



基于抛物型缓坡方程的某码头泊稳问题研究*

赵博博¹, 吴丽芬²

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 江苏中信安全环境科技有限公司, 江苏 南京 210006)

摘要: 从理论出发介绍了抛物型缓坡方程的特点, 并阐述了抛物型缓坡方程的使用限制条件; 根据实际工程的需要, 运用基于抛物型缓坡方程的REF/DIF模型对大连将军石码头改进后的两种方案的波高进行了模拟和研究, 模拟结果表明经改进后方案1和方案2均能满足港内泊稳条件, 方案1要更优于方案2。

关键词: 抛物型缓坡方程; 码头; 泊稳分析

中图分类号: U 698

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)01-0016-04

Research on steady mooring of pier based on parabolic mild-slope equation

ZHAO Bo-bo¹, WU Li-fen²

(1. Engineering College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Jiangsu Zhongxin Safety & Environmental Technology Co., Ltd., Nanjing 210006, China)

Abstract: The characteristics and restrictions of the parabolic mild-slope equation are described from the theoretical basis. According to the needs of the practical engineering, wave heights of the two improved programs on Dalian general-stone pier are simulated and researched using the REF / DIF model based on the parabolic mild slope equation. The simulation results show that both program 1 and program 2 can meet the harbor mooring conditions, and program 1 is better than program 2.

Key words: parabolic mild-slope equation; pier; mooring analysis

波浪是近岸海域最主要的水动力因素之一。波浪由外海传播至近海时, 由于地形和建筑物的影响将发生折射、绕射、反射、浅水变形、破碎、再生等一系列变形。对于近岸工程的一些实际问题来说, 这些变形对安全和使用有着至关重要的影响, 所以要确定所要研究区域的波浪场。因为它是近岸海域水工建筑物的规划设计、预报海滩和海岸地形迁移变化、研究近海污染物的运输规律和排污工程的设计中所考虑的关键水动力因素之一。在海岸工程中, 波高作为波浪要素之一往往是实际工程的重要参数。结构物的存在影响了波浪场的形态, 改变了海上的波高分布, 从而对港内泊稳条件产生影响。

抛物型缓坡方程主要是用来研究近海浅水区域波浪的折射、绕射、破碎和浅水变形等物理现象的, 它基于海岸要素在海浪周期和波长的时空度上缓变的事实, 描述波浪要素的变化。目前国内直接关于抛物型缓坡方程的应用研究较少。王红川^[1]利用深水和浅水情况下的波高和风速的关系式推导了高阶非线性抛物缓坡方程中的风能输入项的表达式, 对瓯江口水域的波浪传播变形进行计算。唐军等^[2]考虑近岸波浪在植被区传播中的折射、绕射、破碎及植被引起的波能耗损效应, 基于抛物线缓坡方程建立了模拟近岸植被区波浪传播的数值模型, 对模型进行了数值模拟验证, 采用数值模拟试验分析了植被对波浪传播的影

收稿日期: 2012-05-13

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179178)

作者简介: 赵博博(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口海岸工程及其与海洋环境相互作用。

响。李绍武等^[3]在建立了基于抛物型缓坡方程的波浪变形数值预报模型的基础上, 计算了波浪破碎前堤后绕射及浅滩上的折射现象。

以上有关抛物型缓坡方程应用研究, 没有从泊稳问题的角度分析。本文主要基于抛物型缓坡方程对将军石码头泊稳条件进行了研究。可分为两个部分, 首先从理论出发, 介绍了抛物型缓坡方程并阐述了抛物型缓坡方程的使用限制条件, 其次在根据实际工程的需要, 运用抛物型缓坡方程对大连将军石码头内改进前和改进后的波高进行了波高的模拟和研究。

1 抛物型缓坡方程理论

Berkhoff^[4]从描述水波运动的三维Laplace方程出发, 提出了著名的“缓坡方程”, 又称联合折射绕射方程。在无旋无黏无不可压的线性小振幅波动假设下, 该方程为:

$$\nabla(C_g C \nabla \phi) + k^2 C C_g \phi = 0 \quad (1)$$

$$\phi(x, y) = \Phi(x, y, z, t) \frac{\text{ch}(kh)}{\text{ch}[k(kz)]} e^{i\omega t} \quad (2)$$

式中: ϕ 表示水平方向的势函数, ω 为圆频率, C 代表相速度, $C = \frac{\omega}{k}$, C_g 代表波群速度, $C_g = \frac{d\omega}{dk}$, k 代表波数。 ω 和 k 满足下面的弥散关系式:

$$\omega^2 = gkh(kh) \quad (3)$$

上述缓坡方程及其简化方程属线性波动理论范畴, 方程中没有考虑底摩擦波能损失、波浪破碎、波浪的非线性、不规则波、海底陡波、波流相互作用等。为了考虑这些作用, 许多学者对上述缓坡方程及其简化方程作了不同程度的修正和改进, 建立了形式众多的改进型缓坡方程, 进一步提高了缓坡方程计算近岸海浪的精度。

Radder^[5]假定波浪传播运动主要沿某一主方向进行, 使用行波法把波分解为前进波和反射波, 忽略了波浪的反射作用, 在椭圆型缓坡方程的基础上首先提出了抛物型缓坡方程; Kirby等^[6]利用stockes波色散关系对Radder的抛物型缓坡模型进行了修改, 使之可考虑波浪中的弱非线性; Kirby用有理式近似得到的高阶抛物型近似方程, 也允许波浪的大角度传播^[7], 还对波浪传播的非线性影响进行了大量研究。Kirby利用pade'展开和鞍点法把入射角从45°提高到60°, 同时考虑了波浪破

碎、底部摩擦等损耗与非线性频散关系, 得到了沿x方向传播的高阶近似的抛物形缓坡方程^[8]:

$$C_g A_x + i(\bar{k} - \beta_0 k) C_g A + \frac{1}{2} (C_g)_x A + \frac{i}{\omega} \left[\beta_1 - \beta_2 \frac{\bar{k}}{k} \right] (C C_g A_y)_y - \frac{\beta_2}{\omega k} (C C_g A_y)_{yx} + \frac{\beta_2}{\omega} \left[\frac{k_x}{k^2} + \frac{(C_g)_x}{2k C_g} \right] (C C_g A_y)_y + \frac{i\omega k^2}{2} D |A|^2 A + \frac{W}{2} A = 0 \quad (4)$$

式中: C_g 为群速, $C_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] C$; C 为波速; A 为复波幅函数; i 为波数; ω 为圆频率; \bar{k} 是特征波数; $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 为系数, 取不同值, 方程会有不同近似; D 是非线性影响因子; W 是波能损耗和发生因子。

抛物型缓坡方程在模拟波浪破碎时主要采用的是极限波高准则:

$$\gamma_b = \frac{H_b}{d_b} = 0.78 \quad (5)$$

模型在计算波浪的绕射与折射时主要采用的是相位分解法, 因为缓坡方程是基于线性波理论推导出来的, 故也满足线性弥散关系, 即

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh) = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (6)$$

2 工程实例

2.1 工程介绍

大连为发展旅游经济, 欲在大连瓦房店市西杨乡将军石湾拟建将军石水上运动中心。将军石湾位于复州湾与太平湾之间, 湾口正北, 在湾口西侧有岩礁出露, 对西向风浪有一定的自然掩护, 岩礁前沿有海蚀柱谓将军石, 为当地著名景点。地理位置为东经121°41', 北纬39°55'。图1显示了将军石的水深地形, 图中有两段防波堤, 分别位于西边和北边堤, 防波堤口门处的水深为10 m, 防波堤的入口处有一航道此处水深是10 m, 用以船舶的掉头。

目前共有两种设计方案进行选择, 其中方案1为主要方案, 方案2为备选方案。初期方案已经大体设定, 但经过计算发现, 方案1在WNW方向入射时不能满足泊稳条件, 方案2在W方向入射时不能满足泊稳条件要求。故对原方案进行了修正,

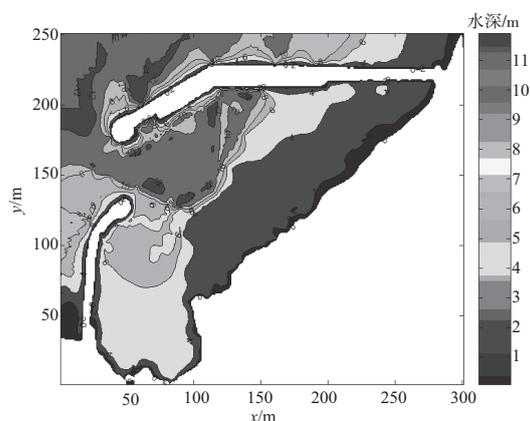


图1 将军石码头水深地形

修正后方案的水深地形分布如图2和图3。图2是方案1修改后的水深地形图，图3是方案2修改后的水深地形图。两种方案都是拆除西边的防波堤建设一个新的防波堤。

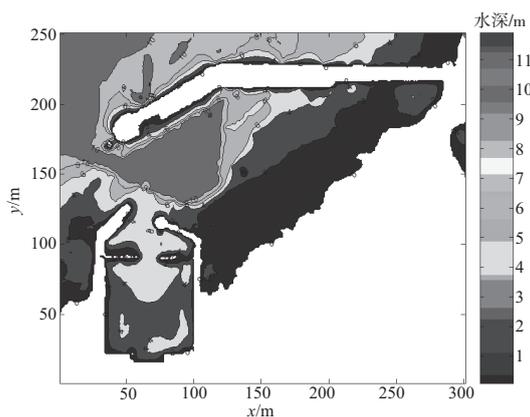


图2 修改后方案1的水深地形

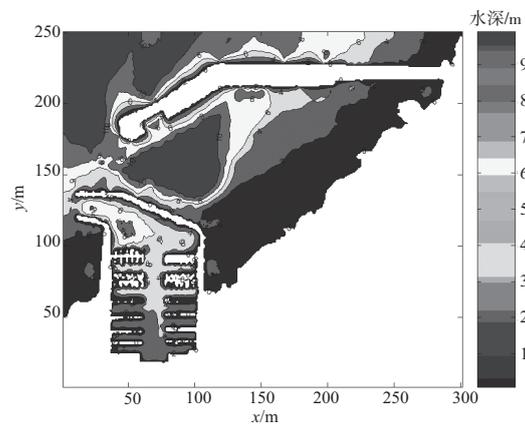


图3 修改后方案2的水深地形

2.2 波浪模型参数设定

本文所采用的抛物型缓坡方程波浪模型是美国特拉华大学的REF/DIF模型。它是基于前面理论

的一种波浪模型，它的主要优势就是方便快捷地计算出波浪经过折射、绕射、破碎和浅水变形后波浪的变化情况。

本文计算过程中所采用的水深数据来自2004年的海图，计算过程中的水位基准面采用的是当地的平均海平面。计算过程中 x 方向的空间步长为5 m， y 方向的空间步长为4.5 m， x 方向的空间步数为301步， y 方向的空间步数为251步，容许水深为10 m。水深为9 m时，W，WNW和WSW方向入射的有效波高为2.37 m，周期为5.86 s；水深为6 m时，W，WNW和WSW方向入射的有效波高为2.58 m，周期为6.58 s。计算过程中，频谱是按等频率进行划分的，最大频率为0.03 Hz，最小频率为0.8 Hz，共划分为24份，方向谱是按等弧度进行划分，共划分为18份，入射角为 0° ，计算过程中考虑了波浪破碎紊动所导致的能量损失，波浪破碎参数取为0.76，计算过程中为了考虑波浪的非线性作用，故在计算中选用了斯托克斯波，且不考虑底部渗透导致的能量损失。计算过程中由于波浪是由外海传播过来的，为了与实际情况相符，故在计算中采用了开边界。底部摩擦系数采用的是默认值。计算过程中为考虑泊位对波浪传播的影响，由于该地区地形水深坡度较为平缓，故在计算中可不考虑放射波的影响。

2.3 结果分析

图4~6是方案1在3个方向入射波入射情况下的波高分布情况，图中有6条横线，他们代表了泊位的位置。从这3个图中可以看出无论波浪从哪个方向入射，波高在到达游艇码头的口门处波高只有0.2 m，随着水深的变化和底部摩擦的作用，波浪向港内传播，随着水深的变浅而逐渐的减小。由于在外口门处有深水航道的作用，故波浪传播过程中有一段波高会变高，这种现象在图7中体现的的比较明显。

图7~9是备选方案2在3个方向入射波入射情况下的波高分布情况。从图中可以看出，方案2在3个方向上也都能同时满足港池内部泊稳条件的计算，但同时也可以发现，方案2在口门处的波高普遍比方案1要高，且方案2在入射波为WNW方向

时, 波浪能往港池内传播很长一段距离, 在不考虑泊位影响条件下, 第 1 个泊位正好与波高为 0.2 m 的等高线相交, 且方案 2 口门处的波高普遍能达到 2 m 左右, 这不利于船舶的出行。由于本次计算过程中没有考虑风场的作用, 故假若加上风场力的作用, 方案 2 港池内的波高会更大。故就整体的泊稳的安全性而言方案 1 要优于方案 2。

3 结论

通过以上的计算可以发现, 抛物型缓坡方程

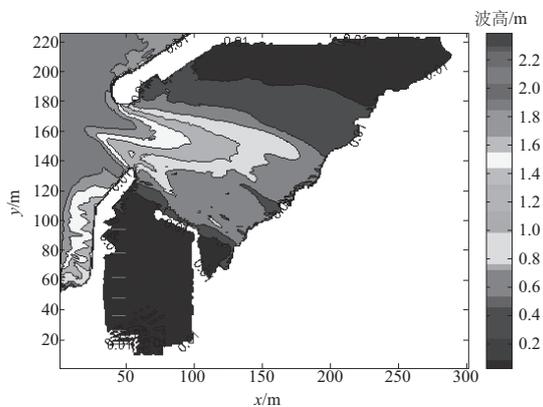


图 4 方案 1 WNW 方向入射波高

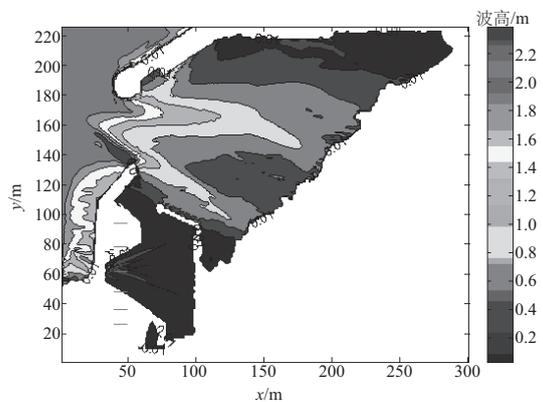


图 5 方案 1 W 方向入射波高

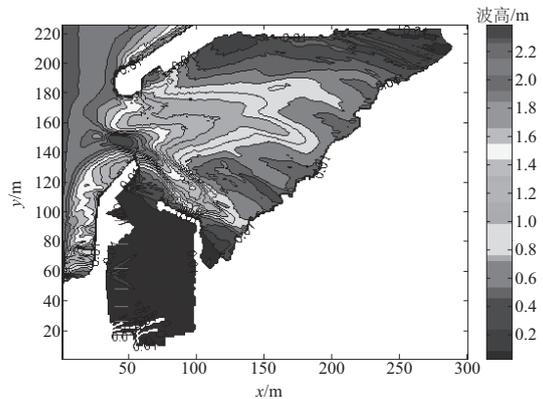


图 6 方案 1 WSW 方向入射波高

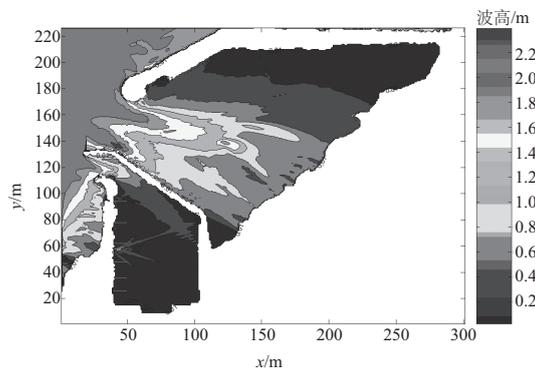


图 7 方案 2 WNW 方向入射波高

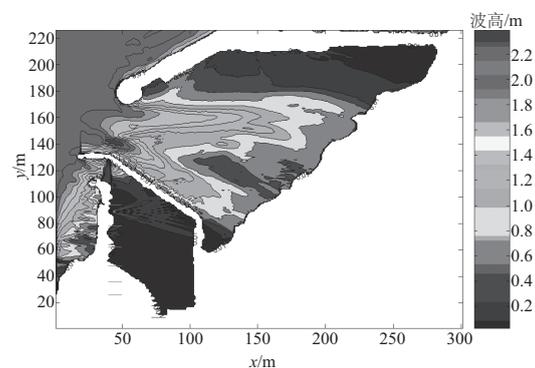


图 8 方案 2 W 方向入射波高

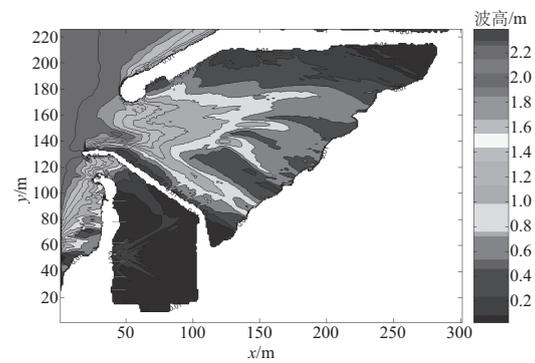


图 9 方案 2 WSW 方向入射波高

虽然忽略了反射波的影响, 但是也能正确反应港池内波高的变化情况。但由于抛物型缓坡方程是基于线性波理论推导出来的, 故其弥散关系还是满足线性的弥散关系, 虽在计算过程中采用斯托克斯波来考虑波浪的非线性, 但波波相互作用等非线性作用未能被较好的考虑。

就将军石码头泊稳条件而言, 方案 1 比方案 2 更加的稳定也更加的可靠。修改后的两种方案都能满足 2 a 一遇波高的泊稳条件。故修改后的两种方案是合理可取的。

(下转第 24 页)