



港口平面布置对港内波况的影响

翟法, 冯卫兵

(河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要: 开展葫芦岛港绥中港区波浪整体模型试验并运用改进的 Boussinesq 方程模拟了不同平面布置方案港内波高情况, 探讨了防波堤结构形式、口门方向、口门宽度、航道和港池边界结构对港内波高的影响。结果表明从上述影响因素出发, 合理地选取港口平面布置形式可以有效地减少港内波高, 为港口总平面规划的优化提供了科学依据。此外探讨了物模与数模的局限性, 给出了结合两者研究港口规划的思路。

关键词: 正态物理模型试验; 港口平面布置; Boussinesq 方程; 数值模拟

中图分类号: U 652.7⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)02-0054-06

Influence of harbor layout schemes upon wave conditions inside harbor

ZHAI Fa, FENG Wei-bing

(Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A three-dimensional model test about Suizhong district of Huludao harbor is conducted and the enhanced Boussinesq equations are used to simulate the wave conditions of different layout schemes in the harbor. Influences of breakwater's structure type, breakwater gap's direction and width, the channel, and structures of the harbor boundaries are studied. The results show that selecting proper harbor layout types will diminish the wave height in harbor effectively and provide a scientific guidance for the optimization of general harbor layout planning. Besides, the limitations of physical model test and math model test are discussed to provide a method of combining both to research harbor planning.

Keywords: normal physical model test; harbor layout; Boussinesq equations; numerical simulation

近岸波浪的传播变形非常复杂。随着水深变浅, 若波向与海底等深线斜交, 波浪发生折射。在海湾处将发生辐散, 波浪变弱并导致泥沙淤积; 在海岬或岛屿处会发生辐聚, 波浪变强并引起冲刷。波浪遇到岛屿或者建筑物时, 会发生绕射现象。同时浅水区域还会发生浅水变形、波浪破碎和增减水等。随着船舶的大型化, 新建港区多需开挖人工航道。航道开挖改变了天然地形, 对于

波浪传播有着很大的影响。为确保船舶安全进出港和码头正常作业, 常常需要建设防波堤来掩护海港水域。港口的平面结构对近岸波浪传播的影响是多方面的。本文根据葫芦岛港绥中港区的物理模型试验, 结合改进的 Boussinesq 方程构建了相应的数学模型, 探讨了港口的双突堤结构形式、口门方向和宽度、航道以及港内码头岸线结构形式对港内波高的影响。

收稿日期: 2015-07-15

作者简介: 翟法 (1991—), 男, 硕士研究生, 从事海岸海洋环境动力与灾害研究。

1 模型概况

1.1 工程概况

港区位于绥中县境内石河口附近, 处于渤海湾内辽东湾西北岸, 港区由东西防波堤环抱而成, 东西防波堤在 -13.5 m 等深线附近形成口门。港内由两个港池和一个突堤组成。工程规划区域见图 1。

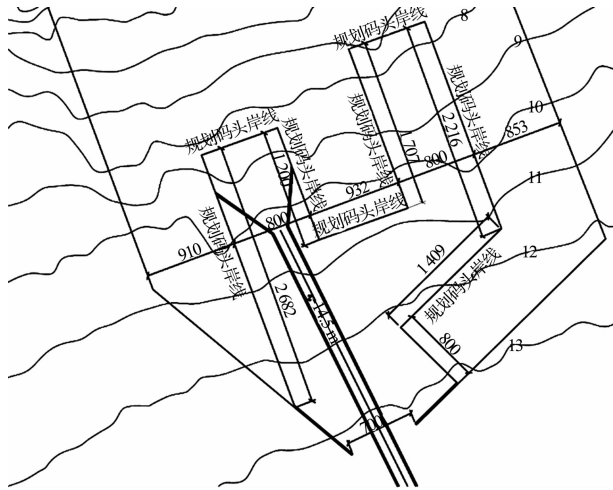


图1 葫芦岛港绥中港区规划岸线 (单位: m)

1.2 物理模型

本试验为葫芦岛港绥中港区波浪整体模型试验, 依照《波浪模型试验规程》^[1], 采用 1:100 正态模型。试验在南京水利科学研究所的大波浪水池中进行。如图 2 所示, 波浪水池长 70 m、宽 52 m、深 1.2 m, 港池一段配有消浪斜坡, 另一端配有多向不规则波造波机, 港池两端均配有消浪设施以消除及减少反射波。港池侧边设导波板, 在防波堤等建筑物反射区域内, 以保证来波不受干扰。波高测量采用 DJ800 多功能自动采集系统采集。港内布置了近 80 个控制点, 选取 21 个作为其中的控制点来测量岸线和防波堤旁的波况, 控制点的位置见图 3。

港内码头为重力式结构, 码头面高程按 4.0 m 考虑; 防波堤方案 1 的抛石斜坡堤堤顶高程为 4.0 m、宽度约为 6 m; 防波堤方案 2 采用的直立堤结构堤顶高程为 5.5 m, 混凝土胸墙顶部的宽度为 3 m, 直立沉箱的宽度为 12.7 m。

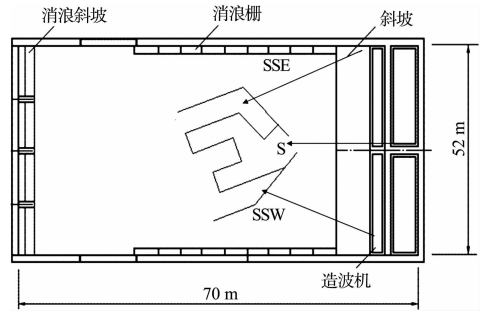


图2 模型平面布置

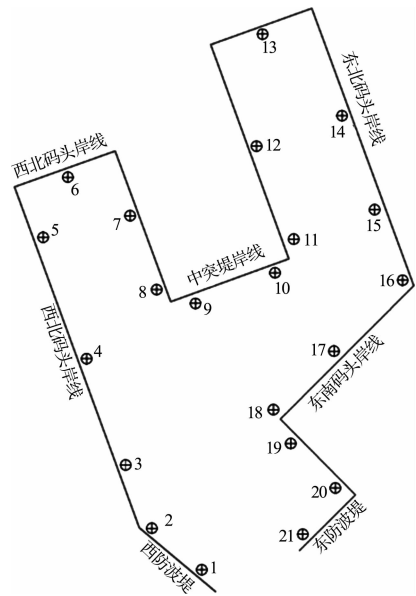


图3 港池边界控制点布置

试验波浪要素是在建港区前的原地形模型上根据设计单位提供的 -10 m 等深线处的不同设计水位 (当地理论最低潮面起算)、不同方向、不同重现期的波高 ($H_{4\%}$), 测得无工程口门 (13.5 m 等深线) 处的波高 ($H_{4\%}$), 并以此波高作为边界入射波要素 (表 1)。按 JTS 145-2—2013 《海港水文规范》^[2] 规定, 在校核港域平稳的设计波浪时, 其重现期不应大于 2 a。因此本文选用在设计高水位重现期为 2 a 一遇的波浪作为研究港内泊稳的波浪要素。试验共设计了 6 个平面方案, 方案 1 和方案 2 研究了不同的防波堤的结构形式对港内泊稳的影响, 方案 3~6 考虑了防波堤口门以及港内不同岸线的结构形式对港内泊稳的影响。

表1 无工程口门(-13.5 m等深线)处不同水位下的设计波要素

水位	波浪重现期	SSE		S		SSW	
		$H_{4\%}/\text{m}$	\bar{T}/s	$H_{4\%}/\text{m}$	\bar{T}/s	$H_{4\%}/\text{m}$	\bar{T}/s
极端高水位 3.58 m	50 a 一遇	4.22	7.2	4.30	7.3	4.22	7.3
	50 a 一遇	4.05	7.2	4.24	7.3	4.25	7.3
设计高水位 1.80 m	10 a 一遇	3.42	6.4	3.55	6.6	3.58	6.6
	2 a 一遇	2.85	5.5	2.90	5.7	2.85	5.7
设计低水位 0.20 m	50 a 一遇	3.82	7.2	3.93	7.3	4.01	7.3
	10 a 一遇	3.17	6.4	3.54	6.6	3.54	6.6
	2 a 一遇	2.71	5.5	2.76	5.7	2.71	5.7

1.3 数学模型

1.3.1 MIKE21-BW 模型方程

近岸区的波浪运动具有较强的非线性,因此在建立数学模型的时候要考虑到波浪的非线性。Peregrine^[3]提出了经典 Boussinesq 方程,该方程可以反映波浪同反射波间的相互作用以及波浪的折射和绕射。但经典 Boussinesq 方程具有弱色散性,仅适用于浅水区域(最大水深与深水波长的比值小于 0.22),其次经典 Boussinesq 方程无法描述波浪破碎以及强非线性等复杂的波浪现象,这些缺点制约了该方程的广泛应用。

后人在此基础上做了诸多改进。本文所采用的 MIKE21-BW 模型是基于 Madsen 等^[4]提出的改进的 Boussinesq 方程模型,与经典 Boussinesq 方程相比,改进的 Boussinesq 方程改进了弥散关系,可以模拟较深水中或者较小波长的不规则波,最大水深与深水波长的比值可以达到 0.5。

1.3.2 MIKE21-BW 模型设置与计算

模型所采用的港池地形与图 1 所示所用地形一致。数模地形见图 4,范围大约为 3.5 km × 6.5 km。为减小计算水域,将港外的部分水域设为人造陆地,在人造陆地周围设海绵层以消除港外的反射波浪进入港内,内部生波线设在海绵层边界处。针对港内的部分反射岸线引入孔隙层来模拟其部分反射效果。网格间距取 $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ m}$,时间步长取 $\Delta t = 0.125 \text{ s}$ 。模型水位取设计高水位 1.80 m。用 Jonswap 波谱模拟单向不规则波,模型的波要素采用设计高水位 2 a 一遇波浪 ($H_{4\%}$),谱峰周期采用 JTS 145-2—2013《海港水文规范》^[2]

中 4.1.4 给出的设计波浪周期换算公式 $T_p = 1.21 \bar{T}$ 得到,对应 SSE、S、SSW 共 3 个方向的波高 H_s 分别为 2.85、2.90、2.85 m, T_p 分别为 6.66、6.90、6.90 s。根据启动时间(就是波从内部生成传播到海港的时间)和计算波浪数据的时间之和,模拟时长取 50 min。

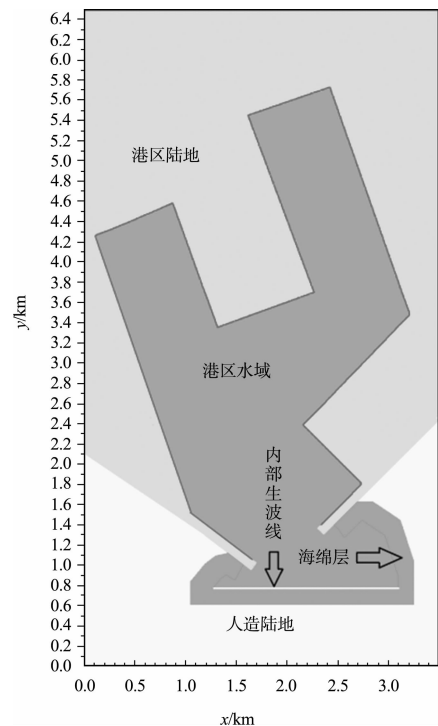


图4 数模计算地形

2 工程方案比较

2.1 东、西防波堤结构形式的比选

防波堤平面布置方案有 2 种,方案 1 为斜坡堤,方案 2 是直立堤,2 个方案的港内岸线均为直立式,口门宽度均为 700 m。东、西防波堤位置见图 3。

2.1.1 物理模型试验结果分析

物理模型试验测量的方案1的波高见图5a)。SSE 来向时, 由于防波堤口门几乎正对 SSE 向, 西港池和西防波堤附近的波高比其他来向的要大, 防波堤对东港池的掩护效果较其他来向的为最好; 当波向为 S 向时, 中突堤岸线暴露在外海波浪的作用下, 港内几乎各控制点(除了控制点3)波高较 SSW 来向的要大; S 向→SSW 向时, 因有效口门的减小, 港口整体水域的波高都有所下降。

方案2波高见图5b), 直立堤方案下不同波向的波高分布趋势与斜坡堤方案相似, 但是东、西防波堤改成直立堤结构后, 口门附近波浪多次反射的现象增强, 几乎所有的控制点波高都有增长, 涨幅在 10% 左右的分布在控制点 1~4 和控制点 19~21 处, 即分布在东、西防波堤附近, 其余控制点波高最大增长幅度约为 4%。

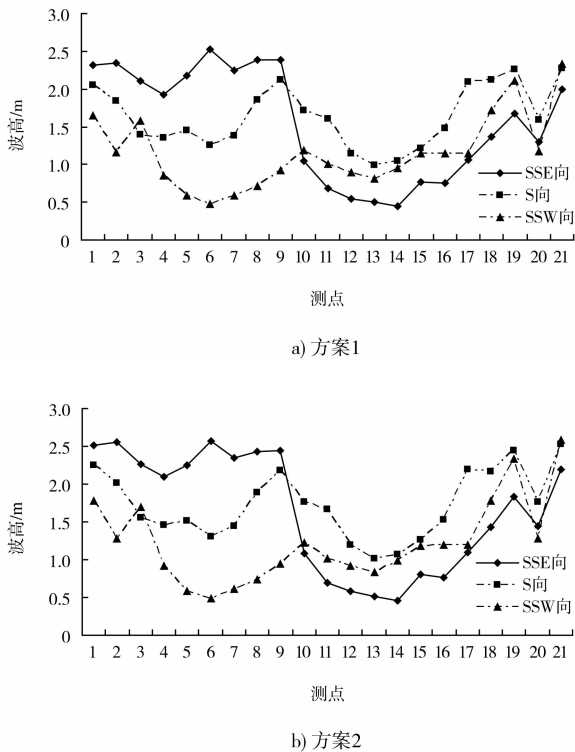


图5 设计高水位2 a一遇下不同波向港内 $H_{4\%}$ 分布

2.1.2 Mike21-BW 模拟结果分析

模型采用的水位和波浪要素与物理模型试验采用的都是一致的。如图6所示, 在 SSE 向来浪

的条件下, 方案2较方案1波高显著变大的测点主要集中在测点2~4和测点19~21, 与物理模型的规律一致, 但部分测点的波高值有所出入。

在 SSE 向和 S 向来浪条件下, 测点2、3、19和20处物理模型的波高测量值要比数模计算的结果高出 0.4~0.9 m, 这主要是由于东、西防波堤阻挡造成的越浪引起的。在 S 向(或 SSW 向)来浪时, 测点3处数模计算得到的波高要远大于 SSE 来向时的波高, 这主要是因为 S 向(或 SSW 向)波浪进港后, 波浪部分(或完全)入射到东防波堤和东南码头岸线之间的直立岸线上, 并反射回了西码头岸线处(主要在测点2和3之间)。另一方面是因为测点2和3处于强反射区, 即使两个波高仪之间微小的位置差别都会很大程度地影响结果。同理, 测点5~8(在 SSE 向来浪条件下)、9(在 S 向来浪条件下)、18~19(在 SSW 向来浪条件下)处的波高值也都处于强反射区, 比较数模和物模得出的单个测点的波高没有实际意义, 鉴于这些区域的波高值都比较大, 可以选取位于强反射区的几个具有代表性的测点, 通过计算其平均值来了解这一区域的波况。

由于东、西防波堤处的越浪量较大, 导致数模计算得出的港内波高整体偏小。在非强反射区体现得比较明显, 如测点4~8(在 S 向和 SSW 向来浪条件下)、测点11~17(在 SSE 向和 SSW 向来浪条件下), 数模计算的波高值较物模试验值减少了 0.2~0.4 m。在设置数学模型的波浪要素时, 建议适当提高数模的内生成波波高值, 以弥补 Mike21-BW 不能模拟越浪的局限性。

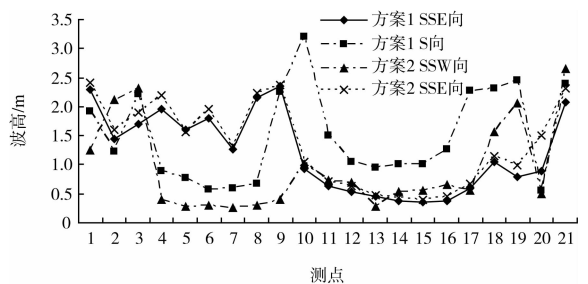


图6 Mike21-BW 模型计算的港内波高

2.2 防波堤口门尺度和港池边界结构的比选

2.2.1 物理模型试验结果分析

在东、西防波堤定为斜坡堤的基础上，对防波堤的口门和港内边界结构进行了调整。选取了具有代表性的4种调整方案：方案3在原斜坡式防波堤的基础上将直立岸线改为斜坡堤；方案4在方案3的基础上将防波堤口门宽度由700 m调整到600 m；方案5在方案4的基础上将西码头岸线从西防波堤根部起算1 000 m范围内以及中突堤均改为斜坡式结构；方案6在方案5的基础上将中突堤改为斜坡式结构。改进方案具体位置见图7。

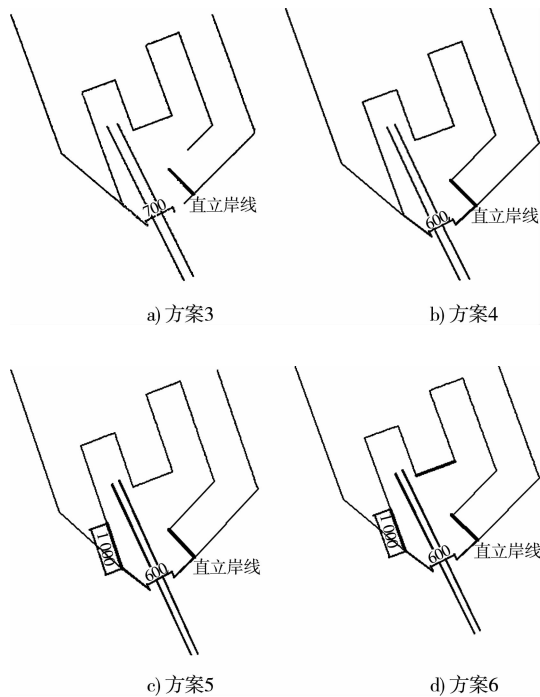
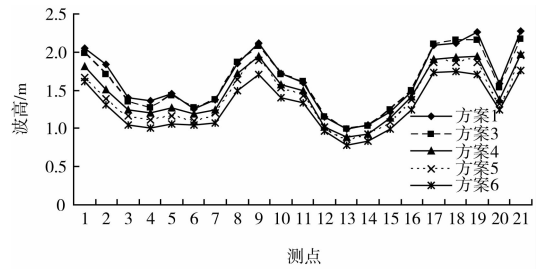
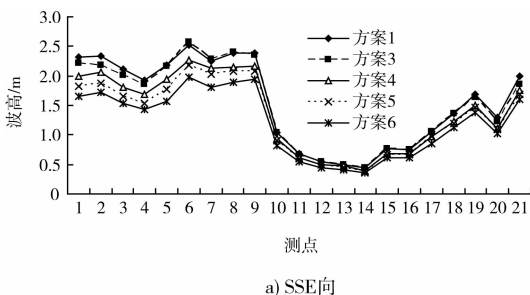
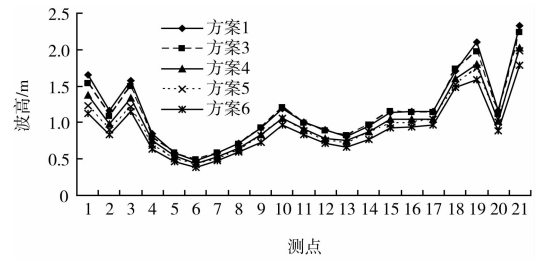


图7 4种港内平面布置改进方案(单位:m)

图8给出了在设计高水位50 a一遇的条件下SSE向、S向和SSW向外来波浪作用时港内各控制点的波高。



b) S向



c) SSW向

图8 各方案设计高水位2 a一遇波浪港内的 $H_{4\%}$ 分布

在SSE向、S向和SSW向波浪的作用下，方案3和方案1相比，在西防波堤和东防波堤附近的波高有4%~6%的减少，其他控制点的波高基本不变，说明将东防波堤与东南码头岸线之间的直立岸线改为斜坡堤形式进一步减少了防波堤口门附近的波高；同样地，在3个不同波向的作用下，方案4港内各控制点的波高和方案3相比均有约10%的减少，说明口门宽度的减小可以有效改善港内的波况。方案5和方案4相比，将西码头岸线从西防波堤根部起算1 000 m范围内改成斜坡堤的话，可以有效地减少反射到东港区和西港区里的波高，再结合方案6，S向和SSW向的波浪大部分都要直接入射到中突堤，因此将中突堤的结构形式由直立堤改为斜坡堤可以大幅减少港内几乎所有位置的波高，结合方案5和方案6，将西防波堤根部起算1 000 m以及中突堤改为斜坡堤形式可以减少港内多次反射现象，减小幅度在10%~20%。

2.2.2 由数模对方案的再优化

通过数模试验得到的港内波浪场可知，SSE向来波时，人工开挖的航道使波浪发生了折射，由于波向和航道方向基本一致，波能向两边航道边坡分散开，航道内波能少而航道两边边坡波能集聚，使得西码头岸线靠近西北码头岸线的根部

受到了外来波浪的直接作用,若在此处设置一小段斜坡堤,对西港池内的波况会有比较好的改善。在S向来时,东、西港池的波况受东南码头岸线二次反射的波浪影响较大,如果将东南码头岸线西南方向的一部分改为斜坡堤形式,那么可以改善东西港池内的波高。

3 结论

应用物理模型试验测出了不同方案下港内的波高情况,并结合Mike21-BW模块构建的港内不规则波浪数学模型对港内波浪场作了系统性的研究。为改善港内泊稳条件,在优化港口规划方案时可以从以下几点着手:1)防波堤采用斜坡式结构可有效减少港内波浪的多次反射,从而减小港内的波高,尤其是防波堤口门处的波高;2)布置防波堤口门时应尽量避免强浪向,在满足通航的前提下可以通过减小防波堤口门宽度增强防波堤对港区的掩护效果;3)应尽量避免主波向与航道方向成小角度入射,防止航道内波能辐散导致泥沙淤积,以及航道边坡波能集中传播到码头岸线,不利于港内泊稳条件;4)港内部分岸线如正对口门的岸线、主波向直接入射的岸线、主波向波浪二次反射位置的岸线采用斜坡式等消浪结构可以有效改善码头岸线处的泊稳条件。

物模和数模都有其局限性。物模试验耗费的人力、物力和资金比数模要多很多;其次物模试验场地仍然非常有限,无法模拟大尺度的水域变化,采用正态模型的话水深和波高可能会很小,此时水体受到的表面张力和床面阻力已经发生了

变化,仪器在测量较小波高值时误差较大,试验的精度不能得到保证。若采用变态物理模型试验则难以满足波浪运动相似关系。数模也具有局限性, Mike21-BW 运算出的结果会因为参数设置和计算方法的不同而发生变化,如何选取合理的参数并选用合适的计算方法是数模所得结果是否可靠的关键之一。其次,改进的 Boussinesq 方程虽然可以模拟波浪的各种变形现象,但并不能够模拟一些复杂的波浪现象如透射、越浪、卷吸、射流等。未经实测资料检验的数模结果精确度未知。从本文的模拟结果来看,由于物模试验中防波堤处存在越浪,导致数模计算所得的波高与物模试验测得的波高相比整体上要小一些。数模计算得到的可视化结果和物模的试验数据相比更容易得出规律。在港口平面布置方案的设计与比选中,结合数模和物模试验,依靠数模模拟港内波况来指导物模试验的开展,可以给港口平面布置提供更为全面的优化方案。

参考文献:

- [1] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].
- [2] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].
- [3] Peregrine D H. Long waves on a beach[J]. Fluid Mech, 1967, 27: 815-827.
- [4] Madsen P A, Sorensen O R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2: A slowly-varying Bathymetry[J]. Coastal Engineering, 1992, 18: 183-204.

(本文编辑 武亚庆)

著作权授权声明

全体著作权人同意:论文将提交《水运工程》期刊发表,一经录用,本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。