



强浪条件下半掩护港区波浪场数值模拟

黄涛¹, 黄睿奕^{2,3,4}, 邓波⁵, 仇正中^{2,3,4}

(1. 中交二航局第二工程有限公司, 重庆 401121; 2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;

3. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430014; 4. 公路长大桥梁建设国家工程研究中心, 湖北 武汉 430014;

5. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100028)

摘要: 以以色列南部新建 Ashdod 码头为工程背景, 在分析港区自然条件的基础上, 利用二维河口与海岸模拟软件 MIKE21, 建立了基础方案各个施工阶段港内泊稳模型。通过对不同施工阶段下半掩护港区波浪场进行数值模拟分析, 掌握了港内波浪场的分布情况, 确定港内正常施工时防波堤口门处的容许波浪要素。根据防波堤口门处的波浪统计资料, 得到港区不同区域的最大作业波高标准以及港区不同区域不同施工阶段下全年不可作业的天数。研究结果为工期的合理安排和作业窗口的确定提供依据, 并提出了科学合理的施工工序建议。

关键词: 强浪; 半掩护区; 波浪场; 数值模拟; MIKE21

中图分类号: TV 139.2⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)08-0006-06

Numerical analysis of wave field in semi-shielded harbor area under wave attack

HUANG Tao¹, HUANG Rui-yi^{2,3,4}, DENG Bo⁵, QIU Zheng-zhong^{2,3,4}

(1. The Second Construction Company of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd, Chongqing 401121, China;

2. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

3. Key Lab of Large-Span Bridge Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Wuhan 430014, China;

4. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre Ltd., Wuhan 430014, China;

5. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: Based on the analysis of natural conditions and boundaries, numerical model of wave field of each construction phase was set up using MIKE21 wave stimulation model on the background of Ashdod port project. The wave propagation within the harbor was obtained by numerical analysis under different construction stages along with the results of the maximum working wave heights and unavailable working days. Reasonable schedule of construction was made and working window was selected according to the results. Moreover, this paper provides a scientific and reasonable construction procedure for the Ashdod port project.

Keywords: strong wave; semi-shielded; wave field; numerical simulation; MIKE21

1 工程背景

随着海外市场的不断拓展, 港口工程建设区域不断扩大。一方面, 由于港址从自然条件良好的天然海湾逐渐向外海转移; 另一方面, 有些港口工程建设区域往往位于强浪海域, 由于水深增大和波浪条件恶化, 防波堤施工进度滞后, 半掩护或者无遮挡港区码头施工得到越来越多的重视和研究。由于

经济和社会的发展需要, 以色列 Ashdod 港正处于大规模的扩建之中, 工程平面布置见图 1。港口所在区域属于地中海季风气候, 常年受季风期波浪影响, 外海涌浪较多, 施工环境恶劣^[1]。

在工可阶段业主委托荷兰 DHV 公司、加拿大 CHC 咨询公司进行了大量的数值模拟和物理模型试验, 得到了很多结论性的意见和建议, 对 Ashdod

收稿日期: 2015-05-28

作者简介: 黄涛 (1973—), 男, 高级工程师, 从事路桥施工管理及港口码头施工管理工作。

港区码头的设计和施工起到重要的借鉴意义。然而,前期的数值模拟与现阶段确定的具体施工情况并不匹配。现阶段,港内施工面广、各工序之间相互交叉,施工区域波浪场分布与各分、子工程的进度密切相关,有必要根据最新的施工情况重新对整个港区进行波浪场计算和工序优化分析。由于复杂多变的强涌浪环境对施工船舶的稳定性威胁较大,针对以色列 Ashdod 港区波浪场进行分析研究,能有效保障施工作业安全。并且,根据波浪场数值模拟结果,可以更加合理地安排主防波堤和 Lee 护岸防波堤的施工进度,使码头区域具有相对更好的掩护和施工波浪条件、更长的施工有效时间。同时,可以根据现有的波浪资料,校核优化施工工期,对于节省工期和节约成本有重要的参考价值。

本文在分析港区自然条件的基础上,利用二维河口与海岸模拟软件 MIKE21,建立基础方案港内泊稳模型,通过对半掩护港区波浪场进行数值模拟分析,来判断不同施工阶段下的波浪条件是否满足预期泊稳要求,并推算各码头不可作业的天数。



图1 工程平面布置

2 自然条件

2.1 风

通过气象资料调查, Ashdod 地区最大风速为 16~18 m/s, 80% 时间风速都低于 6 m/s (3~4 级风), 只有 1% 时间风速超过 10 m/s (5 级风), 暴风在该地区并不常见, 且风向在 W~N 向之间居多。

2.2 波浪

Hadarom 港区海浪主要由中长周期波组成, 涌浪作用比较明显。根据现场 1992—2011 年极端波浪 (波高 3.5 m 以上) 统计数据显示, 涌浪现象均出现在冬季。通过统计分析 2000-04—2010-03 共 10 a 的波浪观测资料^[2], 绘制了如图 2 所示的波浪玫瑰图。通过夏冬两季波高玫瑰图的对比可知, 冬季波浪条件较夏季更为恶劣。图 2 显示主浪向为 WNW, 次浪向为 W 和 NW。

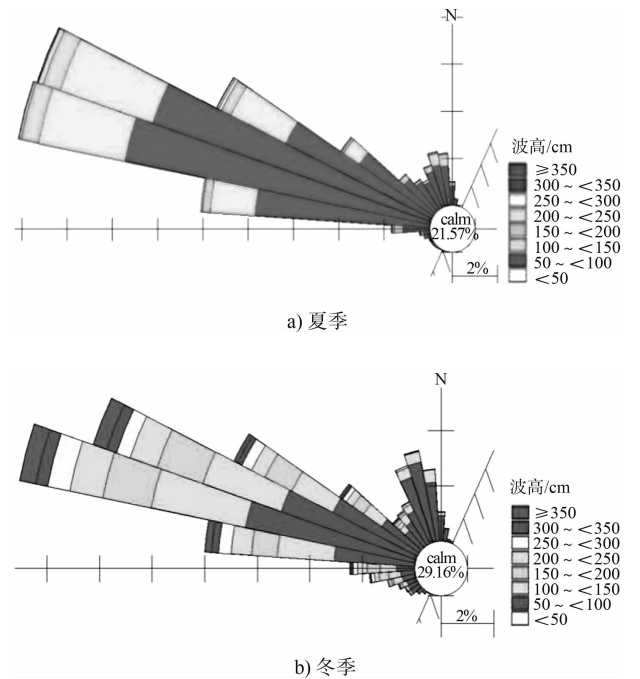


图2 波高玫瑰图

2.3 潮汐

港区所在的东地中海海区的潮汐类型为半日潮, 即 1 d 之中有 2 个高潮和 2 个低潮。该海区潮差相对较小, 一般在 0.5~1 m。在模型中的基准面关系为以色列测量基面 (Israel Land Survey Datum), $ILSD = 0.22 \text{ m CD}$ 。Ashdod 港的潮汐特征值为: 大潮高潮位 0.38 m, 平均海平面 0.08 m, 大潮低潮位 -0.22 m。

3 建立模型及波浪模拟

3.1 MIKE21 BW 模块

MIKE21BW 模型是建立在 Boussinesq 方程基础上, 主要用于港口、海岸地区的波浪扰动情况

的分析和研究,可以模拟绝大部分波浪现象的组合作用,如波浪的绕射、反射、折射、浅水变形等。通过重现港口、海岸工程的波浪组合影响,研究与分析港口及沿海地区的波浪场分布,在各国波浪数学模型试验中已有十分广泛的应用。

该模型通过求解沿垂向积分的 Boussinesq 方程获得沿水深平均的流速、水位变化以及波高等物理量^[3]。其控制方程为连续方程,可表示为:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x 方向动量方程:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g}{c^2} \frac{\sqrt{\frac{p^2}{h^2} + \frac{q^2}{h^2}} \cdot \frac{p}{h}}{c^2} - E \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{3} Dh \left(\frac{\partial^3 p}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 q}{\partial x \partial y \partial t} \right) \quad (2)$$

y 方向动量方程:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{g}{c^2} \frac{\sqrt{\frac{p^2}{h^2} + \frac{q^2}{h^2}} \cdot \frac{q}{h}}{c^2} - E \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{3} Dh \left(\frac{\partial^3 q}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 p}{\partial x \partial y \partial t} \right) \quad (3)$$

式中: x 、 y 为水平坐标 (m); t 为时间 (s); ξ 为高出平均水位的水面高度 (m); p 、 q 为 x 、 y 方向流量密度; h 为水深 (m); D 为平均水深 (m); c 为谢才阻力系数; M 为曼宁系数; E 为紊动“涡黏”系数; g 为重力加速度。

3.2 模型搭建

利用二维河口与海岸模拟软件 MIKE21 中的 BW 模块,通过建立基础方案港内泊稳模型,并确定波浪边界条件、地形、波浪吸收层和反射层等波浪模型的设置,在此基础上,使用已有的物理模型数据对波浪模型进行率定,确保模型的可靠性。

通过原始地形数据的内插得到地形模型,由模型水深和波浪条件决定最大网格尺寸,模型网格尺寸是 5 m。模型中除港口外的其它边界均作为波浪吸收边界。根据目前波浪条件和防波堤、护坡结构物,估算反射系数为 40% ~ 90%,模型中

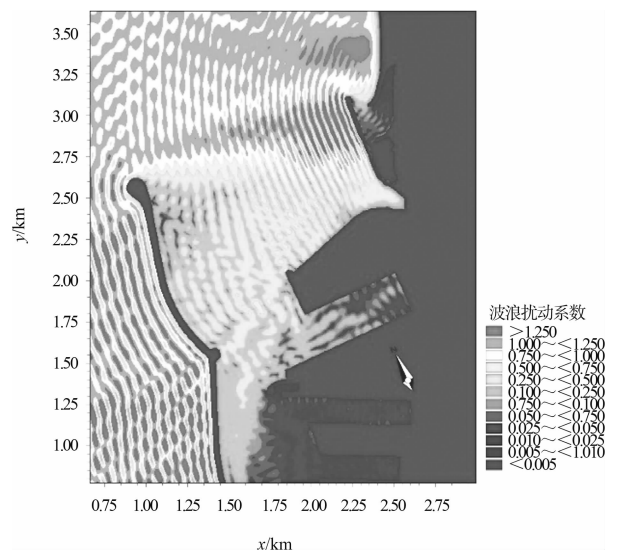
的反射性是由孔隙层来表现的。在造波中使用 JONSWAP 谱,谱型参数为: $r_a = 2.8$, $\sigma_a = 0.07$, $\sigma_b = 0.09$ 。考虑到 BW 模型不考虑风的能量输入,模型在搭建过程中忽略了底部阻力,这对港内波浪结果是偏于保守的。图 3 为 Ashdod 港三维地形图。



图 3 Ashdod 港三维地形

3.3 模型率定

结合港区项目施工方案,利用建立的数值模型,模拟了入射波向为 270°、295°、315°、330°,周期为 8、10、12 s,入射波高为 1 m 下的波浪。图 4 是入射波为 295°方向、周期为 10 s、波高 1 m 的 MIKE21 数模结果。鉴于加拿大 CHC 咨询公司进行过 Ashdod 港的物理波浪模型试验^[4],将其实测的波浪数据作为数学模型的率定资料,通过对数学模型与物理模型的波浪场分布,吻合较好,验证了研究中所建立数学模型的可靠性。



注: 单向规则波,入射波高 $H_s = 1$ m, $T_p = 10$ s, 平均波向为 WNW。

图 4 MIKE 21 BW 结果

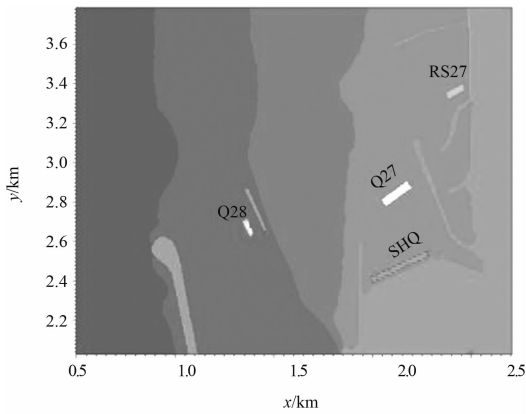
4 计算结果

结合实际工程方案, 根据 Q28 沉箱和护岸防波堤 LB 以及 MB 的进度, 共进行了表 1 所示的

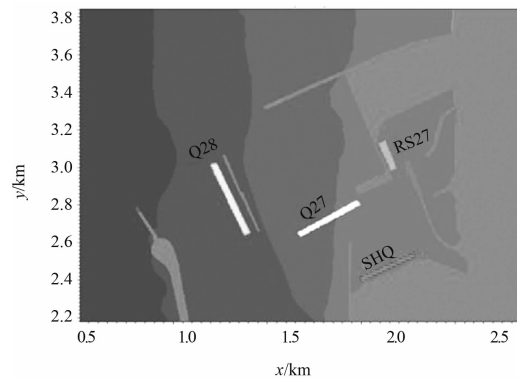
7 个工况下的波浪数值分析与计算。图 5 为 3 个典型工况下搭建的数值模型。

表 1 施工阶段 7 个工况各分项工程推进长度

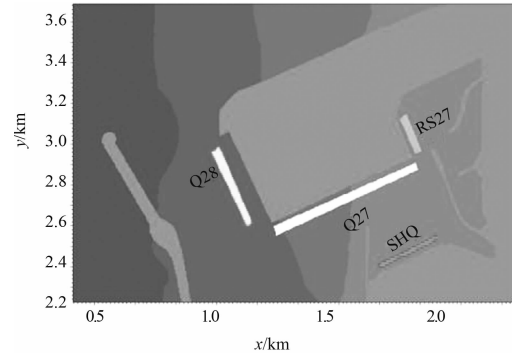
施工阶段	Q28-沉箱	Q28-桩基	RS27	SHQ	Q27	MB	LB	吹填
1	225	140		363			230	
2	450	270	150	363		360	70	
3	450	390	570	363		50	500	235
4	450	450	770	363	200	150	1 000	540
5	450	450	770	363	670	300	1 290	810
6	450	450	770	363	800	380	1 480	920
最终	450	450	770	363	800	550	1 480	



a) 施工阶段1



b) 施工阶段4



c) 最终阶段

图 5 3 个典型工况下搭建的数值模型

4.1 不可作业天数

通过对各阶段波浪场的模拟得到各区域波高, 根据边界条件和线性波理论, 得到口门处容许波高。最后通过口门处容许波高和年波浪累计频率统计出不可作业天数, 表 2 为港区不同区域不可作业的最大作业波高标准。表 3 为港区不同区域不同施工阶段下全年不可作业的天数。

表 2 港区各区域作业标准

位置	SHQ 码头	RS27 码头	Q27 码头	Q28 码头
最大作业波高/m	0.5	1	1	1

表 3 全年不可作业天数

施工阶段	SHQ 码头	RS27 码头	Q27 码头	Q28 码头
1	73.3		32.1	83.6
2	11.0	73.6	19.8	91.2
3	7.3	28.3	5.8	98.3
4	11.0		16.3	81.2
5			5.8	77.4
6				36.5
最终				24.5

注: 表中无数据的部分表示全年都可施工。

提取 Q28 与 Q27 交汇处、RS27 与 Q27 交汇处的容许作业波高, 并整合到各个浪向下。将其分别与夏季和冬季的波浪累计频率对比, 得到夏季与冬季的不可作业天数。由图 6 可知, 夏季波浪条件优于冬季。冬季有几乎 2 倍于夏季的不可作业天数, 以施工阶段 3 位置 Q28 与 Q27 交汇处为例, 冬季不可作业天数为 21.6 d, 而夏季为 11.2 d。

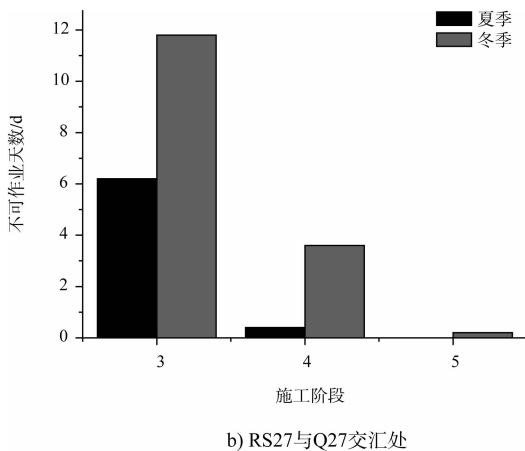
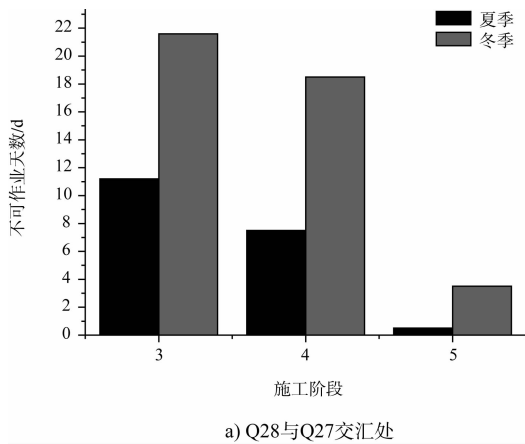


图6 不可作业天数

4.2 港内波浪场分布

港区内波浪的折射、反射、绕射相互作用相互影响，此时使用波浪扰动系数来表征这一综合作用。根据扰动系数的分布情况，判断港区内波高大小，更直观地模拟出施工各个阶段结构物对港内波浪场的影响。图7为施工阶段3在330°浪向下、施工阶段4在315°浪向下、施工阶段5在295°浪向下的波浪场分布。

从图7可以看出：1) 施工阶段3中Q28的沉箱已施工完成，对SHQ码头能够提供一定程度的掩护。330°浪向下，由于LEE防波堤还未形成，港区内掩护较差，RS码头和Q27码头的施工受到影响。Q28沉箱前波浪反射，Q28南端绕射，使得Q28施工条件最为恶劣。2) 施工阶段4主防波堤开始推进，因此当入射波向为270°时，可以为港内提供小范围掩护。而当入射波向为315°时，该浪向正好穿过LEE防波堤与沉箱间的口门，直

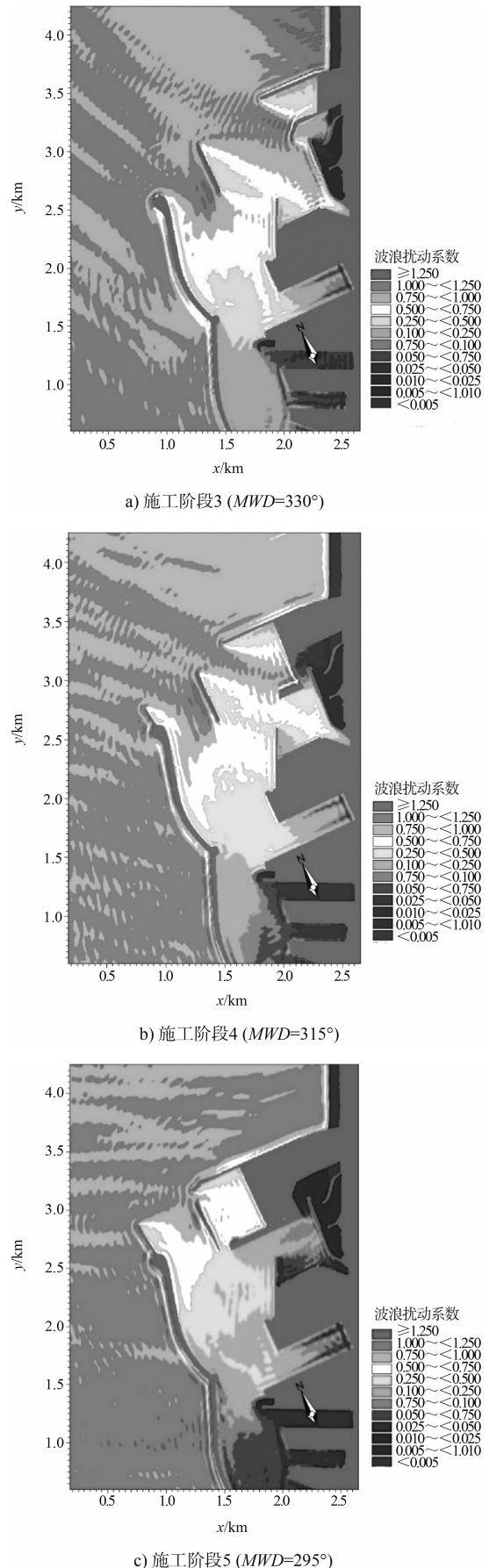


图7 波浪扰动 ($H_s = 1\text{ m}$, $T_p = 10\text{ s}$)

射 RS 码头与 Q27 交汇处, 并产生波浪反射, 波高比值超过 1.25。3) 施工阶段 5 中 LEE 防波堤与 Q28 还未合龙, 吹填也未跟上 Q27 推进速度。在 295° 入射波向下, Q27 内侧形成波浪反射, 波高增强。此时, 在 Q27 锚定板桩打入后码头内部还未回填前, 板桩自身完全暴露在波浪作用下, 施工条件严峻。

图 8 绘制了 295° 浪向下 (10 s 周期), 各个区域在 7 个施工阶段下的波浪扰动系数。Q28 作为港区内最外侧的结构物, 受到的波浪扰动在整个过程中都大于其他区域。后期由于主防波堤的形成, 对其提供掩护作用, 波浪扰动也相对减小。RS27 与 Q27 也是在施工初期 LEE 防波堤还未形成时, 港内波浪扰动明显。特别是 RS27 阶段 2、3 时, 这是由于 RS 已推进到折角区域, 在此处波能集中。SHQ 的波浪扰动相对其他区域来说, 其值较小。

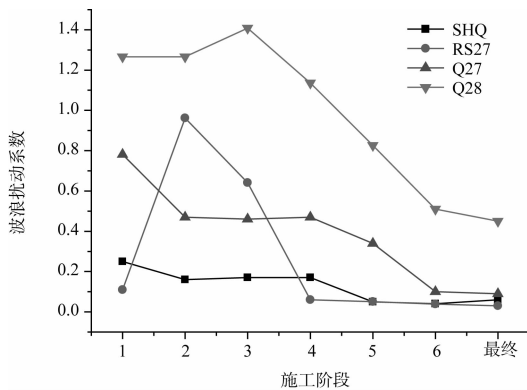


图 8 不同码头区域在各施工阶段的波浪扰动系数

5 结论

1) 根据码头作业容许波要素确定施工期防波堤口门处容许波浪要素, 通过外海波浪统计数据, 确定出全年不可作业天数。可在此基础上合理安排工期和作业窗口。

2) 冬季波浪条件较夏季更为恶劣。一些关键施工工序, 如 Q28 码头与 Q27 码头交汇处钢板桩施工、RS27 挡土墙与 Q27 码头交汇处钢板桩施工应尽量安排在夏季, 即每年的 4—10 月。

3) Q28 码头的沉箱为直立堤, 反射较大, 将会影响港内通航。沉箱安装完成应及时进行 Q28 码头前沿斜坡堤施工, 减小波浪反射。

4) 钢板桩的施工和放置应避免可能出现较大波浪情况的月份, 避免钢板桩长时间出现较大位移, 进而发生疲劳破坏。

5) Q28 码头与 Q27 码头交汇处波浪反射集中, 施工条件差。该处钢板桩施工受主防波堤堤长影响较大, 故工期安排尽可能靠后。同理, RS27 挡土墙与 Q27 码头交汇处波能集中, 如没有一定掩护作用, 对钢板桩施工不利。该处施工可以放置一段时间, 等 LEE 防波堤施工完成后再进行施工。

6) 在分析港区自然条件的基础上, 结合港区实际施工方案, 建立了施工期港内泊稳模型。通过对不同施工阶段下港区波浪场进行数值模拟分析, 掌握了港内波浪场的分布情况。根据各施工阶段波浪场的分布规律, 得到不同施工阶段波高作业标准及可作业天数情况。给以色列 Ashdod 码头项目及防波堤工程实践提供科学合理的施工建议, 为施工工序的优化提供依据, 降低施工风险, 提高施工效率, 以确保项目安全可靠完成。

参考文献:

- [1] Israel Ports Company. Container terminal Ashdod: Boundary conditions and design criteria [R]. Haifa: Israel Ports Company, 2009.
- [2] Israel Ports Company. Hydraulic conditions: New container terminal Ashdod port[R]. Haifa: Israel Ports Company, 2012.
- [3] Danish Hydraulic Institute. MIKE21 User Manual: Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation [M]. Denmark: DHI Water & Environment, 2009.
- [4] Israel Ports Company. Numerical wave penetration modelling Mike Boussinesq: New container terminal Ashdod port [R]. Haifa: Israel Ports Company, 2010.

(本文编辑 武亚庆)