 两点代表港区内外水域。旗台防波堤建成后, 受防波堤阻挡作用, 潮波向港区内传播受阻, 潮差减小, 潮波能量减弱 (图6)。港区内 ( $C_3$ ) 高潮位降低 0.1 m 左右, 低潮位变化较小, 潮位相位略有滞后。防波堤外侧水域 ( $C_6$ ), 潮位受工程影响较小, 工程前后潮位过程线基本

不变。综上所述, 旗台防波堤的建设对于港区内潮位略有影响, 基本不影响港区外潮位。

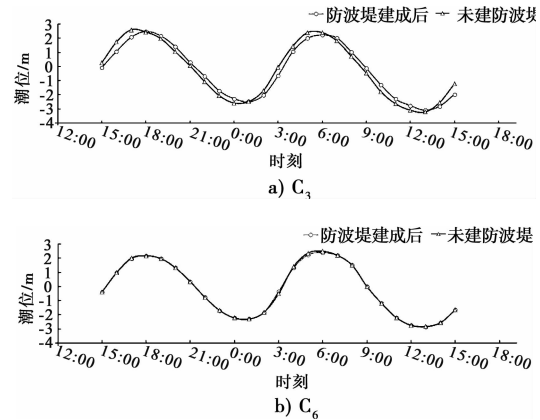
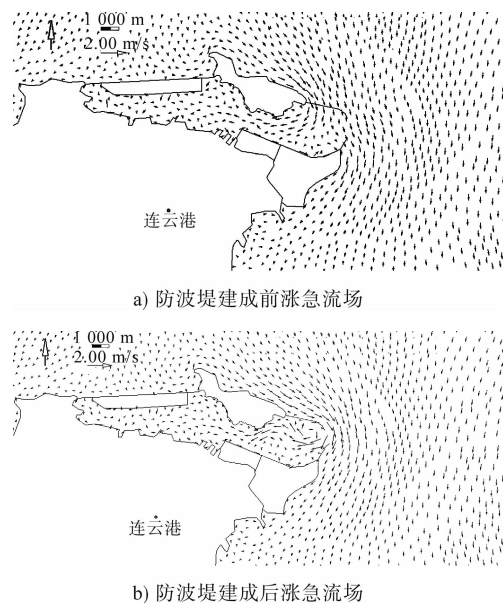


图6 旗台防波堤建成前后潮位变化

### 2.2 潮流特性

#### 2.2.1 港区附近流场变化

旗台防波堤建成后, 工程附近涨潮与落潮流场发生了较大的变化 (图7)。工程前, 涨潮时潮波自东北向向港区传播, 部分潮流沿东西连岛外围进入港区, 落潮与涨潮方向相反, 水流相对平顺。工程后, 潮流流场发生了较大变化, 涨潮时, 防波堤改变了工程附近涨潮流向, 北侧防波堤外侧潮流流向向东偏移, 南侧防波堤外侧潮流向西偏移, 防波堤港区内形成明显的回流区域; 落潮时, 受防波堤的掩护作用, 防波堤外侧潮流明显减弱, 而口门处潮流增强, 流向向南偏移。



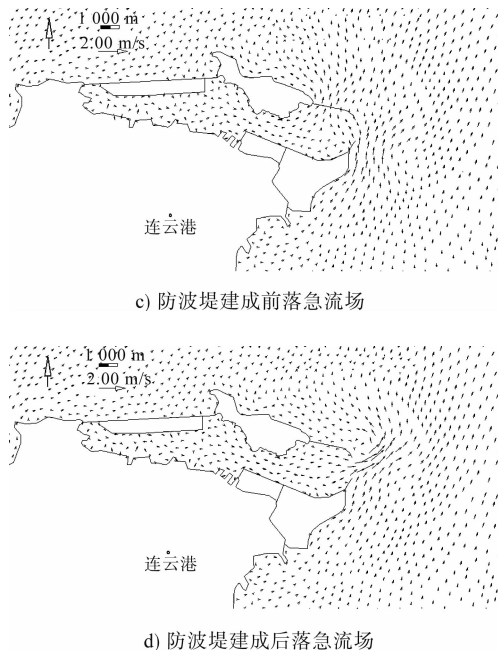


图7 旗台防波堤建成前后涨落急流场变化

### 2.2.2 连云港深水航道潮流变化

图8为旗台防波堤实施后，连云港深水航道潮流变化。防波堤建成后，港区内潮差减小，即纳潮量减小，故 $C_1 \sim C_3$ 涨落急流速有所减小，减幅 $5 \sim 10 \text{ cm/s}$ ；防波堤口门附近，涨落急流速均大幅度增大，其中落急流速增幅大于涨急流速，防波堤外侧水域，涨落急流速增幅逐渐减小，至 $C_9$ 处（距口门约8 km），涨落急流速基本不变。由图9知，防波堤建成后，港区内航道以往复流为主，防波堤外侧旋转流特性不变。

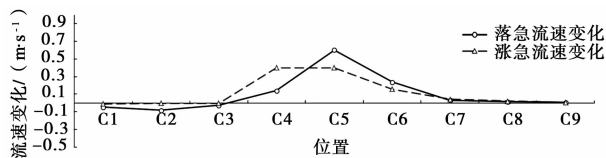


图8 旗台防波堤建成前后航道流速变化



图9 旗台防波堤建成前后航道潮流椭圆变化

### 3 旗台防波堤对港区悬移质泥沙影响

图10为旗台防波堤建设完成后，港区附近含沙量的变化。由图10知，工程完成后，防波堤外侧高含沙量水体向外海移动，港区内最大含沙量整体降低。口门处，由于涨落潮流速增大，局部含沙量升高。港区内部由于潮流作用比较弱，含沙量变化相对较小。防波堤的建设具有挡浪阻沙的作用，本文数学模型未考虑港区内波浪要素的变化，这是本文研究的不足之处，今后需深入研究。

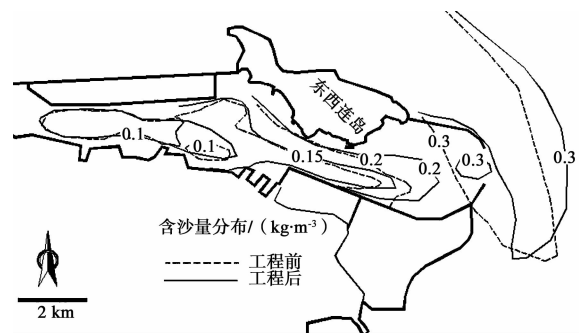


图10 旗台防波堤建成前后港区附近平均含沙量变化

### 4 结论

- 1) 旗台防波堤的建设完成后，港区内外潮汐特性基本不变。
- 2) 工程后，防波堤外侧流场产生了较大的调整，表现在北侧防波堤外侧潮流流向向东偏移，南侧防波堤外侧潮流流向向西偏移。港区内潮流呈减弱趋势，防波堤口门处潮流增强，防波堤内侧港区形成明显的回流区域。
- 3) 工程后，防波堤口门处平均含沙量升高，口门两侧含沙量呈降低趋势。

研究中未考虑波浪、盐度变化对含沙量的影响，这是本文的不足之处，后续工作中需深入研究。

### 参考文献:

[1] 张玮, 安翔. 连云港海域粉沙质和淤泥质海岸泥沙运动数值模拟研究[J]. 中国港湾建设, 2012(3): 1-6.  
 [2] 张海文, 董玉明. 连云港进港航道回淤研究[J]. 中国港湾建设, 2001(2): 47-49.  
 [3] 曲红玲, 窦希萍, 高翔宇. 连云港港扩建工程防波堤方案研究[J]. 水运工程, 2008(11): 9-14.