

工程爆破冲抛悬浮物潮对流扩散的数值预测^{*}

侯 玉 黎 坤

刘万根

(中山大学地理学系, 广州 510275)

(珠江水利委员会)

摘 要 建立了工程爆破冲抛悬浮物潮对流扩散数值预测二维模型, 并利用此模型预测了南海大亚湾马鞭洲原油码头场地平整 (爆破填土) 工程冲抛悬浮物对周围海域的影响, 取得了较满意的结果.

关键词 爆破, 悬移质, 扩散, 预测

分类号 X 824

近年来, 在海岸线整治、岛屿开发建设中, 工程爆破日益频繁, 工程爆破造成的环境影响, 特别是爆破中冲抛悬浮物对周围海洋水环境的影响是海洋工程爆破环境评价的重点. 本文系统考虑海洋工程爆破中悬移质的源、汇项及悬移沙的沉降和再悬浮作用, 建立了相应的悬移质潮数值对流扩散模拟模型, 并预测了南海大亚湾马鞭洲原油码头场地平整爆破填土工程冲抛悬浮物对周围海洋环境的影响.

1 数值模式

1.1 基本方程及定解条件

若爆破点附近海域泥沙粒径分布较均匀, 可用平均粒径代替整个粒径范围, 忽略推移质输沙, 则垂向平均二维悬沙对流扩散方程为^[1]

$$\text{水流方程} \quad \frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(Y-h)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(Y-h)v] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{g}{C^2} \frac{u}{(Y-h)^3} = \lambda \Delta u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu - g \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{g}{C^2} \frac{v}{(Y-h)^3} = \lambda \Delta v \quad (3)$$

泥沙对流扩散方程

$$\frac{\partial (u^* H^* S)}{\partial x} + \frac{\partial (v^* H^* S)}{\partial y} + \frac{\partial (H^* S)}{\partial t} = -T^* w (S - S^*) \quad (4)$$

其中, Y 是水位, 理论深度基准面至水面距离 (m); h 是水深, 海底至理论深度基准面的距离, H 是海底至水面的距离; u, v 分别为垂向平均流速在 x, y 方向上的分量; C 为谢才系数, $C = \frac{1}{n} (Y-h)^{1/6}$; n 为糙率; f 为柯氏系数; Q 为垂向平均流速; λ 为涡动粘滞系数 (m^2/s); S 为垂向平均含沙量 (mg/L); S^* 为水流挟沙力 (mg/L); w 为垂向平均泥沙沉速 (m/s); a 为泥

^{*} 收稿日期: 1996-06-24 侯玉, 男, 31岁, 讲师

沙沉降机率; $\Delta = \partial / \partial x^2 + \partial / \partial y^2$.

水流方程相应初始条件为计算开始时刻 ($t=0$) 的水位和流速, 可取其等于 0, 即:

$$S(x, y, 0) = 0, \quad u(x, y, 0) = 0, \quad v(x, y, 0) = 0 \quad (5)$$

边界条件为沿岸线的陆地闭边界以及计算域与其它水域相连的开边界. 在陆地闭边界上取法向流速为 0, 在开边界上则用实测水位控制.

相应地, 悬移质泥沙对流扩散方程的初始条件为在计算开始时刻 ($t=0$) 的悬移质浓度. 其中爆破点附近海域悬移质泥沙浓度取抛入水中的细颗粒泥沙在爆破点附近海域充分混合后的平均浓度, 设为 S_1 , 则

$$S(x, y, 0) = S_1 \quad (6)$$

在离爆破点较远处海域悬移质泥沙浓度为涌浪掀沙在垂向上的平均值 S_2 , 则

$$S(x, y, 0) = S_2 \quad (7)$$

在闭边界上, 无水流和悬移质泥沙交换, 即:

$$\frac{\partial S}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = 0 \quad (8)$$

在开边界上, 则有悬移泥沙的交换. 若水流流入计算域, 边界点上泥沙浓度等于水域泥沙浓度本底值 S_0 , 则

$$S(x, y, t) = S_0 \quad (9)$$

若水流流出计算域, 则有

$$\partial S / \partial n + Q \cdot \partial / \partial n = 0 \quad (10)$$

上述诸方程及定解条件即构成了工程爆破后悬浮物潮对流扩散的数学模拟模式.

1.2 数值计算差分格式

工程爆破情况下, 评价悬浮物潮对周围海域的影响, 常要对爆破点附近海域的流场、悬移质泥沙浓度场做较详细了解, 因此要求数值计算中爆破点附近海域数值计算差分网格划分较之离爆破点较远处海域差分网格划分密一些. 文献^[2,3]提出的数值求解方法可以较好地满足这一要求. 具体地将计算区域剖分成若干三角形单元网格. 水流方程和悬浮物对流扩散方程差分化后计算格式为:

$$Y^{n+1} = Y^n - \Delta t \{ [\frac{\partial}{\partial x} ((Y-h)u)]_i^n + [\frac{\partial}{\partial y} ((Y-h)v)]_i^n \} \quad (11)$$

$$u_i^{n+1} = \{ u_i^n - \Delta t [v_i^n (\frac{\partial u}{\partial y})_i^n + g (\frac{\partial Y}{\partial x})_i^{n+1} - f v_i^n - \lambda \cdot T \cdot u_i^n] \} / \{ 1 + \Delta t \cdot [(\frac{\partial u}{\partial x})_i^n + g \frac{Q_i^n}{C_i^2 (Y-h)_i^{n+1}} + \lambda U] \} \quad (12)$$

$$v_i^{n+1} = \{ v_i^n - \Delta t [u_i^n (\frac{\partial v}{\partial x})_i^n + g (\frac{\partial Y}{\partial y})_i^{n+1} + f u_i^n - \lambda T \cdot v_i^n] \} / \{ 1 + \Delta t \cdot [(\frac{\partial v}{\partial y})_i^n + g \frac{Q_i^n}{C_i^2 (Y-h)_i^{n+1}} + \lambda U] \} \quad (13)$$

其中, 上角标表示时间; 下角标表示节点号; Δt 为时间步长; U 为系数; U 及 () 内关于 x 和 y 的偏导数的计算式见文献 [2, 3].

浓度场数值计算网格划分同潮流场数值计算网格划分, 相应的差分计算格式为:

在网格节点上 $S_i^{m+1} = \{ H_i^{m+1} \cdot S_i^n + [T \cdot w \cdot S^* - (\frac{\partial}{\partial x} (H \cdot S \cdot u))_i^n - (\frac{\partial}{\partial y} (H \cdot S \cdot v))_i^n] D t \} / (T \cdot w \cdot D + H_i^n)$ (14)

在开边界网格节点上

$$S_i^{n+1} = \{H_i^{n+1} \cdot S_i^n - [(\frac{\partial}{\partial x}(H^{\circ} S^{\circ} u))_i^n + (\frac{\partial}{\partial y}(H^{\circ} S^{\circ} v))_i^n]Dt\} / H_i^n \quad (15)$$

式中,上角标表示时间;下角标表示节点号; Dt 为浓度场计算时段长.连续递推计算(11)~(15)式,即可求得各时刻网格节点上悬移质泥沙浓度值.

2 实例

大亚湾是我国南海北部的一个内海湾,湾内西部有著名的大亚湾核电站,中部有一列南北走向的岛屿——中央列岛和辣甲岛,断断续续将海湾分成东西两大部分.

湾区中部的马鞭洲岛将建设成为一个原油码头,整地平整采用爆破填土方式,估计爆破总土方量 398.2 万 m^3 ,总体抛掷率 38%¹⁾.为了减少对大亚湾的环境影响,爆破采用 4 个爆区分段多次爆破,其中第 2 爆区施放单响药量最大,抛土入海量最多,达 13.492 万 m^3 .爆破入海土方量的 2/3 抛向马鞭洲岛西南侧大亚湾核电站方向,另外 1/3 则抛向岛东南侧.本爆区对大亚湾水环境影响较大,故环境评价中重点以该爆区爆破为主.本文即是大亚湾马鞭洲原油码头场地平整(爆破填土)工程环境评价工作的部分内容,主要讨论爆破抛土悬浮物潮对大亚湾核电站取水口的影响.

2.1 计算评价范围

计算评价范围为平海沙厂—高山角以北水域,总面积约 30 km^2 .数值计算区域三角形网格划分图见马鞭洲原油码头场地平整工程环境影响评价报告¹⁾.

2.2 数值计算基本参数和计算条件

潮流场,浓度场计算时段长分别取 20 s, 40 s,糙率系数率定值为 0.015,泥沙沉速、泥沙浓度本底值等通过调查分析和有关经验公式确定.

(1) 马鞭洲附近海域悬移质泥沙浓度本底值.大潮时,大亚湾大鹏澳海区悬移质泥沙浓度值一般在 50 mg/L 左右,马鞭洲附近海区悬移质泥沙平均浓度约为 10 mg/L .

(2) 悬移质泥沙浓度场数值模拟初始条件.马鞭洲主要由凝灰岩、泥岩等组成.岩土中细颗粒泥沙所占比例约为 8%.单响爆破最大抛土入海量为 13.492 万 m^3 ,其中爆破入海方量的 2/3 抛向岛西南侧,抛距离约 280 m,其它 1/3 抛向岛东南侧,抛距约 150 m.据此可推算爆破初时,马鞭洲西南方向附近海域悬移质泥沙浓度初始值 (mg/L):

$$S_{11} = (2/3)^{\circ} 8\% \cdot r_s \cdot 13.492 \cdot 10^7 / W_1 \quad (16)$$

东南侧附近海域悬移质初始浓度为:

$$S_{12} = (1/3)^{\circ} 8\% \cdot r_s \cdot 13.492 \cdot 10^7 / W_2 \quad (17)$$

其中, r_s 为泥沙颗粒干容量,取为 2650 kg/m^3 ; W_1 为岛西南侧抛距为 280 m 范围内爆破瞬间水体体积; W_2 为岛东南侧抛距为 150 m 范围海域内爆破瞬间水体体积.

爆破初时,爆破入海土方抛距以外海域悬移质泥沙浓度值由涌浪与潮流共同作用下掀沙含量计算公式确定^[4],即

$$S_2 = 0.0273 \cdot r_s (v_1 + v_2)^2 / gd \quad (18)$$

其中, v_1 为潮流流速; v_2 为波动质点运动速度,即爆破涌浪传播速度, $v_2 = 0.2c \cdot Z/d$; c 为波速, Z 为离爆破点径向距离为 R 处的浪高.浪高及波速采用文献^[4]建议的公式进行计算; d 为水深.

1) 中山大学环境科学研究所. 马鞭洲原油码头场地平整工程环境影响评价报告, 1993

(3) 悬移质泥沙沉降速度. 细颗粒泥沙沉降时, 往往发生絮凝现象, 尤其是爆破后瞬间, 爆破点附近海域悬移质泥沙浓度很高, 絮凝现象非常严重. 絮凝对泥沙沉速的影响主要表现在两个方面, 一是含沙浓度, 二是涌潮的混渗作用^[1]. 当涌潮超过一定数值后, 混渗的强度将打散团聚在一起的泥沙颗粒, 这时泥沙沉速按单颗泥沙沉速取值. 爆破后, 涌潮很快衰减消失, 悬移质潮对流扩散主要是在潮流作用下运动变化. 大亚湾区域潮涌高度较低, 混渗作用较弱. 泥沙沉速主要受泥沙浓度影响, 沉速计算表达式取为

$$\begin{aligned} W &= 0.0014^{\circ} S^{0.366} & W > 0.0015 \text{ m/s} \\ W &= 0.0015 & W \leq 0.0015 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (19)$$

2.3 潮流场数值模拟结果

据已有实测资料, 流场、悬移质泥沙浓度场计算从 1993 年 10 月 15 日 10 时至 16 日 10 时. 实测资料有大亚湾北岸霞涌测点 24 h 连续逐时潮位过程, 马鞭洲岛西侧测流点 24 h 连续逐时潮流速、流向过程. 图 1 为霞涌测点潮位实测值与计算值对照图, 图 2 和图 3 分别为马鞭洲测点流速、流向实测值与计算值对照图. 由图可见, 各计算值与实测值吻合良好.

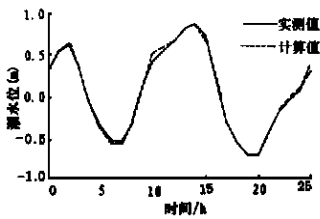


图 1 霞涌站实测潮位与计算潮位比较图

Fig. 1 The actual and predicted tide levels at Xiacong site

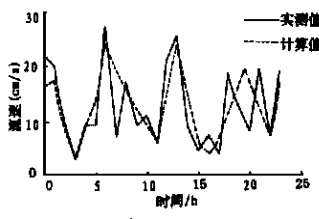


图 2 马鞭洲站实测流速与计算流速比较图

Fig. 2 The actual and predicted flow velocities of tide at Mabian site

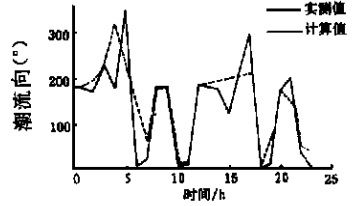


图 3 马鞭洲站实测流向与计算流向比较图

Fig. 3 The actual and predicted flow directions of tide at Mabian site

2.4 爆破后悬移质潮对流扩散数值预测

爆破后悬移质潮对流扩散数值预测一般分 4 种情况进行, 即分别考虑涨急、落急、平潮和停潮情况下爆破后悬移质潮的对流扩散. 这 4 种情况基本反映了爆破后悬移质潮对周围海域环境影响的最有利和最不利情形. 由于马鞭洲工程爆破的环境影响是多方面的 (如地震、涌浪、超压等), 文献^[1]综合分析各方面因素后, 建议马鞭洲工程爆破定在退潮落急时进行, 故下面只列出落急时爆破后 1 h、3 h、5 h 和 7 h 时马鞭洲附近海域悬移质浓度增量分布, 见图 4. 由图可见, 爆破后 1 h, 大亚湾模拟区 1/2 面积上爆破增加的悬移质泥沙浓度在 10 mg/L 以上, 但大亚湾核电站取水口附近悬移质增加浓度在 5 mg/L 以下, 小于大亚湾核电站规定的悬移质泥沙浓度增值标准 5 mg/L; 3 h 后, 5 mg/L 悬移质浓度增量等值线进一步减小.

3 结 语

本文对工程爆破所引起的悬浮物潮对周围海域水环境影响进行了研究, 工程爆破对水

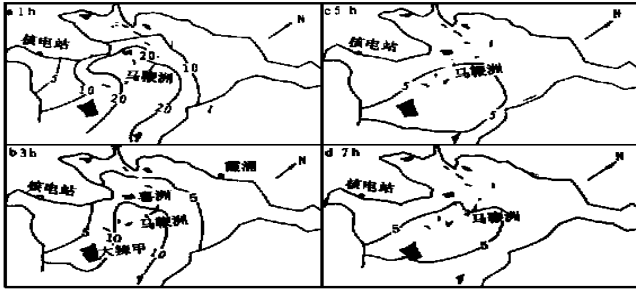


图 4 落急时爆破后数小时悬移质浓度增量分布图

Fig. 4 The distribution of the increase of sand concentration after explosion at urgent tide dropping

环境的影响分析和预测的主要关键是处理爆破瞬间后,爆破点附近水域悬移质泥沙的含量即浓度场数值计算初始条件.本文的处理方法具有一定的合理性,可供在类似工程爆破水环境评价项目中参考应用,同时通过数值模拟方法预测马鞭洲工程爆破后悬移质潮的对流扩散过程也取得了较满意的结果.

参 考 文 献

- 1 林秉南,韩曾萃,孙宏斌,等.潮汐水流泥沙输移与河床变形的二维数学模型.泥沙研究,1988(2): 1~8
- 2 赵士清.长江口潮流的一种数值模拟.海洋与湖泊,1985,16(1): 18~26
- 3 赵士清,张镜潮.一种简便的二维潮流数学模型.水利水运科学研究,1983(2): 15~23
- 4 刘家驹.在风浪和潮流作用下淤泥质浅滩含沙量的确定.水利水运科学研究,1988(2): 67~73

The Numeric Solution to the Two-Dimensional Advective-Diffusion Equations of Sand Concentration after Construction Explosion

Hou Yu* Li Kun Liu Wangen

Abstract The two-dimensional advective diffusion equations of sand concentration under explosion were build up, and the numeric solution to the equations was solved using a simplified element method. In the end, a case study about the environmental impacts of the explosion at Mabian island in Daya Bay was presented.

Keywords explosion, floating sand, advective, diffusion

* Department of Geography, Zhongshan University, Guangzhou 510275