



基于波浪数学模型的航道对波浪传播规律影响分析

钟雄华, 李伟仪, 王科华, 任赵飞

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 针对波浪传播规律与航道相互关系的问题, 基于波浪数学模型, 研究波浪入射角和航道的网格边长对波浪传播规律的影响。结果表明, 航道疏浚后, 当波浪入射角为 15° 时, 航道迎浪侧与背浪侧之间波高最大变化率可达 6.6%, 且航道最小网格边长相对于航道边坡宽度为 0.12 时, 航道边坡可以较准确地模拟出来, 此时数值模拟的时间较短。

关键词: 航道; 波浪入射角; 网格边长

中图分类号: U611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0025-05

Influence of channels on wave propagation law based on wave numerical model

ZHONG Xionghua, LI Weiyi, WANG Kehua, REN Zhaofei

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: In view of the relationship between the wave propagation law and the channel, this paper studies the influence of wave incident angle and grid side length of channels on wave propagation law based on the wave numerical model. The results show that after channel dredging, when the wave incident angle is 15° , the maximum change rate of wave height between the wave-facing side and the back side of the channel can reach 6.6%, and when the minimum grid side length of the channel is 0.12 relative to the width of the channel slope, the channel slope can be simulated accurately, and numerical simulation is quick.

Keywords: channel; wave incident angle; grid side length

波浪从航道外入射进航道后, 由于航道内外水深的差异, 波浪会发生折射甚至反射的现象, 研究航道对波浪传播的影响对于确定航道走向及船舶的航行安全具有重要意义。国内外学者针对航道对波浪传播规律的影响已进行了大量的研究。左其华等^[1]采用波浪数值模拟方法分析不同波浪入射角情况下航道对波浪传播规律的影响, 研究表明不同波浪入射角时, 航道对波浪传播规律的影响程度不同; 吴达开^[2]通过透浪侧界抛物线模

型研究波浪小角度入射航道的机理, 并得到长、直航道沿程比波高分布规律; 陈汉宝等^[3]通过物理模型试验, 研究深水航道对斜向入射波浪传播的影响, 并对极限波高提出新的认识; 赵智帮等^[4]采用数学模型和物理模型试验手段, 研究航道水深、航道边坡坡度、航道宽度等因素对波浪传播规律的影响, 并分析临界入射角在工程中的意义; 李思源等^[5]研究减少航道外波浪集聚的方法, 并结合具体工程, 提出一种可行的喇叭口航道开挖

收稿日期: 2022-09-01

作者简介: 钟雄华 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事港口与航道工程设计。

方案；董利民等^[6]通过波浪数值模拟方法，研究有、无航道时港内波浪分布的差异，研究表明开挖航道对波浪的传播变形影响较大；Sloth^[7]通过波浪数值模拟的方法，研究尼日利亚莱基港的进港航道对波浪传播的影响，研究表明由于受到进港航道的影响，波浪会发生折射，从而加大了主防波堤的波浪；王科华等^[8]通过 FHDI-GNWM 全球波浪数据库分析不同工程海域的波浪特征，结合具体工程对波浪传播规律进行了说明。

本文基于 MIKE21-SW 波浪数值模型，结合实际工程对航道影响波浪传播规律的总体特征进行分析，并研究波浪入射角和航道的网格边长对波浪传播规律的影响，从而为工程设计提供参考。

1 工程概况

本文结合菲律宾某填海工程，为方便施工船舶进出，疏浚了 1 条长约 6.5 km 的航道，航道宽度为 150 m，航道两侧边坡的坡度为 1:30，疏浚深度为 2~6 m，该工程的平面布置见图 1。在航道疏浚前，岛 2 和岛 3 西侧护岸不同重现期的波要素见表 1。



图 1 工程平面布置

表 1 岛 2 和岛 3 西侧护岸不同重现期的波要素

位置	重现期/a	波高 H_{m0}/m	周期 $T_{m-1,0}/s$	波向/°
岛 2 西侧 护岸	25	5.24	7.8	270
	100	5.36	7.9	270
	1 000	5.41	8.0	270
岛 3 西侧 护岸	25	4.10	6.9	270
	100	5.15	7.8	270
	1 000	5.27	7.9	270

2 模型建立

2.1 模型波浪边界条件确定

根据表 1 中岛 2 和岛 3 西侧护岸的波浪条件，采用 MIKE 21-SW 模型对该波浪条件进行复演，推导得出模型边界的波浪条件，见表 2。

表 2 模型边界的波浪条件

重现期/a	模型边界波浪条件		
	波高 H_{m0}/m	周期 $T_{m-1,0}/s$	波向/°
25	6.4	7.8	260
100	6.4	7.9	260
1 000	6.5	8.2	260

2.2 航道疏浚模型建立

结合现有实测地形数据和 C-MAP 地形数据，采用 MIKE 21 软件生成航道疏浚后的地形文件，在航道处进行了局部加密，最小网格边长为 8 m，航道疏浚后的地形见图 2。采用此地形文件和表 2 中的模型边界的波浪条件建立航道疏浚后的波浪数学模型，并进行相关的计算分析。

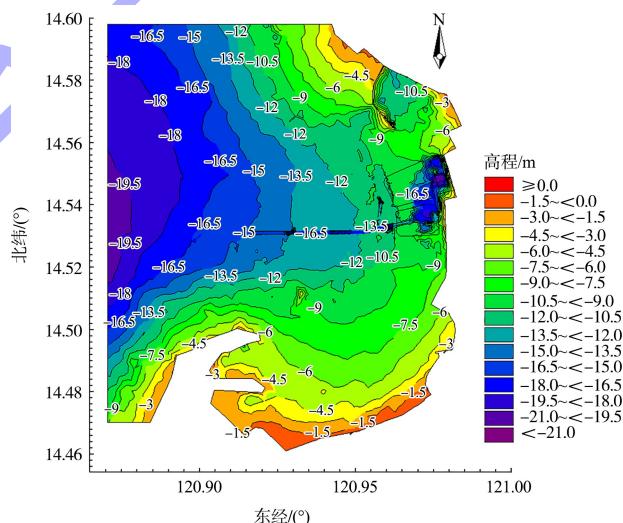


图 2 航道疏浚后的地形

3 试验结果和分析

3.1 航道影响波浪传播规律的总体特征

航道疏浚后，25、100、1 000 a 一遇波浪作用下对应的工程海域的波高分布见图 3。可以看出，在不同重现期波浪作用下，对于 ABC 段航道而言，航道两侧海域的波浪比航道内部海域的波浪大；对于 BD 段航道而言，航道两侧海域的波浪与航道内部海域的波浪基本相同。

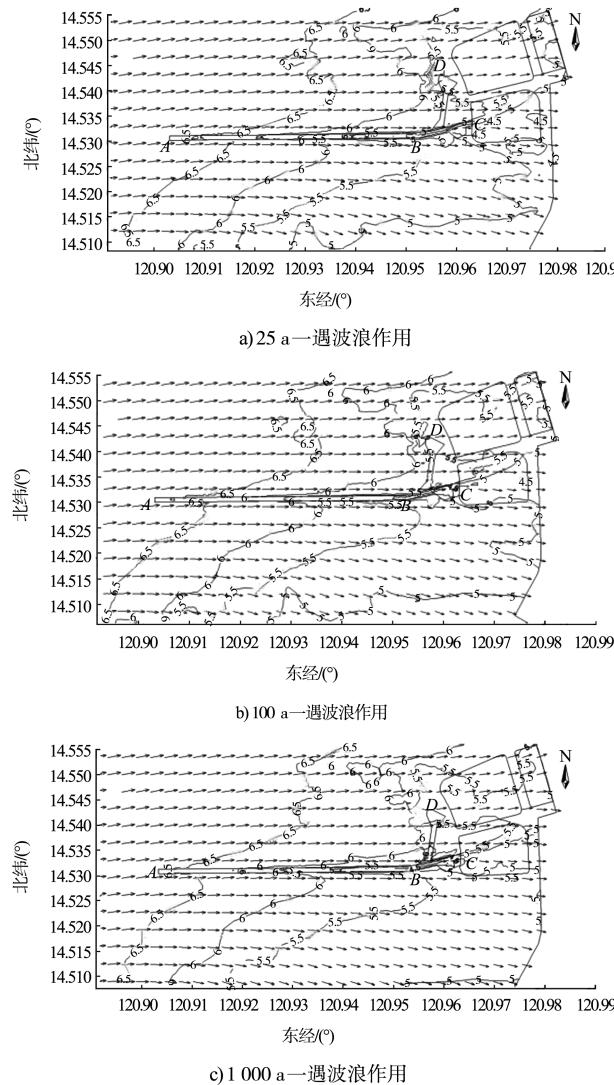


图 3 航道疏浚后工程海域的波高分布 (单位: m)

从定性的角度分析, 对于 ABC 段航道而言, 波浪从航道外侧的浅水区域传播到航道内的深水区域的过程中, 由于入射波与航道中轴线的法线有一定的夹角, 所以在同一波峰线上不同位置处的水深不同, 而同一条波峰线上的不同位置的波速是由其所对应的水深决定, 且深水波速大, 浅水波速小, 因而波浪会发生折射, 从而使航道外侧的波高变大, 航道内侧波高变小; 对于 BD 段航道而言, 由于入射波与航道中轴线的法线基本平行,

所以在同一波峰线上不同位置处的水深基本相同, 即同一波峰线上不同位置的波速基本相同, 因而波浪基本不发生折射, 从而使航道内外侧的波高基本相同。

根据 Snell 定律进行定量分析的表达式为:

$$\frac{\sin \alpha_0}{c_0} = \frac{\sin \alpha}{c} \quad (1)$$

式中: c_0 为航道外侧的波速; c 为航道内的波速; α_0 为入射波浪与航道中轴线的夹角; α 为折射波浪与航道中轴线的夹角。

对于 ABC 段航道而言, 当波浪由航道外侧的浅水区向航道内侧的深水区传播时, 由于 $\alpha_0 \rightarrow 0^\circ$,

所以 $\frac{\sin \alpha_0}{c_0} \rightarrow 0$; 因而 $\frac{\sin \alpha}{c} \rightarrow 0$, 对应的 $\alpha \rightarrow 0^\circ$, 所以

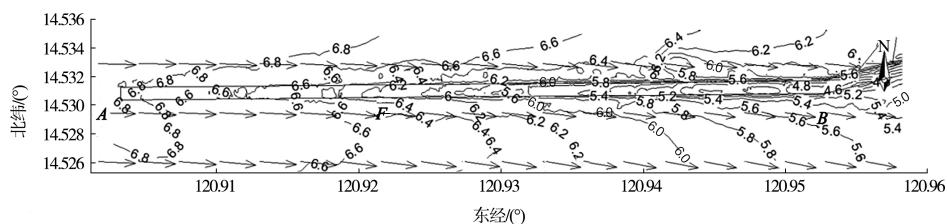
对于 ABC 段航道而言, 波浪会发生折射, 从而使航道外侧的波高变大, 航道内侧波高变小; 对于 BD 段航道而言, 当波浪由航道外侧的浅水区向航道内

侧的深水区传播时, 由于 $\alpha_0 \rightarrow 90^\circ$, 所以 $\frac{\sin \alpha_0}{c_0} \rightarrow \frac{1}{c_0}$;

因而 $\frac{\sin \alpha}{c} \rightarrow \frac{1}{c_0}$, 对应的 $\alpha \rightarrow 90^\circ$, 所以对于 BD 段航道而言, 航道内外侧的波高基本相同。

3.2 波浪入射角对波浪传播规律的影响

波浪入射角是影响波浪在航道及其附近海域传播规律的重要因素, 在航道疏浚后, 25 a 一遇波浪作用下波浪入射角为 0° 时(模型边界处的波向取 265°), 所对应的航道及其附近海域的波高分布见图 4(注意此处的波浪入射角是指在航道起点 A 处波向线与航道中轴线的夹角, 下同)。可以看出, 对于 AB 段航道而言, 在不同位置, 航道两侧波高变化规律不同, 其中对于 AF 段航道而言, 航道两侧的波高基本相同; 对于 FB 段航道而言, 靠近航道迎浪侧(即航道北侧)的位置其波高大于航道背浪侧(即航道南侧)位置的波高。

图 4 波浪入射角为 0° 时的波高分布 (单位: m)

对上述现象进行分析可知,对于 AF 段航道,由于该段航道的波浪方向基本平行于航道中轴线,航道内的波浪会向航道两侧折射,且折射的程度基本相同,因而造成航道两侧的波高基本相同的现象。对于 AF 段航道而言,波浪的入射方向为自北向南斜向入射,由于波浪经过航道时,航道内水深大、波速大,而航道外水深浅、波速小,因而波浪会发生折射,且折射的方向向迎浪侧,因而造成迎浪侧波高大,背浪侧波高小的现象。

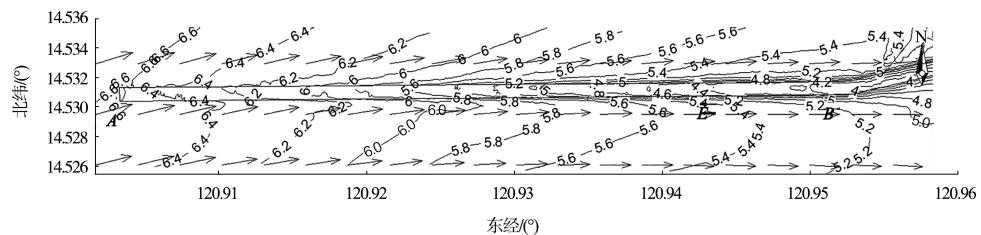


图 5 波浪入射角为 15° 时波高分布

产生上述现象的原因与图 4 的原因类似,对于 AE 段航道而言,波浪的入射方向为自南向北斜向入射,由于波浪经过航道时,航道内水深大、波速大,而航道外水深浅、波速小,因而波浪会发生折射,且折射的方向向迎浪侧,因而造成迎浪侧波高大、背浪侧波高小的现象。对于 EB 段航道,由于该段航道的波浪方向基本平行于航道中轴线,航道内的波浪会向航道两侧折射,且折射的程度基本相同,因而造成航道两侧的波高基本相同的现象。

为进一步分析波浪斜向入射时 AB 段航道及两侧波浪分布特点,分别在航道中轴线和航道南北两侧选取一定的数据点进行定量分析,数据提取点位置见图 6,其中 $R_1 \sim R_{12}$ 为航道中轴线上的数据点, $Q_1 \sim Q_{12}$ 为航道北侧边坡附近的数据点, $P_1 \sim P_{12}$ 为据航道南侧边坡附近的数据点。

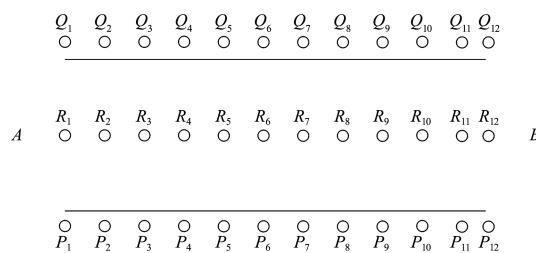


图 6 数据提取点的位置

现象。

航道疏浚后,在 25 a 一遇波浪作用下波浪入射角为 15° 时(模型边界处的波向取 250°)所对应的航道及其附近海域的波高分布见图 5。可以看出,对于 AB 段航道而言,在其不同位置,航道两侧波高变化规律不同,其中对于 AE 段航道而言,航道迎浪侧(即航道南侧)的波高大于航道背浪侧(即航道北侧)的波高;对于 EB 段航道而言,航道两侧的波高基本相同。

波浪入射角为 15° 时, $R_1 \sim R_{12}$ 、 $Q_1 \sim Q_{12}$ 和 $P_1 \sim P_{12}$ 点波高变化见图 7。可以看出,在航道的前半部分(各组前 4 个点),航道中轴线、航道迎浪侧和背浪侧的波高差异不大,这主要是因为在航道的前半部分,由于原始水深较大,航道的疏浚深度较小,波浪斜向产生的折射现象不明显,因而在航道中轴线、航道迎浪侧和背浪侧的波高差异不大;随着波浪向近岸传播,在航道中间位置(各组中间 6 个点),航道中轴线、航道迎浪侧、航道背浪侧之间波高的差异逐渐变大;随着波浪进一步传播,在航道尾端(各组最后 2 个点),航道迎浪侧和航道背浪侧波高基本相同,且均大于航道中轴线的波高,这是因为波浪传播过程中,由于波浪折射,使得波浪传播到航道后半部分时,波浪入射方向基本与航道中轴线平行,因而在该段航道波浪基本平均向航道两侧折射,所以航道迎浪侧和航道背浪侧的波高基本一样,且均大于航道中轴线的波高。

波浪入射角为 15° 时,航道两侧波高沿程变化率见图 8,其中航道两侧波高变化率为迎浪侧与背浪侧波高之差除以背浪侧波高的百分率。可以看出,在航道的前半部分(各组前 4 个点),航道迎浪侧和背浪侧的波高差异不大,波高变化率在 2%

以内; 在航道中间位置(各组中间 6 个点), 航道迎浪侧和航道背浪侧之间波高的差异逐渐变大, 最大波高变化率为 6.6%; 在航道尾端(各组最后 2 个点), 航道迎浪侧和航道背浪侧波高基本相同, 波高变化率在 2% 以内, 产生该现象的原因与图 7 一致。

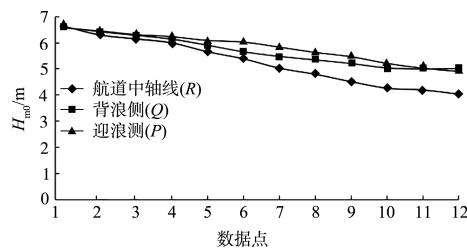


图 7 波高沿程变化

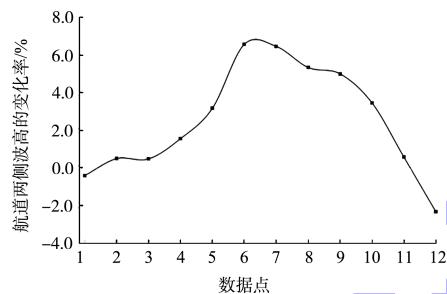


图 8 航道两侧波高沿程变化率

3.3 航道的网格边长对波浪传播规律的影响

在进行波浪数值模拟过程中, 模型的网格尺寸是影响波浪数值模拟结果的重要因素。为定量比较模型的网格尺寸对航道及其周边区域波浪的影响, 现将航道的最小网格边长分别选 4、8 和 20 m, 模型造波边界的波向均取 260° 进行波浪数值模拟, 波浪重现期选择 25 a。不同模型网格边长下 AB 航道中轴线位置波高沿程变化见图 9。

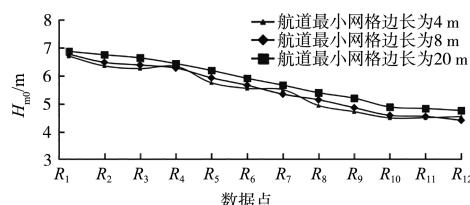


图 9 不同模型网格边长下航道中轴线波高沿程变化

由图 9 可知, 对于航道中轴线处的波高而言, 航道最小网格边长取 8 m 所对应的波高值小于航

道最小网格边长取 20 m 时所对应的波高值。这主要是因为当航道最小网格边长取 20 m 时, 航道的边坡无法完全模拟出来, 即人为地将边坡变缓了, 从而使航道内外之间的水深差变小, 波浪折射现象会减弱, 因而导致该工况下的波高要比 8 m 网格边长下对应的波高大。同时还可发现, 航道最小网格边长取 4 m 所对应的波高值与航道最小网格边长取 8 m 时所对应的波高值基本相同, 这说明采用 8 m 网格边长已经可以较为准确地模拟出航道边坡。

由于航道最小网格边长越小, 数值模拟所需要的时间就会越长, 根据图 9 得出的结论可知, 当航道最小网格边长取 8 m 时, 即网格边长相对于航道边坡宽度为 0.12(即 8 m/68 m) 时, 航道边坡可以较为准确地模拟出来, 且数值模拟的时间较短。

4 结论

1) 航道疏浚后, 当波浪入射角为 0° 时, 航道迎浪侧和背浪侧的波高沿程分布规律不同, 其中在航道的前半部分, 航道两侧的波高基本相同; 在航道中间位置和航道尾端, 靠近航道迎浪侧的波高大于航道背浪侧的波高。

2) 航道疏浚后, 当波浪入射角为 15° 时, 航道迎浪侧和背浪侧的波高沿程分布规律不同, 其中在航道的前半部分, 航道迎浪侧和背浪侧的波高差异不大, 波高变化率在 2% 以内; 在航道中间位置, 航道迎浪侧和航道背浪侧之间波高的差异逐渐变大, 最大波高变化率为 6.6%; 在航道尾端, 航道迎浪侧和航道背浪侧波高基本相同, 波高变化率在 2% 以内。

3) 航道最小网格边长越小, 数值模拟所需要的时间就会越长, 通过对比不同网格边长的数值模拟结果可知, 当航道最小网格边长取 8 m 时, 即网格边长相对于航道边坡宽度为 0.12 时, 航道边坡可以较为准确地模拟出来, 且数值模拟的时间较短。

(下转第 34 页)