



天津浮式 LNG 码头建设水动力泥沙问题研究

张娜¹, 赵雪夫², 李孟国¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 海军工程设计研究院, 北京 100070)

摘要: 在对天津港海域水文泥沙特征和冲淤演变进行分析的基础上, 采用二维波浪潮流和泥沙数学模型对天津浮式 LNG 码头建设的水动力和泥沙问题进行研究, 对取排水实施前后流场变化、防波堤建设对码头前流场影响进行了计算分析, 同时预报了港池、航道正常年淤强以及一场大风期间淤积厚度, 并通过资料分析得到泄洪排涝对工程区泥沙淤积不会产生明显的影响的结论。

关键词: 天津港; 浮式 LNG 接收终端; 潮流泥沙; 数值模拟

中图分类号: TV 131.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)10-0013-05

On hydrodynamics and sediment for construction of floating LNG terminal in Tianjin

ZHANG Na¹, ZHAO Xue-fu², LI Meng-guo¹

(1. Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China;

2. Navy Institute of Engineering Design & Research, Beijing 100070, China)

Abstract: Based on the analysis of the hydrodynamic sediment conditions and seabed evolution in Tianjin port sea area, we use the mathematical models of wave, tidal current and sediment to study hydrodynamics and sediment problems of floating LNG terminal project. The change of tidal current field before and after the water intake and the influences of the construction of the breakwater on the flow field in front of the wharf are simulated and analyzed. At the same time, the deposition thickness in the harbor and waterway during normal years and a strong wind is given. Based on the data analysis, we can draw the conclusion that flood-releasing and waterlog-draining have no obvious effects on the sedimentation in the project area.

Keywords: Tianjin port; floating LNG terminal; tidal current and sediment; numerical simulation

中海油天津(浮式)LNG接收终端项目位于天津港南疆港区的东南角,新建带气化设施的LNG浮式装置(FSRU)和LNG泊位各1个以及设置工作平台1座。码头长度均为400 m,采用“蝶”形墩台式平面布置形式。工程位置如图1所示。为配合码头工程建设,需要开挖港池和泊位,其开挖后势必会出现一定程度的回淤,同时,为了LNG接收站汽化器供水,还需要考虑取、排水工程,供水水源采用海水,取排水为循环用水,取、排水量相同,近、远期规划取水量分别为60 000 m³/h和100 000 m³/h。一期工程已于2013年底投入运营。作为国内首个浮式LNG项目,天津

LNG项目的建设和平稳运行填补了国内浮式LNG领域的空白。

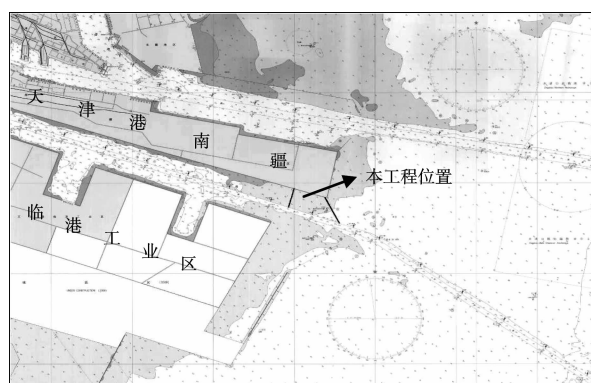


图1 LNG项目工程位置

收稿日期: 2014-03-24

作者简介: 张娜(1979—),女,硕士,副研究员,从事海岸河口水动力泥沙研究。

利用数值模拟方法研究水流和泥沙淤积问题,是目前国内外比较常用的一种方法^[1-3],能为工程的科学决策提供有力的技术支持。本文在对水文泥沙和冲淤演变进行分析的基础上,采用二维波浪潮流和泥沙数学模型,对浮式 LNG 项目建设过程中涉及的取水对水动力影响、港池、取水口淤积等问题进行了研究,为工程设计实施以及通航安全影响提供数据支持。

1 工程周边海域水动力及泥沙环境

1.1 风和波浪

该海区常风向为 SW,其次为 SE;强风向为 NW,次强风向为 E。多年平均风速为 5.33 m/s。

工程海区的波浪由纯风浪(占 74.2%)和混合浪(占 24.9%)组成,纯涌浪(占 0.9%)较少。这表明了本地的大风是产生大波浪的主要因素。本区的强、常浪向主要来自 E 向,而且本区的波浪属弱浪区,据统计 $H_{1/10} < 1.0$ m 的波浪约占 87.6%,而 $H_{1/10} \geq 1.0$ m 以上的波浪占 12.4%,其中 $H_{1/10} \geq 2.0$ m 以上的占 1.9%, $H_{1/10} \geq 3.0$ m 以上的占 0.4%。波浪与季节相关,春季风浪最强,秋季次之,夏季为弱浪季,偶而也受到台风浪的影响。

1.2 潮汐和潮流

本工程海域为不规则半日潮,平均潮差为 2.28 m;最大潮差为 4.31 m。潮流为不规则半日潮流,工程区基本呈 WNW ~ ESE 向往复流性质。-5 m 等深线以内,受水深地形等影响流向比较分散;该海区潮流动力相对较弱,实测大、中、小潮潮段平均流速一般小于 0.3 m/s。

1.3 含沙量

工程海区小风天的含沙量总体较低,基本在 0.10 kg/m^3 以内。较高含沙量主要是在 -5 m 等深线以内的近岸水域,也是在波浪破波带之内,而向外由于水深的增加导致风浪对床面的作用减小,而使含沙量变化较小。

1.4 底质

本港海区滩面泥沙属于黏土质粉沙,颗粒很细,平均中值粒径约为 0.008 2 mm。其中沙约占

9.4%,粉沙质约占 51.9%,黏土约占 38.7%,其粘结性较强。

1.5 泥沙来源及运移形态

海河口建闸后,入海泥沙大幅度减少,特别是 20 世纪 70 年代以来,入海泥沙几乎为零。目前造成海河口淤积的泥沙来源主要是河口外滩地泥沙的局部搬运。近年来海河口附近兴建了大量的围垦工程,使近岸浅滩范围大大减小,也使该水域波浪作用下悬浮泥沙量减少,也在一定程度上阻隔了围垦以外泥沙向河道内运移,总体改善了河口及下游水域的泥沙环境。

1.6 河口岸滩演变趋势

海河口建闸后,干流来水来沙的影响减弱,河口区在潮汐动力作用下发生淤积。从 1995—2000 年河口累积清淤量约为 800 万 m^3 。2000 年以后闸下河道已未见累积性淤积^[4],滩面有逐年降低的趋势。这主要是由于河口两岸围海造陆工程不断开展,破坏了通道内及河口区海滩自然演变,使泥沙运行规律和淤积特性发生了重大变化,大大减少了闸下泥沙淤积。

2 数学模型的建立与验证

2.1 模型组成

工程所在海域泥沙运动的特点主要是“风浪掀沙、潮流输沙”,因此在进行数学模型的建立时,针对工程所在海域的特点,建立了适用于该海域的二维波浪、潮流和泥沙数学模型,充分考虑风浪对泥沙运动的影响。其中,波浪计算采用 SWAN 风浪模型^[5],潮流计算采用 MIKE 21FM 模型^[6-7]。工程海域泥沙运动以悬移质为主,因此采用建立在对流扩散方程基础上的悬沙运动方程来解决淤泥质海岸泥沙问题。

平面二维悬沙输移扩散方程:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(hSu)}{\partial x} + \frac{\partial(hSv)}{\partial y} = -F_s + \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中: C 为垂线平均含沙量; D_x 和 D_y 分别为 x 和 y 方向的泥沙扩散系数; F_s 为泥沙冲淤函数。

床面冲淤变化方程可由下式表示:

$$\rho_d g \frac{\partial \eta_b}{\partial t} - F_s = 0 \quad (2)$$

式中: ρ_d 为床沙干密度; η_b 为海底床面的竖向位移 (即冲淤变化量)。

底部冲淤函数 F_s 与底部剪切应力及泥沙特征有关:

$$F_s = \begin{cases} \omega_s C \left(1 - \frac{\tau}{\tau_d} \right) & \tau \leq \tau_d \\ 0 & \tau_d < \tau < \tau_e \\ -M \left(\frac{\tau}{\tau_e} - 1 \right) & \tau \geq \tau_e \end{cases} \quad (3)$$

式中: τ 为水流底部剪切应力; τ_d 为临界淤积切应力; τ_e 为临界冲刷切应力; M 为冲刷系数; ω_s 为泥沙絮凝沉降速度。

为避免边界处的数值传入误差, 模型采用大、小两层嵌套形式计算。大尺度模型计算范围为整个渤海区域, 可为小模型提供潮位边界条件; 小模型范围为渤海湾海域。计算域剖分采用无结构三角形网格。

2.2 模型验证

采用 2006 年 6—7 月大、中、小潮和 2008 年 8 月大、小潮现场水文和含沙量资料进行潮位、流速、流向和含沙量的验证。地形回淤采用 2011 年 5 月—11 月期间大沽沙航道回淤资料进行验证。现场回淤分析报告^[8]显示, 大沽沙航道淤积区主要集中在口门 12+0~15+0 段, 16+0 以外航道没有淤积或是呈略有冲刷趋势。回淤验证结果见图 2。

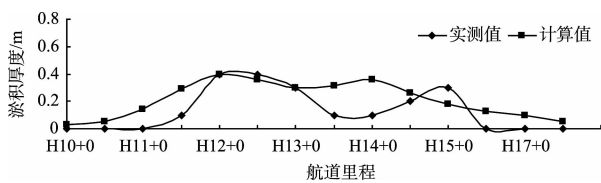


图 2 大沽沙航道地形淤积验证曲线 (2011-05—2011-11)

3 水动力试验成果分析

3.1 取、排水影响分析

以不考虑取排水、取排水流量为 60 000 m³/h 和取排水流量为 100 000 m³/h 共 3 种工况为例,

分析取排水工程对码头附近流场的影响。将取排水工程实施前后在落憩时刻的流速进行对比, 图 3 为取排水流量为 100 000 m³/h 时在落憩时刻的流速与不取水时流速的对比。

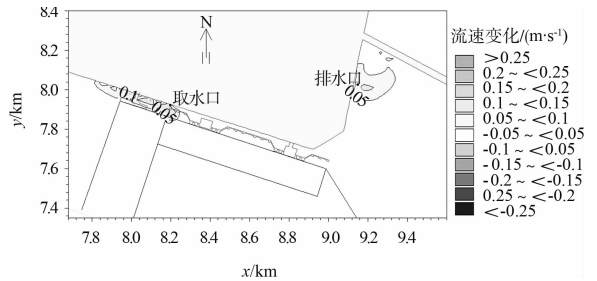


图 3 大潮落憩时刻流速变化

结果表明: 1) 拟建码头附近水流较弱, 涨落潮流速都小于 0.3 m/s, 尤其是码头前流速, 在 0.20 m/s 以内。2) 取、排水情况下, 落憩时刻流速变化范围很小, 只是在取、排水口局部很小的范围内流速有所增加, 基本不会影响码头泊位和港池等开挖水域。3) 流量为 100 000 m³/h 情况下, 流速变化范围要略大于 60 000 m³/h 流量下的流速变化范围, 但两者相差不大, 码头和航道内流速变化幅度都在 0.05 m/s 以内。该流速数值的变化, 对船舶靠泊影响不大。

3.2 码头及航道横流

工程实施后, 码头前涨落潮水流基本是平顺的, 与码头面基本平行, 流速矢量见图 4。在码头前以及航道内布置流速特征点, 对各特征点横流进行分析, 结果表明: LNG 码头实施后码头前横流较小, 在 0.10 m/s 以内; 航道内横流也不大, 最大横流为 0.21 m/s, 位于口门附近, 对船舶进出港不会产生明显的不利影响。

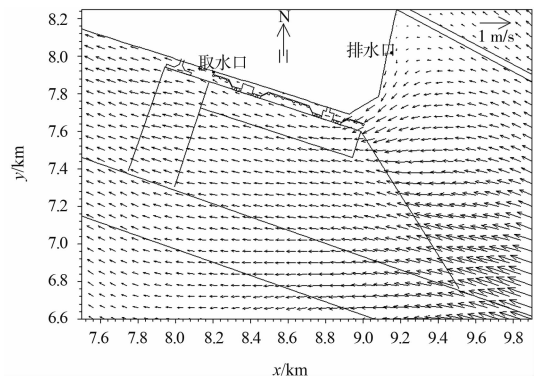


图 4 码头前涨急时刻流速矢量

3.3 不同防波堤建设阶段对码头流场影响

拟建 LNG 码头位于南疆南岸临港工业区口门内。临港工业区防波堤设计为一段出水堤加一段平行于航道的潜堤，长度为 2 350 m，堤顶高程为 2.5 m。出水堤建设与 LNG 码头几乎同时进行，但潜堤的建设将在 LNG 码头完工后。因此，在考虑 LNG 码头建设时对不同防波堤建设条件下的流场进行模拟。图 5 为不同防波堤建设阶段的工程海域流场。

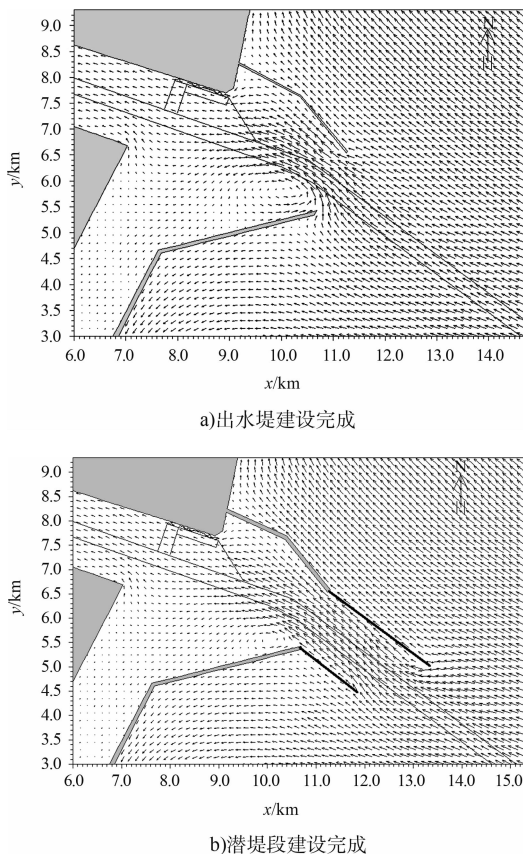


图 5 不同防波堤建设条件下涨急时刻流速矢量

出水堤建成后，涨潮时，水流从口门进入港内，受南防波堤挑流影响，在防波堤内侧形成一个小的逆时针环流，随涨潮进行，环流范围逐渐增大，涨急时刻，环流中心位于航道南侧，到涨憩时，环流范围达到最大，覆盖了口门到外港池西侧边界，此时的环流中心已位于航道内。整个环流靠航道一侧流速较大，涨急时，环流强度约 0.6 m/s；高潮位时，环流强度约 0.4 m/s。落潮时，回流逐渐消散，到落急时刻，环流已基本消失。从流速数值来看，口门附近流速可以达到 0.8 m/s。

潜堤建成后，潜堤段涨落潮水流更加平顺，

潜堤内水流流态相差不大，涨潮期间依然会产生环流，环流的最大范围与只建设出水堤时相差不大，环流的强度有所降低。潜堤建成后，潜堤段流速有所增加，而潜堤以里，流速有所减小。潜堤段涨急时刻流速在 0.60 ~ 0.80 m/s，落急时刻流速在 0.40 ~ 0.50 m/s。

可见，防波堤建设对码头前水域流态影响较小，随着防波堤建设长度增加，码头前流速会略有减小，但减小幅度不大。

4 港池和航道回淤分析

4.1 正常年回淤

利用验证好的泥沙运动数学模型对工程实施后港池和航道的回淤进行了模拟。由取、排水流量不同造成的港内淤积变化很小，对于泥沙淤积量级而言，可以忽略不计。这里只对不同防波堤建设情况下，拟建港池、航道内的年回淤进行计算分析。结果显示：

1) 出水堤建设后，航道内淤积范围主要集中在 11 + 0 ~ 14 + 5 以内，最大淤强位于 13 + 0，11 + 0 以里和 14 + 5 以外淤积很小，航道平均淤强为 0.35 m/a，最大淤强为 0.68 m/a；潜堤建设后，口门外移，进港含沙量会进一步降低，其淤积范围略有外移，淤积强度略有减小，主要集中在 12 + 0 ~ 15 + 0 内，最大淤强位于 13 + 5，航道平均淤强为 0.30 m/a，最大淤强为 0.62 m/a。

2) 港池淤积分布呈现靠航道一侧淤积较重，从航道向码头淤强逐渐减小的趋势。LNG 码头泊位水域和港池内淤强大于工作船码头的淤强。出水堤建设后港池平均淤强为 0.44 m/a，最大淤强为 0.61 m/a，潜堤建设后港池平均淤强为 0.35 m/a，最大淤强为 0.54 m/a。不同取水流量情况下，取水口前淤积略有不同，但差别不大。总的来说，取水口淤强不大，最大淤强为 0.10 m/a。

出水堤建设后，港池淤积量为 39.5 万 m^3 ，航道淤积量为 113.8 万 m^3 ，全港淤积量为 153.3 万 m^3 ；潜堤建设后，淤积有所减少，港池淤积量为 31.5 万 m^3 ，航道淤积量为 97.2 万 m^3 ，全港淤积量为 128.7 万 m^3 。

4.2 大风期间骤淤

2003年10月10日—13日,渤海湾海域发生了一次东北~东向大风过程。这次北方大风为历史罕见,不仅风级大,而且历时久,对湾内港口产生了巨大影响,使天津港出现了一定程度的强淤现象,航道最大淤厚将近50 cm。本次骤淤计算以2003年10月这场大风为代表风场,对拟建港池和航道的骤淤情况进行预测。

经计算,2003年10月10日大风作用下,港池淤积厚度约为0.10~0.34 m,平均淤积厚度约为0.24 m。航道内最大淤积厚度为0.40 m,10+0~16+0段平均淤积厚度为0.20 m。总体来说,在类似2003年10月10日NE向大风作用下,拟建港池和大沽沙航道最大淤厚不会超过0.40 m,对船舶航行不会造成很大影响。

4.3 海河行洪排涝对本工程泥沙淤积的影响分析

1958年河口修建挡潮闸后,入海径流大幅度减少。因此,河口动力条件发生重大改变,海相泥沙造成了闸下严重淤积,闸下11 km主槽产生累积性淤积,经过建闸初期2~3 a的骤淤及以后长时期的缓慢淤积,到2003年闸下4 km以外的滩槽已趋于稳定,闸下4.0 km以里主槽清淤量达到100万m³左右,可使清淤和回淤基本处于动态平衡状态。

20世纪70年代以来,海河口入海泥沙几乎为零。海河行洪排涝对本工程泥沙淤积的影响主要体现在泄洪时冲刷上游河道,冲刷的泥沙进入下游港池航道落淤,同时潮流作用下海相淤积在通道内的泥沙在泄流过程中被带到下游,引起工程区泥沙淤积。海河口每年都进行清淤工程,而且由于港口需要,河道内大部分水深都已经开挖至-13~-20 m,即使河口泄洪造成局部冲刷,能冲起的泥沙的量也是非常有限的,而且本次LNG工程距离闸下14 km之远,上游来沙运移至此的可能性不大,总体分析,泄洪排涝对工程区不会造成直接影响。

通过长期水深监测可知,自从2006年大沽沙航道开挖之初至今,海河口出现过多次的泄洪或排涝过程,但是并没有给航道或河道内造成明显的淤积。从2011年5月—11月水深变化来看,港内淤

积部位主要集中在12+0~15+0段,10+0以内淤积基本为零,可以分析出该淤积主要是由于口门外悬沙落淤造成的,即使上游泄洪会挟带海相落淤的泥沙,这部分沙源也是非常有限的。

综合分析可知,泄洪排涝对工程区泥沙淤积不会产生明显的影响。

5 结论

1) 工程实施后,码头前横流和航道内横流都不大,码头前横流在0.10 m/s以内,航道内最大横流为0.21 m/s,而且取、排水流量不同,对工程海域流场影响很小,码头和航道内流速变化幅度在0.05 m/s以内,对船舶进出港以及停泊影响不大。

2) 出水堤和潜堤建设完成后,港池年淤强分别为0.44 m/a和0.35 m/a,局部最大淤强分别为0.61 m/a和0.54 m/a。

3) 不同取水流量对取水口淤积影响不大,取水口淤积淤强在0.10 m/a以内。

4) 在大风作用下,港池内最大淤厚为0.40 m,不会出现骤淤碍航现象。

5) 泄洪排涝对工程区泥沙淤积不会产生明显的影响。

参考文献:

- [1] 李孟国,李文丹,时钟,等.田湾核电站海域潮流泥沙数值模拟研究[J].泥沙研究,2008(2):16-23.
- [2] 陆海建.二维风浪潮流泥沙数学模型在天津港新建滚装码头工程中的应用[D].天津:天津大学,2010.
- [3] 许婷,孙连成,李铁良.天津港国际邮轮码头工程泥沙数模试验研究[J].水道港口,2008,29(2):100-105.
- [4] 孙林云,孙波.海河口治导线延伸及边界固化方案论证报告[R].南京:南京水利科学研究院河港研究所,2009.
- [5] Booij N, Holthuijsen L H, Ris R C. The "SWAN" wave model for shallow water[J]. Coastal Engineering, 1996(1): 668-672.
- [6] 冯静. MIKE21FM数值模型在海洋工程环境影响评价中的应用研究[D].青岛:中国海洋大学,2011.
- [7] 陈雪峰,王桂莹. MIKE 21 计算软件及其在长兴岛海域改造工程上的应用[J]. 大连大学学报, 2007, 28(6): 93-98.
- [8] 庞启秀. 天津临港工业区港池航道泥沙回淤监测及分析[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)