

水东湾落潮三角洲海区底摩擦 对波浪变形的作用*

陈子燊

(中山大学河口海岸研究所, 广州 510275)

摘要 本文应用底摩擦作用下的波折射—绕射联合计算数值模型模拟了粤西水东湾落潮三角洲海区的波变形过程. 计算结果表明, 落潮三角洲平台的底摩擦作用导致了波高的明显衰减, 通道口两侧的边缘砂咀可引起入射波的折射作用. 在一定波况下, 碎波带范围的变化主要与潮位相相联系.

关键词 底摩擦, 波折射—绕射作用, 落潮三角洲

从深水区向岸传播的波浪在近岸区受到海底地形的作用, 经历了浅水、折射、绕射和底摩擦消能等一系列变形过程, 并最终在岸线附近的浅水地带发生破碎. 在地形作用下的波变形而导致的波高、波向变化的研究对于海岸演变过程和海岸工程建设具有重要的意义. 20世纪上半叶, 人们为了获取由于海底地形引起的波折射后的波要素值, 发展了图解的手工绘图方法^[1]. 显然, 手工绘图相当费时, 对复杂海底地形的处理具有人为主观性, 而且绘图精度低. 60年代以来提出了一些波折射的数值计算方案^[2~4], 但在复杂海底地形海区通常面临着波向线相交的理论难题和由于单纯波折射理论的数值计算对海底地形的敏感性而对同一海区地形处理中的稍许差别将导致明显不同的数值计算结果, 由此增大了实际应用中的不确定性.

Berkhoff^[5]导出的包括波折射绕射联合作用的椭圆缓坡方程标志着在波变形数值模拟方面取得了重要进展. 在此基础上, 众多的研究人员提出了许多适于不同环境条件下的数值计算方法^[6~10]. 然而, 大部分数值计算方法中不包括底摩擦效应, 而这种底摩擦引起的波高衰减在宽阔的浅水区是非常显著的. 对此, Weight等^[11]在澳大利亚众多海滩—碎波带现场观测过程中, 指出了近岸带海底地形的摩擦效应对海滩过程的重要作用. 本文在文献^[7,8]提出的线性波折射—绕射联合计算数值模型基础上, 进一步考虑了底摩擦对波高的衰减作用, 并和理论解析解相验证, 最后应用于广东省东湾落潮三角洲海区的波变形数值模拟.

收稿日期: 1995-07-03

* 国家自然科学基金资助项目

1 数值计算方法

1.1 基本方程

Berkhoff^[5]导出的缓变水深中波传播控制方程为:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla h) + \frac{C_g}{C} k^2 h = 0 \quad (1)$$

式中, $\nabla = \partial/\partial x_i + \partial/\partial y_j$; C 为波相速, $C = \frac{k}{K}$; C_g 为波群速; k 为波动圆频率, $k = 2\pi/T$; T 为波周期; K 为波数, $K = 2\pi/L$, L 为波长; h 为复值速度势函数, $h = ae^{is}$; a 为波振幅; S 为波相位函数.

对方程 (1) 分别求解虚实两部分得:

波能传输方程

$$\nabla \cdot (CC_g a^2 \nabla s) = 0 \quad (2)$$

和波相位函数方程

$$|\nabla s|^2 = K^2 + \frac{1}{CC_g} \nabla \cdot (CC_g \nabla a) \quad (3)$$

根据线性波波相位函数梯度无旋性质的假设, 有

$$\nabla \times (\nabla s) = 0 \quad (4)$$

可将波相位函数梯度写成矢量表达式:

$$\nabla s = |\nabla s| \cos\theta \vec{i} + |\nabla s| \sin\theta \vec{j} \quad (5)$$

式中, θ 为波向角.

方程 (2)~(4) 及波弥散方程

$$k^2 = K^2 \tanh kh \quad (6)$$

即构成了求解线性波传播过程中无底摩擦耗能的波折射——绕射联合数值计算的基本方程组.

文献 [7, 8] 对上述方程组应用有限差分格式作了数值计算, 对于波破碎后的波高变化过程则以经验公式加以模拟.

1.2 底摩擦作用

根据 Nielsen^[12]提出的波能损耗 T

$$T = \frac{2}{3c} df_e U_b^3 = f_b U_b \quad (7)$$

式中, f_b 为波浪对海底的最大剪切应力; U_b 为波浪水质点在近底处的最大水平速度; d 为水体密度; f_e 为底摩擦系数.

可得到波浪前进方向上的波能衰减系数 K_f 为

$$K_f = \left(1 - \frac{f_b U_b \Delta x \sec\theta}{E \cdot C_g}\right)^{1/2} \quad (8)$$

式中, E 为波能, $E = \gamma_g H^2 / 8$, H 为波高; $\Delta x \sec\theta$ 为波传播距离.

底摩擦系数 f_e 的预报由下式确定^[13]:

$$f_e = \begin{cases} \exp[-5.977 + 5.213(\frac{r}{ab})^{0.194}] & \text{当 } \frac{r}{ab} \leq 0.63 \text{ 时} \\ 0.3 & \text{当 } \frac{r}{ab} > 0.63 \text{ 时} \end{cases} \quad (9)$$

式中, r 为等效粒径糙率; a_b 为近底水质点位移振幅, 等于 U_b/k .

Nielsen^[14]提出的计算总糙率的表达式为:

$$r = 190D \sqrt{\theta' - 0.05} + 8 \frac{Z}{\lambda} \quad (10)$$

式中, Z 为沙放高度; λ 为沙纹长度; D 为泥沙平均粒径; θ' 为表摩擦希尔兹参数, $\theta' = \frac{1}{2} f_e j$, j 为运动性参数, $j = U^b / [(s-1)gD]$, g 为重力加速度; s 为泥沙相对密度, 等于 d/d_s , d_s 为泥沙密度.

当 $\theta' \leq 0.05$ 时, $r = 2.5D$, 表示平坦定底床时糙率, r 只与泥沙休止角及先前波况有关; 当 $0.05 < \theta' \leq 1$ 时, 式 (10) 右侧第 2 项 (沙纹陡度) 随波况而变; 当 $\theta' > 1$ 时, 沙纹消失, 通常此与波碎有关, 式 (10) 变为

$$r = 190D \sqrt{\theta' - 0.05} \quad (11)$$

式 (11) 为预报平坦动底时的糙率公式.

计算沙纹形态的表达式^[15]为:

$$\frac{Z}{\lambda} = 0.342 - 0.34\theta'^{1/4} \quad (12)$$

$$\frac{Z}{a_b} = \begin{cases} 0.275 - 0.022j^{1/2} & \text{当 } j \leq 10 \text{ 时} \\ 21j^{-1.85} & \text{当 } j > 10 \text{ 时} \end{cases} \quad (13)$$

2 底摩擦效应的验证与灵敏性分析

底摩擦对波高的衰减作用的验证采用了间接的方法, 在文献 [7] 的数值模型基础上, 编入计算底摩擦效应的子程序. 数值验证中使用了千分之二的固定海底坡度, 水深 40m 和垂直入射波的两种波况: 波高 1m, 周期 5.5s 和波高 2.5m, 周期 8s. 由于选择了此类型海底地形和波浪垂直入射, 入射波的波高沿程变化将不受到折射与绕射作用的影响, 即波高变化只与浅水作用和底摩擦效应有关. 计算中底摩擦系数 f_e 固定为 0.03. 计算结果与 Nielsen^[12] 的解析解的比较见图 1. 图 1 说明数值计算结果和 Nielsen 的解析解是相近的. 两种初时波况下, 底摩擦效应的数值结果与 Nielsen 解析解最大相对波高差小于 11%, 而无底摩擦作用时在波碎前相对波高差达 56%.

使用不同的 f_e 值与由公式 (9) ~ (13) 计算的波高变化结果见图 2. 由式 (9) ~ (13) 计算的底摩擦系数 f_e 在小浪时大于 0.05, 而在大浪时, f_e 小于 0.05. 这一结果是由于小浪条件下, 沙纹糙率加大造成了波高更大的衰减 (图 2a), 而在大浪条件下, 沙纹可为波浪所荡平或波水质点近底振幅增大, 因而总糙率反而减小. 以上说明, 底摩擦系数非定常值, 其是波况与泥沙组成的函数. 在数值计算中, 采用式 (9) ~ (13) 计算底摩擦系数对波高的效应更为合理.

3 实际海区波变形数值计算

实际海区选择广东西部水东湾落潮三角洲海区. 落潮三角洲地形由潮汐通道深槽和

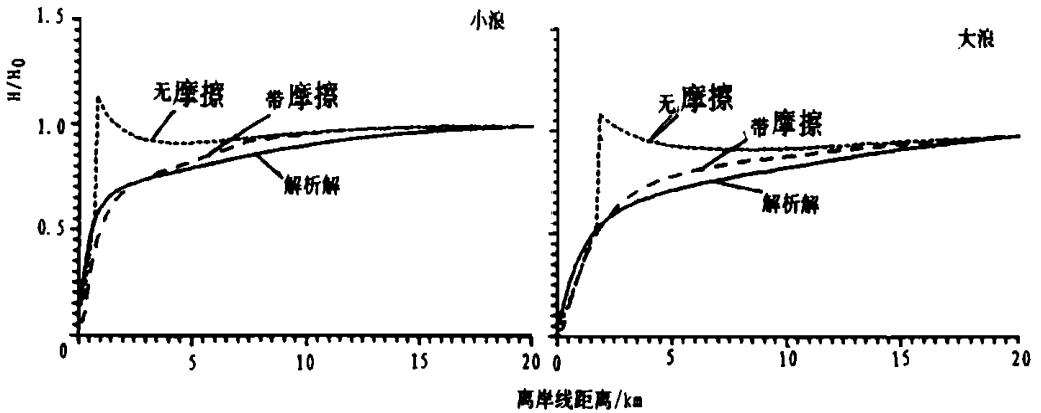


图 1 沿固定底坡垂直入射波波高变化的比较

Fig. 1 Comparison of wave height variations along constant slope

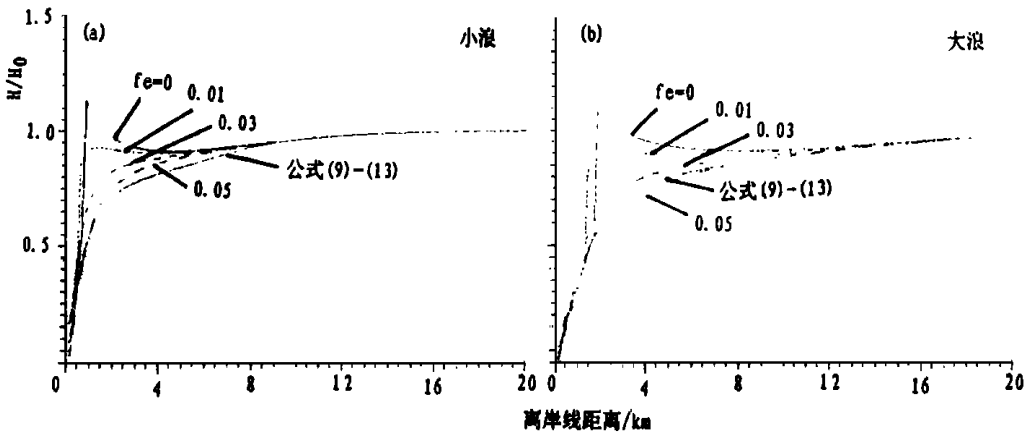


图 2 不同的 f_e 定值与公式 (9) ~ (13) 对波高衰减作用的比较

Fig. 2 Comparison between different constant f_e and equations (9) ~ (13) for wave height attenuations

巨大的中细砂平台构成，平台上选置了次一级地形单元：通道口两侧的边缘砂咀，冲激砂坝和沙波等，水下地形较复杂（图 3）。

数值计算采用了 1: 万海图，对海区水深点先以 200m 采样，再经二维插值成 100m 等距网格，计算范围为 4. 8km× 9. 2km。

海区常浪向和强浪向以 SE 向频率最高，夏季则 SW 向浪为主，年平均波高 0. 69m，平均波周期 3. 6s。计算中采用不同波要素（表 1）以模拟落潮三角洲海区复杂海底地形引起的波折射，绕射和底摩擦对波高、波向变化的作用，并反映波破碎区在不同潮位相条件下的变化。

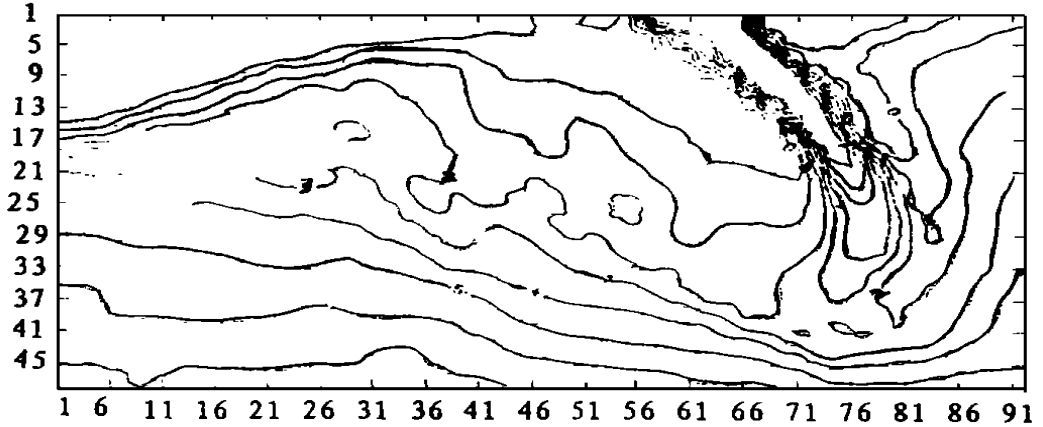


图3 水东湾落潮三角洲地形

Fig. 3 Topograph of the ebb delta in Shuidong Bay

表1 数值计算采用的波要素和潮位

Tab. 1 Wave conditions and tidal stages used in numerical computaitons

波向	SE				S	SW
波高 (m)	0.74	2.5	2.5	2.5	0.69	0.77
周期 (s)	3.6	5.5	5.5	5.5	3.4	3.6
潮位	中潮	低潮	中潮	高潮	中潮	中潮

数值计算结果见图4。其中,波高、波向变化每隔两点以矢量表示,波破碎带按实际位置以圆点表示。

计算结果分析:常波况下,落潮三角洲主体浅水地带的底摩擦作用是导致波高减小的主要因素。通道的两侧的边缘砂咀的堆积性岬角性质的“透镜效应”引起的波向偏转与波的幅聚作用视初时波向有所差异:SE向入射波与通道深槽近于平行,当波浪越过落潮三角洲前缘斜坡后,波能持续衰减,并可形成向两侧边缘沙咀的折射与幅聚,从而使进入通道深槽的波高进一步减小(图4a);S向入射波情况下也可形成与SE向入射波相似的结果(图4b)。SW向波与落潮三角洲等深线大致垂直,入射波通过落潮三角洲西侧平台和沙咀时,波高递减,波折射作用较弱,但在通道东侧沙咀前缘波向有所偏转(图4c)。

常浪下,入射波进入落潮三角洲后,受到沿程底摩擦耗能作用大于地形对波浪的折射幅聚作用,因此,除了SE向波在西边缘砂咀的幅聚可形成连续破碎过程外,波的破碎主要发生在落潮三角洲西侧岸线附近。

SE向大浪和不同的潮位相组合,地形导致的波折射作用与常浪下基本相同,但自低潮位相向高潮位相,碎波带范围有所缩窄,而底摩擦对波高的衰减效应则随水深增大而明显减小。

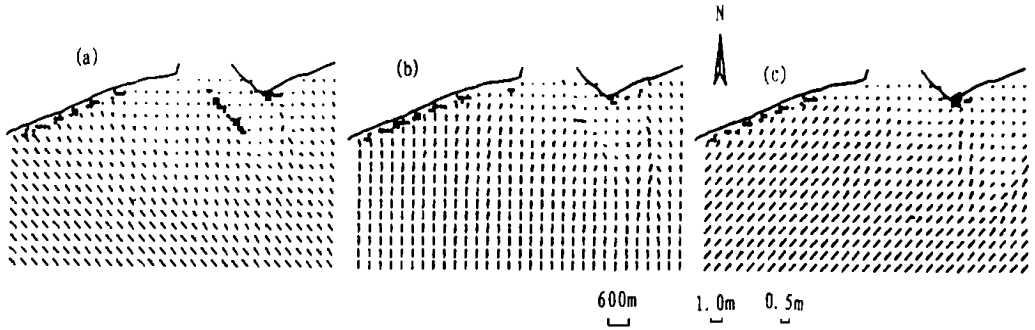


图4 各种波况时落潮三角洲海区波场

Fig. 4 Wave field of the ebb delta under different incident wave condition

a SE向; b S向; c SE向

4 结 语

近岸带波变形是一种十分复杂的过程,其包括了折射、绕射、底摩擦效应、波波相互作用、波一流相互作用、风对波成长作用和内摩擦等一系列机制。目前尚无法对所有的波变形过程给予完全的精确数值描述,但大量研究已表明,在复杂地形海区,应用波折射、绕射和底摩擦引起的波变形数值模拟已可反映近岸带波变化与分布的最主要特征。本文对水东湾落潮三角洲海区底摩擦作用下的波折射—绕射过程的数值计算,在很大程度上说明了此海区近岸带主要波场特征,弥补了对此海区单点波要素测量资料的不足,并对落潮三角洲及邻近海岸泥沙输运和地形变化的分析提供了必要的波动力分布。

参 考 文 献

- 1 Arthur R S, Munk W H, Isaacs J D. The direct construction of wave rays. *Trans Am Geophys Un* 1952, 33 (6): 855~ 865
- 2 路季平. 海浪折射波高的数值计算. *山东海洋学院学报*, 1978, 2 1~ 10
- 3 Gridwold. Numerical calculation of wave refraction. *J Geophys Res* 1963, 84 (C8): 4855~ 4864
- 4 Skovgaard O, Jønsson I G. Current depth refraction using finite elements. *Proc 15th Coastal Eng Conf*, 1976, 721~ 737
- 5 Berkhoff J C W. Computation of combined refraction-diffraction. *Proc 13th Int Conf on Coastal Engng*, ASCE, New York, 1972, 1471~ 1490
- 6 Panchang V G, Vushman-Roisin B, Pearce B R. Combined refraction-diffraction of short waves in large coastal regions. *Coastal Engng*, 1988, 12(2): 133~ 156
- 7 Ebersole B A. Refraction-diffraction model for linear wave wave. *J Waterway, Port, Coastal and Ocean Engng*, ASCE, 1985, 111 (6): 939~ 953
- 8 Ebersole B A, Cialone M A, Prater M D. Regional coastal processes numerical modeling system, report 1, a linear wave propagation model for engineering use. *Tech Report CERC- 86- 4*, Coastal Engng Res Center, Waterways Experiment Station. U. S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Miss 1986

- 9 Kirby J T. Rational approximations in the parabolic equation method for water waves. *Coastal Engrg*, 1986, 10 355~ 378
- 10 Liu P L - F, Tsay T - K. Numerical prediction of wave transformation. *J Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg*. ASCE, 1985, 111 (5): 843~ 855
- 11 Wright L D, Short A D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Mar Geol*, 1984, 56 93~ 118
- 12 Nielsen P. Analytical determination of nearshore wave height variation due to refraction, Shoaling and friction. *Coastal Eng* 1983, 7 233~ 251
- 13 Jonsson I G, A new approach to oscillatory, rough turbulent boundary layers. *Ocean Engrg* 1980, 7 (1): 109~ 152
- 14 Nielsen P. Dynamics and geometry of wave generated ripples. *J Geophys Res*, 1981, 86 (C7): 6467~ 6472

Effects of Bottom Friction on Wave Transformation in Ebb Delta Area of Shuidong Bay

*Chen Zishen**

Abstract Applying a numerical model of combined wave refraction-diffraction with bottom friction, the wave transformation processes in the ebb delta of Shuidong Bay, western Guangdong Province are simulated in this paper. The results show that the bottom friction induced by the platform of the ebb delta results in the obvious attenuation of the wave heights. The edge sand spits in both sides of the inlet could cause the refraction of incidence waves. And the variation of the limit of the surf-zone are mainly related to the tidal staged under certain wave conditions.

Keywords bottom friction, wave refraction-diffraction, ebb delta

* Institute of Estuarine and Coastal Research, Zhongshan University, Guangzhou 510275