



# 华能曹妃甸煤码头项目龙口潮流数值模拟

孙永奎

( 中交天航港湾建设工程有限公司, 天津 300450)

**摘要:** 自曹妃甸建设以来, 抛石堤因施工简单、施工速度较快、适应能力强、施工方法成熟、安全性能高等优点而被普遍采用。然抛石堤施工, 不可避免要形成龙口, 尤其在外海, 四周无掩护的情况下, 受海域自然条件影响, 龙口合龙的施工一直是施工的难点。在华能曹妃甸煤码头项目抛石堤施工中, 通过数学模型模拟施工期间可能存在的水流变换过程, 为龙口合龙时间的选择、施工方案的设置提供依据, 以确保龙口施工过程中抛石的稳定。

**关键词:** 曹妃甸; 抛石堤; 数学模型; 龙口合龙

中图分类号: U 656.2                      文献标志码: A                      文章编号: 1002-4972(2015)12-0174-04

## Numerical simulation of gap tidal current in Huaneng Caofeidian coal terminal

SUN Yong-kui

(CCCC Tianhang Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

**Abstract:** The ripped-rock embankment is extensively used in construction of Caofeidian because of its simple construction, rapid construction, good adaptability, mature construction method, and high safety performance. However, gap is formed inevitably in the ripped-rock embankment construction, especially in the sea, all around without cover, and gap closure construction affected by the marine natural conditions has always been a difficulty. During construction of Huaneng Caofeidian coal terminal project, we simulate the possible current change process by mathematical model to provide reference for the choice of gap closure time and the setting of construction plan and thus ensure the stability of gap closure riprap in the process of construction.

**Keywords:** Caofeidian; ripped-rock embankment; mathematical model; gap closure

华能曹妃甸 5 000 万 t/a 煤码头项目围海造陆工程位于国投煤码头南侧, 为满足华能煤码头建设的需要, 需新建护岸和临时围埝各 1 条, 与现有煤码头起步工程南护岸及一港池外西防波堤围合成码头陆域。本工程分为 A、B、C 共 3 个标段, 合同约定有 1 处龙口, 供 3 个标段使用。龙口合龙是整个围堤施工的关键工序, 其一次合龙的成功与否关系到整个工程进度目标和成本目标, 如何能够一次成功合龙、最大限度降低材料损耗量, 为合龙施工中的重点。因此通过潮流数值模拟对合龙工程方案进行研究, 计算分析工程实施

过程中水流变换情况, 为合龙方案的实施及相关工作提供技术支持, 取得了较为满意的成果。本文主要介绍模型在华能曹妃甸煤码头围海造陆工程中的研究情况。

### 1 曹妃甸海域自然条件概况

1) 曹妃甸海域常风向为 W 向, 其出现频率为 17.6%, 次常风向为 S 向和 NE 向, 出现频率分别为 12.4% 和 11.4%, NNW、WNW、NNE 向风出现频率不足 2%; 根据多年统计数据, 10 月大于 6 级风的概率为 6.7%。

2) 工程水域常浪向为 S 向, 出现频率为 10.87%, 次常浪向 SW 向, 出现频率 7.48%。强浪向为 ENE 向,  $H_{4\%} \geq 1.3\text{ m}$  出现频率 2.28%; 次强浪向为 E 向,  $H_{4\%} \geq 1.3\text{ m}$  出现频率占 1.34%。

3) 曹妃甸海域属不规则半日潮, 年平均潮差 1.4 m。

4) 曹妃甸海域潮波运动形式整体来说呈驻波特征, 即中潮位时流速最大, 高、低潮位时转流; 该海域潮流整体呈往复流态, 其中涨潮指向西侧, 落潮指向东侧; 受沟槽地形归束及滩面阻水影响, 近岸潮流主向有顺岸或沿等深线方向流动的趋势。

5) 本工程附近水域, 潮流基本呈偏东西向的顺岸往复运动, 其中涨潮指向西侧, 落潮指向东侧。2009 年实测数据显示, 本工程附近水域大潮涨潮平均流速为 0.46 ~ 0.60 m/s, 落潮平均流速为 0.44 ~ 0.56 m/s; 小潮涨潮平均流速为 0.32 ~ 0.39 m/s, 落潮平均流速为 0.29 ~ 0.37 m/s。大潮期流速大于小潮, 涨潮流速大于落潮。本工程附近水域大潮期最大流速可超过 1.0 m/s, 小潮期亦可超过 0.7 m/s<sup>[1-2]</sup>。

2 数模的组成、建立和验证

2.1 数学模型的组成

本研究所采用的模型主要为潮流数学模型, 计算工作流程见图 1。

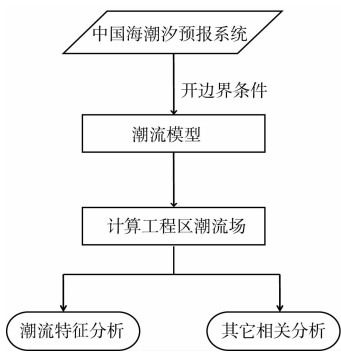


图 1 数学模型计算流程

潮流数学模型 (二、三维) 采用 Mike3 系列软件中的三角形网格水动力模块 (FM 模块)。该软件由丹麦水工所开发, 可应用于海岸、河口区

域的水动力模拟。FM 模块 (Flexible Mesh) 采用无结构三角形网格, 在处理潮流动边界、复杂工程建筑物边界等方面具有强大的功能, 且计算稳定性良好, 模拟结果具有较高的承认度。

三维潮流数学模型平面采用无结构三角形网格, 垂向采用地形贴体的  $\sigma$  坐标系。守恒形式的三维潮流运动控制方程如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + \frac{\partial(h\omega)}{\partial \sigma} = hS \tag{1}$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hvu)}{\partial y} + \frac{\partial(h\omega u)}{\partial \sigma} = fvh -$$

$$gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{hg}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} d\sigma + hF_u + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{v_t}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + hu_s S \tag{2}$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + \frac{\partial(h\omega v)}{\partial \sigma} = -fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} -$$

$$\frac{hg}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} d\sigma + hF_v + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{v_t}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + hv_s S \tag{3}$$

$$\omega = \frac{1}{h} \left[ w + u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} - \sigma \left( \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] \tag{4}$$

式中:  $\sigma = (z - \eta)/D$  为地形相对坐标, 其中  $\sigma = -1$  代表床面,  $\sigma = 0$  代表自由表面;  $u$ 、 $v$  为水平方向流速;  $\omega$  为  $\sigma$  坐标系下的垂向流速;  $w$  为垂直坐标系下的垂向流速;  $\partial \rho / \partial x$  为由密度梯度引起的斜压项;  $f$  为科氏力系数;  $v_t$  为垂向紊动黏性系数, 可由  $k - \varepsilon$  紊流模型确定;  $\rho_0$  为水体参考密度;  $S$ 、 $u_s$ 、 $v_s$  分别为点源强度和点源在水平方向的速度分量, 如不存在局部点源则可以忽略;  $F_u$ 、 $F_v$  为水平剪力项。

控制方程采用有限体积法显式求解, 并采用干湿网格判断法对露滩进行现象模拟。具体方法和关键技术可参见相应技术规程<sup>[3-4]</sup>。

2.2 模型设置及网格划分

2.2.1 模型计算范围

为避免边界处的数值传入误差, 模型范围应足够大。本次研究模型计算采用嵌套形式。大尺度模型计算范围为整个渤海区域, 可为中模型提供潮位边界条件; 中模型范围为渤海湾海域, 可为曹妃甸海域小模型提供潮位及潮流通量边界条件。用以研究工程海域的小模型水平尺度约

75 km × 53 km。各尺度模型计算范围见图 2，其中大模型开边界位于大连老虎滩和烟台一线。潮位边界由中国海洋大学研发的中国近海潮汐预测程序（ChinaTide）提供，该潮汐预测程序由 8 个分潮的调和常数进行叠加而获得潮位，具有较高精度。



图 2 模型计算范围

### 2.2.2 网格划分

计算域剖分采用无结构三角形网格，其中大尺度模型采用球面坐标系，中、小模型采用平面坐标系。网格剖分时外疏内密，小模型开边界处相邻网格节点最大步长约 1 500 m，工程附近网格最小步长为 10 m（可根据工程具体要求进一步提高计算空间精度），各方案网格节点约 15 000 ~ 16 000，三角形单元数约 30 000 个。图 3 为小模型的网格剖分形式。

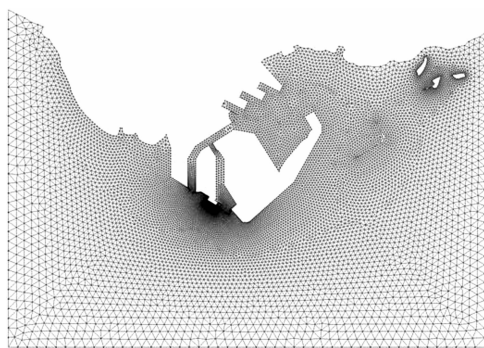


图 3 小模型网格剖分

### 2.2.3 垂向分层

三维数学模型计算时垂向剖分为 6 个层，分层厚度自表向底分别为  $0.1H$ 、 $0.3H$ 、 $0.5H$ 、 $0.7H$ 、 $0.9H$ 、 $H$ （ $H$  为水深 + 潮位）。

### 2.2.4 初始条件

潮流模型计算初始水位为各边界潮位的平均值，初始流速为 0。

### 2.2.5 水平紊动黏性系数

Smagorinsky 方程中可调系数  $C_s$  取为 0.25；底床粗糙高度取为 0.01 m。

## 2.3 模型验证

采用 2007 年 7—8 月和 2009 年 4 月大、小潮现场水文资料对数学模型进行验证。为节省篇幅，由于 2007 年水文测站大多位于甸头深槽以东，距工程区相对较远，流速、流向验证曲线只给出表层、 $0.6H$  和底层；2009 年则对各垂向分层均进行验证。

## 3 计算方案和计算条件的确定

### 3.1 龙口合龙方案

围堤合龙前，围区内大量的涨落潮流主要由龙口进出，此时水流集中，形成一股楔形水流，不仅在涨、落潮过程中均出现较大的落差和流速，而且在口门两侧还出现立轴漩涡，龙口防护重点是护底及两侧堤头。

龙口护底是在合龙之前，首先抛填龙口段下部结构至  $-4$  m 高程（理论深度基准），防止龙口覆盖层受冲刷、降低合龙难度。同时龙口形成后要要进行堤头防护施工，堵口之前，抛填 100 ~ 150 kg 块体护面块石和扭王字块，对龙口两侧堤头予以保护，防止在龙口处进出水流对堤头的破坏。龙口两侧海堤采用坡度较缓的堤头边坡，改善龙口处的水流条件。龙口两侧堤头处预埋配件，以便施工船舶带缆。

### 3.2 堵口方法和顺序

堵口采用平堵和立堵相结合的方法。

#### 3.2.1 缩小堵口宽度，龙口平堵起高

考虑到龙口合龙必须紧密结合气象、潮汐及水位资料，时机选择十分重要，合龙时间紧，强度大，因此需要进行部分合龙施工以减小最终的合龙强度，确保合龙成功率，首先平堵起高，平起至 1.5 m 高程，确保低潮出水面。堤头处尽量抛填较

大的块体，确保其对龙口绕堤流抗冲刷能力。

### 3.2.2 龙口合龙

在龙口平起至 1.5 m 高程后，进行最后的合龙工程，及时进行龙口补全断面施工，并加强龙口断面观测数据分析，密切关注龙口整体稳定性，确保合龙成功，不留隐患。

根据上述龙口合龙方案，并考虑到合龙的历时过程，制定 3 种计算方案：

方案 1：计算护底工程完成后（即抛填龙口段下部结构至 -4 m 高程）流场，分析水流运动特征，分析龙口及周围水流最大流速、流向、平均强度等，提供合龙工程水动力条件。

方案 2：计算龙口平堵起高（即平起至 1.5 m 高程）后流场，分析合龙平堵起高后水流运动特征，分析龙口及周围水流最大流速、流向、平均强度等，提供合龙最终完成的水动力条件。

方案 3：计算龙口部分平堵起高（即龙口一半平起至 1.5 m 高程）后流场，分析合龙平堵起高后水流运动特征，分析龙口及周围水流最大流速、流向、平均强度等，分析合龙过程中的水动力情况。

### 3.3 计算条件的确定

选择合适的代表动力条件，是龙口合龙数模研究的关键。最好选择具有代表性的实测潮位过程为代表动力条件，因为经过验证的模型具有更高的可靠性；在实测资料不具有代表性情况下，可以考虑利用预测潮位作为代表动力条件。本研究采用潮汐预报方法计算工程海域在计划施工期的潮位历时变化，然后利用潮差比选实测数据是否适合作为代表动力条件。

首先说明潮汐预报系统的准确性。图 4 显示了潮汐预报值与实测潮位历时变化的比较，可见本研究所采用预报系统得到的计算值与实测结果较为吻合，能够反映工程海域潮汐的变化规律，潮差、相位等是一致的。说明利用该系统能够合理预测工程海域潮位变化过程。

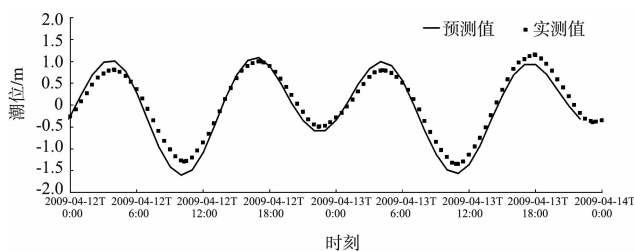


图 4 工程海域预报潮位与实测潮位的比较

利用该系统预报了 2012-10-01—2012-11-15（包含龙口计划合龙期）工程海域潮位变化过程。在计划合龙期内预测的最大潮差约为 2.34 m。2009 年 4 月工程海域实测大潮过程最大潮差为 2.3 m，与预测值接近，两者差异在预测系统误差范围内，可以作为本次合龙的代表动力条件<sup>[5]</sup>。

## 4 结论

1) 根据合龙施工期工程海域潮位预报结果，龙口合龙时期最好选择在潮差较小时段（中、小潮段），此时工程海域潮流整体强度相对较弱。

2) 涨潮至中水位附近时水流强度较大，尤其是平堵起高后，瞬时流速可能高达 5 m/s，因此在分段实施过程中可一次性抬高平堵高度至高潮位以上。

3) 合龙最后时段要尽量避开中潮水位，选择高潮水位或低潮水位时段为宜。

## 参考文献：

- [1] 中交天津航道局有限公司. 华能唐山港曹妃甸港区煤码头造陆工程护岸及临时围埝堤 B 标段施工组织设计[R]. 天津: 中交天津航道局有限公司, 2012.
- [2] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].
- [3] 刘畅. mike3 软件在水温结构模拟中的应用研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2004.
- [4] TJS/T 231-2—2010 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程[S].
- [5] 张娜, 解鸣晓. 华能唐山港曹妃甸港区煤码头工程潮流泥沙数学模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2011.

(本文编辑 武亚庆)