

# 多口门港池模型试验波浪入射条件的叠加方法

饶永红<sup>1</sup>, 陈正昂<sup>2</sup>

(1. 海军工程设计研究院 工程综合试验研究中心, 山东 青岛 266100; 2. 青岛远洋船员职业学院, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 在研究非均匀水深场中多口门港池波浪入射问题时, 传统的“一段造波法”无法同时满足各口门的波浪入射条件, 引起了港内波况的显著误差。“分段造波法”的出现较好地解决了这一问题, 但在应用这种造波方法时要求物理模型在一线布置的造波板上任意位置实现分段独立控制, 造波机系统的改造成本高、技术实现困难。提出了基于“一段造波法”的单口门港池试验模型叠加法, 在不改造现有造波机系统的前提下解决了上述问题, 并通过实例验证了这种方法的可靠性。

**关键词:** 非均匀水深; 多口门港池; 模型试验; 波浪入射; 模型叠加

中图分类号: P 731.22; TV 131.61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)10-0023-05

## Superposition method for incident wave conditions in model test of harbor basin with several entrances

RAO Yong-hong<sup>1</sup>, CHEN Zheng-ang<sup>2</sup>

(1. Composite Engineering Experiment and Research Center, Navy Engineering Design and Research Institute, Qingdao 266100, China; 2. Qingdao Ocean Shipping Mariners College, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** When studying incident wave propagation into a harbor basin with several entrances where the water depth is non-uniform, the traditional one-line wave generation method cannot satisfy the incident wave conditions at all entrances, which will cause obvious errors. In numerical models, a multi-line wave generation method is applied to solve the problem. In physical models, the multi-line generation method cannot be used until the wave generation line can be divided into several parts at any position and each part can be controlled individually. But the division is so difficult and expensive. In this paper, a new method named multi-model superposition is developed which is based on one-line wave generation method for one-entrance harbor basin. Wave generator upgrading is unnecessary when this method is applied. The reliability of the method is verified by a real case.

**Keywords:** non-uniform water depth; multi-entrance harbor basin; model test; incident wave propagation; model superposition

在港口工程中, 过去单口门港池占绝大多数, 但近年来随着港口经济的快速发展和建港规模的不断增大, 多口门(一般两个口门)港池已不少见, 各口门所处的水深和入射波要素(波高、周期和方向)存在明显的差别。在研究这类港池的波浪入射问题时, 传统的物理模型和数值模拟采

用“一段造波法”, 无法同时满足各口门的波浪入射条件, 误差明显, 需要对波浪入射条件和试验方法进行改进。数值模拟借鉴物理模型的“凑波”方法, 利用“分段造波法”<sup>[1]</sup>解决了上述问题, 但物理模型试验应用“分段造波法”, 需要改造造波机系统, 投资大, 实现困难。

收稿日期: 2014-03-20

作者简介: 饶永红(1971—), 女, 博士, 高级工程师, 从事不规则波理论、波浪物理模型和数值模拟应用研究。

本文阐述了“一段造波法”解决多口门港池波浪入射问题的局限性,并进行了误差分析;提出了基于“一段造波法”的单口门港池模型叠加法,解决了非均匀水深场中多口门港池波浪入射问题,不仅避免了造波机系统的改造,而且明显地提高了物理模型的试验精度。

## 1 “一段造波法”的局限性

“一段造波法”<sup>[1]</sup>指在波浪试验中直线排列的所有造波板(线)采用一个驱动信号(波浪生长数据文件)进行造波控制,即首先在原始地形上根据模型有效区内一个已知点的波要素进行“凑波”,得到一个驱动信号文件,接着在原始地形上制作工程方案模型,利用上述信号驱动造波机进行正式试验。

在研究多口门港池波浪入射问题时,造波板和等深线夹角较大的情况不可避免(图1),波浪在非均匀水深场中传播,“一段造波法”在造波线上各点(1#~8#)形成的人射波高随着水深的减小而增大<sup>[2]</sup>,违背了自然规律。另外,从表1可以看出,在设计水位+2.5 m条件下,和南口门相比,东口门水深大5.55 m,2 a一遇原始有效波高 $H_s$ 和平均周期 $\bar{T}$ 分别大0.27 m和0.27 s,方向也逆时针偏转了9.8°。可见,“一段造波法”不仅不能反映两口门处波要素的这种差异,而且与自然界的波浪分布规律相悖。

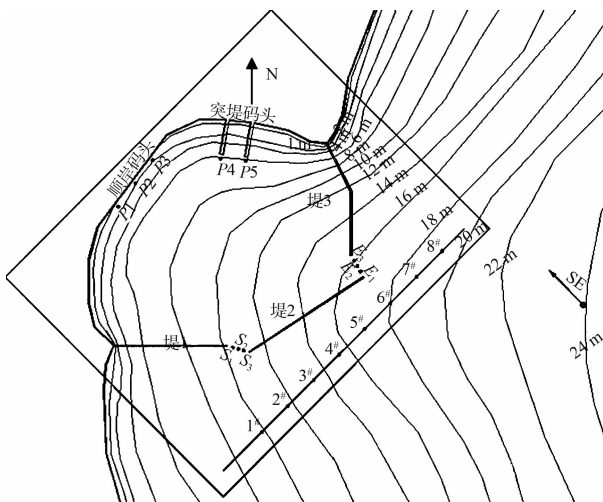


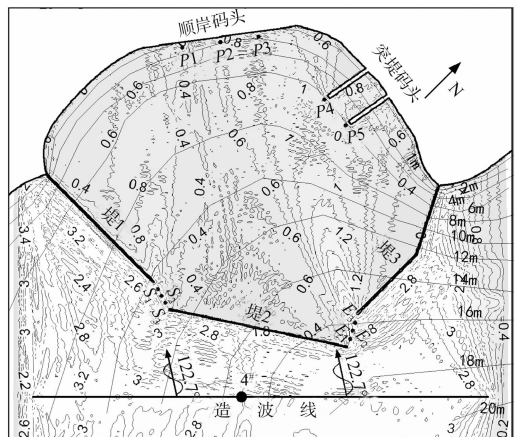
图1 原始地形和工程方案模型范围<sup>[1]</sup>

表1 南口门和东口门2 a一遇原始波要素

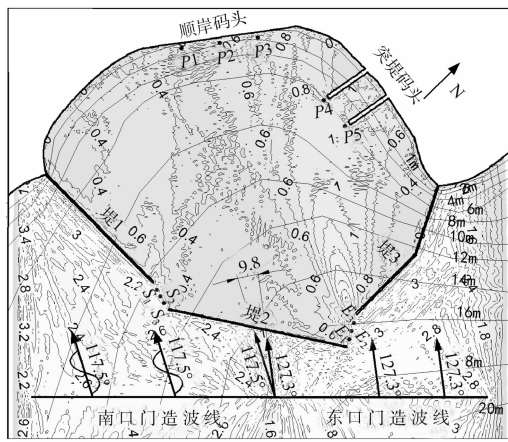
位置	水深/m	浪向/(°)	$H_s$ /m	$\bar{T}$ /s
南口门①	13.05	117.5	2.05	6.12
东口门②	18.60	127.3	2.32	6.39
②-①	5.55	9.8	0.27	0.27

为解决上述问题,数值模拟可在各口门分别设置“凑波”验证点,根据口门个数将造波线分段,每段根据对应口门的波要素,在原始地形上修正其边界条件,分别产生各段的波浪生长数据文件,即波浪入射边界,此为“分段造波法”<sup>[2]</sup>。

物理模型试验采用“分段造波法”则难度很大,因为每个港池各口门的相对位置不固定,要求造波机的控制系统能在任意位置实现造波板(线)的分段独立控制。当前,物理模型解决这类问题仍采用“一段造波法”,但港内波况的试验结果存在显著误差。试验中,为了兼顾各口门的波浪入射条件,唯一的一个“凑波”验证点一般都置于各口门的中间位置。如图1所示,验证点设在4#,按“一段造波法”进行试验,其相对于“分段造波法”的误差分析见表2,图2为两种造波方法得到的港内波高分布对比。可以看出,“一段造波法”在南口门处的人射波高明显偏大,如码头前P1点处于该口门的开敞区内,其 $H_{4\%}$ 的误差达到了95.7%。可见,“一段造波法”用于研究多口门港池波浪入射问题存在很大的局限性。



a) 一段造波法



b) 分段造波法

图 2 两种造波法的港内波高分布对比<sup>[2]</sup> (单位: m)表 2 “一段造波法” 码头前波高  $H_{4\%}$  的误差分析<sup>[2]</sup>

位置	点号	一段造波法 $H_{4\%}$ ③/m	分段造波法 $H_{4\%}$ ④/m	(③-④)/ ④/%
顺岸 码头	P1	0.90	0.46	95.7
	P2	0.63	0.54	16.7
	P3	0.95	0.68	39.7
突堤 码头	P4	0.93	0.87	6.9
	P5	0.90	0.92	-2.2

## 2 单口门试验模型叠加法及实例验证分析

### 2.1 波能线性叠加原理

以能量谱和随机过程描述海浪已成为主要的波浪研究途径, 由此提出的各种海浪模型都把海浪看成平稳正态过程, 且具有各态历经性。按朗盖脱-赫金斯海浪模型, 将无限个随机的余弦波叠加起来描述一个定点的波面<sup>[3]</sup>:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\omega_n t + \varepsilon_n) \quad (1)$$

式中:  $a_n$ 、 $\omega_n$  分别为组成波的振幅和圆频率;  $\varepsilon_n$  为在  $0 \sim 2\pi$  范围内均布的随机初相位。设波面的方差谱为  $S(\omega)$ <sup>[3]</sup>, 则

$$\int_0^{\infty} S(\omega) d\omega = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 \quad (2)$$

另一方面, 由波浪理论<sup>[4]</sup>可知, 第  $n$  个组成波的能量为  $\gamma a_n^2/2$  ( $\gamma$  为因子), 可见, 随机波浪的总能量可看成是各组成波能量的线性叠加, 此原理在波浪理论研究和工程应用方面得到了广泛的应用<sup>[5-6]</sup>。

### 2.2 模型叠加法

根据波浪能量线性叠加原理, 基于“一段造波

法”, 提出了单口门试验模型叠加法, 可应用于物理模型研究多口门港池波浪入射问题。具体如下:

1) “凑波”试验。在原始地形上, 于第 1 个口门设置“凑波”验证点, 按该口门要求的原始波要素进行“凑波”试验, 得到 1 个造波机驱动信号; 然后, 在第 2 个口门设置“凑波”验证点, 同样得到符合此口门原始波要素的另 1 个造波机驱动信号; 如有多个口门, 依此类推。

2) 工程方案单口门试验。首先, 将除第 1 个口门外的其它口门用消波器封住消波, 利用第 1 个口门验证点对应的信号驱动造波机进行试验, 测量港内波高分布。完成第 1 个口门试验后, 将第 2 个口门处的消波器移除, 并将其挪至第 1 个口门, 将第 1 个口门封住消波, 然后利用第 2 个口门验证点对应的信号完成第 2 个口门试验。若有更多口门, 依此类推。

3) 模型叠加计算。港内同一点在各次单口门试验中得到的波高按能量法进行叠加, 即有效波高求平方和后再取其二次方根就得到叠加的有效波高。最后, 可根据试验要求将叠加的有效波高换算成其它特征波高或累积率波高。

上述方法中, 第 1 个口门试验中的外海波能仅从第 1 个口门进入港池, 其它口门均通过设置消波器阻止了港内外的能量交换, 其他各次单口门试验与此类似。就是说, 各口门的原始波要素是在各自的“凑波”试验中依次实现的, 工程方案试验中进入港内并传播的过程也不是同时发生的。而实际上, 两口门的入射波浪是在一个更大的波浪场里同时存在并向港内传播的<sup>[7-8]</sup>。不过, 这种时间上的不一致, 应用随机波浪能量的线性叠加原理可以化解。

在“分段造波法”中, 各段造波线虽然是在一个模型里同时造波, 但是各段的波浪场是独立存在的, 只是借助于同一个模型介质按各自的规律同时向港内传播, 各波浪场传播至同一点时, 该点总波能也是用各波浪场的能量线性叠加得到。利用“分段造波法”中各波浪场独立传播和波能可线性叠加的特性, 将各波浪场同时发生改为先后发生, 这就是多口门港池单口门试验模型叠加

法的基本内涵，港内某点的波能等于各次单口门试验中得到的波能之和，表现在有效波高的换算上就是港内某点的有效波高：

$$H_s = \sqrt{\sum_{i=1}^m H_{si}^2} \quad (3)$$

式中： $m$ 为口门个数； $H_{si}$ 为第*i*个单口门试验得到的港内某点的有效波高。

### 2.3 实例验证

#### 2.3.1 实例

“凑波”试验按表1所示的波要素在原始地形上进行，依次得到南口门和东口门各自的造波机驱动信号，各验证点波要素误差控制在 $\pm 1.0\%$ 以内。接着，进行工程方案单口门试验，各次试验得到的港内波高分布见图3。最后，按式(3)进行计算，得到叠加波高在港内的分布见图4。

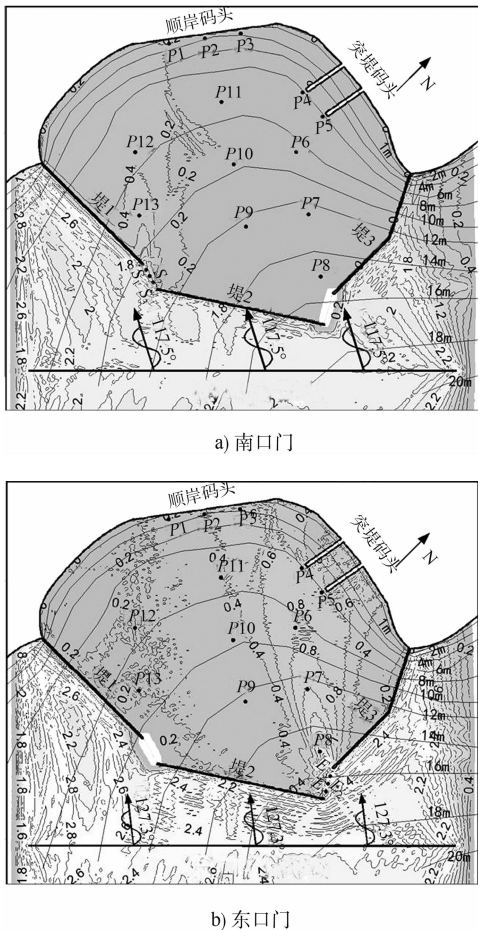


图3 工程方案单口门试验港内波高分布 (单位: m)

#### 2.3.2 误差分析

图5为“分段造波法”计算得到的港内 $H_s$

分布。为了验证模型叠加法的可靠性，图6给出了它(图4)与“分段造波法”港内有效波高之差(误差)的分布，误差在0.05 m以内。在码头前取点P1~P5，东口门和南口门的开敞区内分别取点P6~P8和P12~P13，这13个点的绝对误差在0.03 m以内，百分比误差在6%以内，见表3。

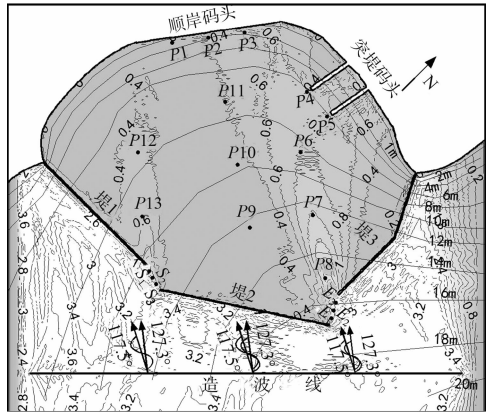


图4 能量叠加后港内波高分布 (单位: m)

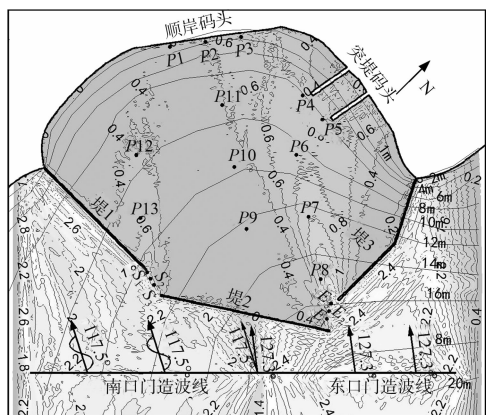


图5 “分段造波法”港内波高分布 (单位: m)

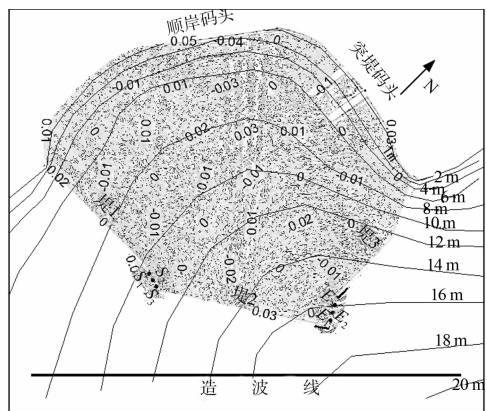


图6 港内波高误差分布 (单位: m)

表 3 各计算点误差

位置	点号	有效波高 $H_s/m$				$(\textcircled{5} - \textcircled{6}) / \textcircled{6} / \%$	$\textcircled{5} - \textcircled{6} / m$
		南口门试验	东口门试验	模型叠加法 $\textcircled{5}$	分段造波法 $\textcircled{6}$		
顺岸码头	P1	0.209	0.300	0.366	0.372	-2	-0.01
	P2	0.154	0.402	0.430	0.435	-1	0.00
	P3	0.150	0.562	0.582	0.549	6	0.03
突堤码头	P4	0.080	0.733	0.737	0.754	-2	-0.02
	P5	0.085	0.847	0.851	0.829	3	0.02
东口门开敞区	P6	0.114	0.760	0.769	0.755	2	0.01
	P7	0.102	1.010	1.015	0.994	2	0.02
	P8	0.080	1.652	1.654	1.649	0	0.00
港池回旋水域	P9	0.106	0.312	0.330	0.318	4	0.01
	P10	0.125	0.307	0.331	0.312	6	0.02
	P11	0.137	0.334	0.361	0.378	-4	-0.02
南口门开敞区	P12	0.381	0.247	0.454	0.451	1	0.00
	P13	0.540	0.204	0.577	0.603	-4	-0.03

### 3 结论

多口门港池各口门处的水深和入射波要素(波高、周期和方向)存在明显的差别,传统物理模型和数值模拟采用“一段造波法”无法同时满足各口门的波浪入射条件,误差较大,远不能满足试验精度要求。数值模拟运用“分段造波法”较好地解决了这一问题,而物理模型应用这种造波方法则难于实现造波板(线)上任意位置的分段独立控制。本文参照“分段造波法”中各波浪场独立传播、波能可线性叠加的特性,在不改造现有造波机系统的条件下,提出了基于“一段造波法”的单口门试验模型叠加法,并通过实例对其可靠性进行了验证,叠加有效波高的相对误差在 $\pm 6\%$ 以内,可以满足一般的港口工程建设精度要求。

### 参考文献:

[1] 饶永红. 河口海岸工程模型试验若干问题研究[D]. 大

连: 大连理工大学, 2011: 144-168.

- [2] Rao Y H, Liang S X, Yu Y X. A method on how to determine the incident wave boundary conditions and its application[J]. China Ocean Engineering, 2012, 26(2): 205-216.
- [3] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2002: 131-132.
- [4] 邱大洪. 波浪理论及其在工程上的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [5] 张敏. 基于新波理论的陡波数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [6] Ma W X, Fan E G. Linear superposition principle applying to Hirota bilinear equations[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2011, 61(4): 950-959.
- [7] DHI. MIKE21 Spectral Waves model User Guide [M]. Denmark: DHI Water & Environment, 2014.
- [8] DHI. MIKE21 Boussinesq Waves model User Guide [M]. Denmark: DHI Water & Environment, 2014.

(本文编辑 武亚庆)