

· 综 合 ·



波浪作用对淤泥质河口边滩 促淤后淤积影响研究*

陈大可¹, 周婷婷¹, 关许为²

(1. 河海大学, 江苏南京 210098; 2. 上海勘测设计研究院, 上海 200434)

摘要: 受波浪掀沙作用影响, 河口边滩工程促淤效果的合理预测始终是工程泥沙研究的难题之一。在文献[1]提出的淤泥质河口边滩促淤后淤积预报模式的基础上, 就波浪作用对工程促淤效果影响进行了研究。通过建立长江口—杭州湾海域的平面二维水沙数学模型和波浪模型, 计算不同波浪场作用下促淤工程区泥沙淤积强度。藉此, 定义了波浪作用引起的淤积影响系数 k_0 , 并建立了系数 k_0 与相对波高(波高/水深)的关系。由此, 结合促淤区内分级波浪数值模拟结果, 给出了综合反映促淤区1 a内各级波况的影响系数统计平均值 \bar{k}_0 , 并将 \bar{k}_0 代入文献[1]提出的淤泥质河口边滩促淤后淤积预报模式, 结果表明促淤区年淤积强度计算值与实测值吻合较好。

关键词: 波浪作用; 淤积计算; 淤泥质海岸; 促淤工程

中图分类号: TV 139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)07-0012-05

Influence of wave action on deposition after reclamation in muddy coast

CHEN Da-ke¹, ZHOU Ting-ting¹, GUAN Xu-wei²

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shanghai Investigation Design & Research Institute, Shanghai 200434, China)

Abstract: A reasonable and accurate forecast of the depositional rate after reclamations in muddy coast is a challenge of the engineering sediment search. Based on the suspended fine-sediment deposition prediction model after reclamation proposed in the literature[1], the influence of wave actions on siltation after topographic changing works is focused on. Two-dimensional horizontal large-scale tidal current and suspended sediment transport model and wave model are set up, with which, siltation intensity in work area under different waves is calculated. The relationship of coefficient k_0 , by which waves influence on siltation is characterized, between relative wave height is established. The siltation intensity calculated by the formula proposed in the literature[1], whose coefficient k_0 is obtained by the relationship above according to actual waves in engineering waters, well agree with the actual amount.

Key words: wave action; siltation calculation; muddy coast; reclaiming project

淤泥质河口海岸浅滩促淤围垦是河口海岸地区解决土地资源匮乏的主要途径, 为了减少围垦的吹填成本, 前期往往采用工程的方式对围填区进行促淤。然而由于河口海岸工程泥沙的复杂性, 对于促淤工程后泥沙淤积强度计算和预报问题,

至今尚未有成熟的理论和计算方法, 主要依赖于经验公式和数值模拟。目前, 已有很多学者针对促淤效果问题做了大量的研究^[1-7], 其中王义刚于2000年在文献[1]中由窦国仁的潮汐水流悬沙运动微分方程出发, 推导出淤泥质河口边滩促淤后淤

收稿日期: 2013-11-26

***基金项目:** 国家科技支撑计划资助项目(2012BAB03B01); 上海市科学技术委员会资助课题(12231203100); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK2012411)

作者简介: 陈大可(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事河口海岸动力及泥沙研究。

积强度计算公式,并建立了工程后促淤效果的预报模式。该淤积预报模式在很多工程实践中得到了应用和检验,取得了良好的结果^[8-11]。不过,值得注意的是,河口海岸水动力因素复杂,文献[1]提出的淤积预报模式中一些参数还有必要进一步探讨。尤其是文献[1]在利用南汇边滩促淤围垦工程检验文中提出的淤积强度计算公式和淤积预报模式时,根据当地连续3 a的实测地形资料得到淤强计算公式(即本文中公式(1))的系数 k_0 为0.7,同时指出可能是受到波浪作用的影响,但并未给出进一步的分析。在实际的促淤工程中,人们发现在大风天时,促淤区泥沙淤积有减弱的趋势。因此,有必要就波浪作用对淤泥质河口边滩促淤效果的影响进行探讨。

1 淤积计算方法

文献[1]基于窦国仁悬沙输运方程提出的河口边滩促淤后年淤积强度经验计算公式为:

$$p = \frac{\alpha n k_0 h S_{*1}}{\rho_c} \left(1 - \frac{S_{*2}}{S_{*1}} \right) \quad (1)$$

式中: α 为泥沙沉降机率; n 为1 a中总潮数; h 为促淤区浅滩水域平均水深(m); S_{*1} , S_{*2} 为工程前后水体挟沙能力(kg/m^3); ρ_c 为泥沙干密度(kg/m^3); k_0 为经验系数。

淤泥质河口边滩水体挟沙能力一般可按式计算:

$$S_* = k \left(\frac{v^2}{gh} \right)^m \quad (2)$$

式中: v 为全潮平均流速; g 是重力加速度; h 为全潮平均水深; k 和 m 由当地实测资料确定。

泥沙干密度 ρ_c (kg/m^3) 主要与泥沙粒径有关,粒径较小则干密度较小,反之,干密度较大,一般可用下式计算,

$$\rho_c = 1\ 750 (d_{50})^{0.183} \quad (3)$$

式中: d_{50} 为泥沙中值粒径(mm)。

式(1)中 k_0 为经验系数,反映其他因素对促淤区泥沙淤积的综合影响。在南汇边滩的应用中,根据实测值取为0.7,由此得到的预报值与实测值吻合良好。考虑到波浪作用是淤泥质河口边

滩的主要动力因素之一,本文旨在研究波浪作用对促淤区泥沙淤积的影响,为 k_0 的取值提供参考和依据。

2 数学模型简介

本文拟采用数值模拟的方法分析波浪作用对边滩促淤工程后泥沙淤积的影响。建立长江口—杭州湾二维潮流泥沙数学模型和波浪数学模型^[12-23]。波浪模型基于波作用守恒方程,通过波作用密度谱 $N(\sigma, \theta)$ 来描述波浪,模型的自变量为相对波频率 σ 和波向 θ 。波作用密度和波能谱密度 $E(\sigma, \theta)$ 的关系为:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (4)$$

式中: σ 为相对波频率; θ 为波向。

在笛卡尔坐标系下,波作用守恒方程可表示为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\nu N) = \frac{S}{\sigma} \quad (5)$$

式中: $\nu = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ 为波群速度; c_x, c_y 分别为波作用在地球空间(x, y)中传播时的变化, c_σ 为由于水深和水流变化造成的相对频率的变化, c_θ 为由水深和水流引起的折射; S 为使方程能量守恒的源项, $S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$, S_{in} 为风输入的能量, S_{nl} 为波与波之间的非线性作用引起的能量损耗, S_{ds} 为由白帽引起的能量损耗, S_{bot} 为底摩阻引起的能量损耗, S_{surf} 为由于水深变化引起的波浪破碎产生的能量损耗。

潮流泥沙模型和波浪模型范围、网格和地形均相同,模型范围覆盖整个长江口和杭州湾,模型网格采用非结构三角形网格,并在南汇边滩附近予以加密。无波浪作用时,潮流泥沙模型只考虑潮流输沙;有波浪作用时,通过波浪辐射应力和底摩擦力将波浪作用引入潮流泥沙场的计算中,以考虑波浪掀沙作用和波浪场对潮流场的作用。波流共同作用下的切应力根据 Soulsby 等 1993 年提出的平均切应力公式:

$$\frac{\tau_{\text{mean}}}{\tau_c + \tau_w} = \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_w} \left[1 + b \left(\frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_w} \right)^p \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_w} \right)^q \right] \quad (6)$$

式中： τ_{mean} 为波流共同作用下的平均床面切应力； τ_c 为潮流单独作用下的床面切应力； τ_w 为波浪单独作用下的床面切应力； b, p, q 为常数。

3 波浪作用对促淤后泥沙回淤的影响

根据促淤区波浪情况，将促淤区波浪按相对波高（波高/水深）大小分为 N 级，运用波浪模型模拟各级波浪作用下的波浪场，并将各级波浪场代入潮流泥沙数学模型，根据底床冲淤变形计算得到各级波浪作用下促淤区的淤积强度。不妨设第 i 级波浪作用对应的促淤区淤积强度为 p_i ($i = 0, 1, 2, \dots, N$)， p_0 为无波浪作用下促淤区内淤积强度。令

$$(k_0)_i = \frac{p_i}{p_0} \quad (7)$$

式中： $(k_0)_i$ 表征第 i 级波浪对促淤区泥沙淤积的影响。

考虑到 1 a 出现的波级条件各不相同，各级波浪出现的天数也各异，因此需要考虑不同级别波浪对泥沙淤积影响的权重，设第 i 级波浪在 1 a 中出现的频率为 β_i ，则综合考虑 1 a 中各级波浪作用下促淤区年淤积强度为：

$$p = \beta_0 p_0 + \beta_1 p_1 + \dots + \beta_N p_N = \sum_{i=0}^N \beta_i p_i \quad (8)$$

式中： $\beta_i = 1$ a 中该级波浪出现的天数/365， $\sum_{i=0}^N \beta_i = 1.0$ 。

将 $p_i = (k_0)_i p_0$ 代入式 (8) 得：

$$p = \beta_0 (k_0)_0 p_0 + \beta_1 (k_0)_1 p_0 + \dots + \beta_N (k_0)_N p_0 = \left[\sum_{i=0}^N \beta_i (k_0)_i \right] p_0 = \overline{k_0} p_0 \quad (9)$$

其中，

$$\overline{k_0} = \beta_0 (k_0)_0 + \beta_1 (k_0)_1 + \dots + \beta_N (k_0)_N = \sum_{i=0}^N \beta_i (k_0)_i \quad (10)$$

$\overline{k_0}$ 是考虑不同波浪出现频率的加权平均值，综合反映了 1 a 中各级波浪对促淤区泥沙淤积的影响。

式(1)中 k_0 为经验系数，反映其他因素对促淤区泥沙淤积的综合影响。本文仅考虑波浪作用

对泥沙回淤的影响，取 $k_0 = \overline{k_0} = \sum_{i=0}^N \beta_i (k_0)_i$ 代入式 (1) 便可计算综合考虑 1 a 中各级波浪作用对促淤区泥沙淤积影响的淤积强度 p 。

4 应用实例

4.1 工程区域

南汇边滩位于长江口外水下三角洲南缘，东邻东海，西靠浦东新区，南濒杭州湾，北到长江口南槽，是长江口和杭州湾水流和泥沙相互作用而形成的堆积滩地。其北部称南汇东滩，南部称南汇南滩。南滩附近海域为长江口与杭州湾交汇带高含沙区之所在，泥沙主要来自长江口入海泥沙的向南输移和扩散，南滩近岸潮流基本为东西向往复流，主流向与沿岸等深线大致平行，波浪以风浪为主，受季风气候控制，潮流和风浪作用强劲，对泥沙输运和潮滩冲淤影响很大^[24-25]。1994年上海有关单位在南汇南滩建造了促淤坝用于促淤造陆。促淤坝建造前曾对促淤区进行了地形测量，促淤坝建造好后，有关部门又对促淤坝内的水域进行了 3 a 的水深测量（1995—1997年），获得了宝贵的实测资料^[1]。本文利用该工程资料就波浪作用对促淤工程后泥沙淤积的影响以及对系数 k_0 与波浪作用的关系开展研究。工程区位置和促淤区内计算泥沙回淤强度的区域划分见图 1。

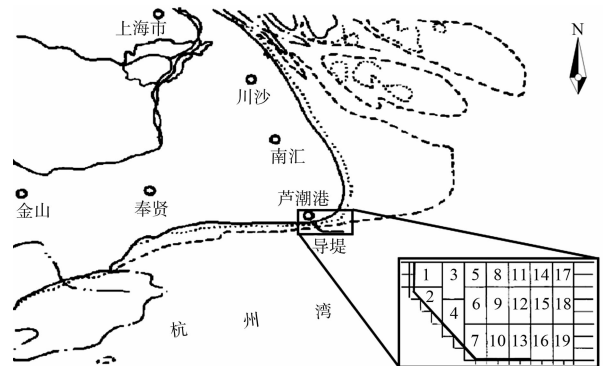


图 1 研究区域和回淤强度计算区域划分

4.2 波浪对促淤区促淤效果影响规律

将促淤区波浪按相对波高（波高/水深）大小分级，综合波浪数学模型和水沙数学模型结果，

由式(7),统计得到各级波浪作用下的系数 k_0 (图2)。由图2知,系数 k_0 随着相对波高的增大而减小。波浪作用时,一定的波浪能够掀起浅滩落淤的泥沙,通过落潮水流带出促淤工程区;波浪作用增大时,波浪能够掀起的泥沙增多,工程区淤积强度逐渐减小,波浪作用对促淤效果的影响越不利,系数 k_0 越小;当波浪足够大时,工程区泥沙不落淤,而浅滩泥沙被大量带出工程区致使工程区出现冲刷,系数 k_0 变为负值。系数 k_0 对波浪作用十分敏感,相对波高从 0.15 到 0.24 增大了 60%,系数 k_0 却迅速减小了约 3/4,相对波高为 0.28 时,系数 k_0 已为负值,此时波浪作用下工程区已出现冲刷,相对波高从 0.28 到 0.42 增大了 50%,工程区冲刷强度却增大了 3.4 倍,系数 k_0 从 -0.07 减小至 -0.31。

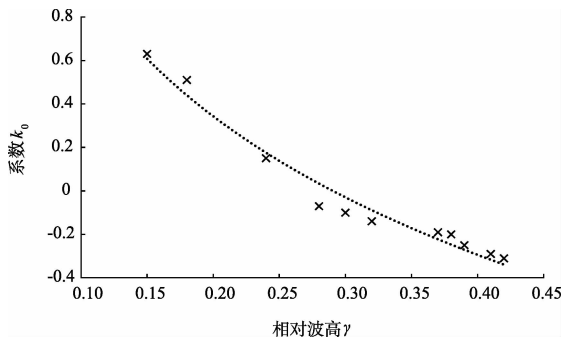


图2 系数 k_0 与相对波高 γ 的关系

波浪作用对促淤区泥沙淤积影响体现在波浪掀沙上,波浪小时,对淤积影响小;波浪大时,对淤积影响大。当波浪小于当地泥沙起动波高时,波浪对促淤影响甚微,这里假设当相对波高小于促淤区浅滩底沙相对起动波高时,波浪作用对促淤区泥沙淤积无影响,淤积计算不折减,即 $k_0 = 1.0$ 。促淤区波浪破碎时,波浪作用对泥沙淤积的影响最大,此时系数 k_0 取到最小值。工程区泥沙相对起动波高和工程区相对破碎波高根据佐藤公式(11)和合田良实公式(12)计算^[26-27],得到促淤区口门附近相对起动波高和相对破碎波高分别约为 0.1 和 0.6。

$$\frac{H_0}{L_0} = K \left(\frac{d_m}{L_0} \right)^m \sinh \left(\frac{2\pi D_c}{L} \right) \frac{H_0}{H} \quad (11)$$

$$\frac{H_b}{d_b} = A \left\{ 1 - \exp \left[1.5 \frac{\pi d_b}{L_0} (1 + 15i^{4/3}) \right] \right\} \left(\frac{d_b}{L_0} \right) \quad (12)$$

式中: H_0 , L_0 为深水波高与波长; d_m 为泥沙中值粒径; K 为经验系数,取 1.35; m 为经验指数,取 1/3; D_c 为泥沙起动临界水深; H_b 为破碎波高; d_b 为破碎水深; i 为水底坡度; A 为常数,取 0.17。

对处于浅滩泥沙相对起动波高和促淤区相对破碎波高之间的相对波高和系数 k_0 的函数关系进行最小二乘拟合(图2),得,

$$k_0 = -0.92 \ln \gamma - 1.137 \quad 0.1 \leq \gamma \leq 0.6 \quad (13)$$

公式的相关系数为 $R^2 = 0.97$,说明拟合得到的公式(13)具有较高的精度。

结合相对波高小于浅滩泥沙相对起动波高的情况,得,

$$k_0 = \begin{cases} -0.92 \ln \gamma - 1.137 & 0.1 \leq \gamma \leq 0.6 \\ 1.0 & \gamma \leq 0.1 \end{cases} \quad (14)$$

4.3 工程实例验证

由于缺少南汇边滩促淤区的波浪资料,故促淤区波浪分级参考文献[28]中引水船和大戢山的波浪资料,并通过波浪模型将外海波浪推算到南汇边滩促淤工程区,得到各级波浪作用下促淤区相对波高,按式(14)计算促淤区各级波浪对应的系数 k_0 ,结果见表1。

表1 南汇边滩工程区各级波浪出现频率及对应系数 k_0

波高/m	测站	频率 β /%	相对波高 $\gamma/(m \cdot m^{-1})$	k_0
0.0~0.4	引水船	9.8	0.03	1.00
	大戢山	27.0		
0.5~1.4	引水船	73.0	0.11	0.89
	大戢山	54.0		
1.5~2.9	引水船	17.0	0.25	0.14
	大戢山	17.0		
3.0~4.9	引水船	0.2	0.43	-0.36
	大戢山	2.0		

由表1中各级波浪作用出现的频率 β 和相对应的系数 k_0 ,根据式(10)计算得到考虑各级波浪对泥沙淤积影响的统计平均值 \bar{k}_0 ,由引水船站波浪资料推算出的 \bar{k}_0 和由大戢山站波浪资料推算出的 \bar{k}_0 分别为 0.771 和 0.767,取 \bar{k}_0 为 0.77。

将上面得到的波浪作用对促淤区泥沙淤积影响系数 $k_0 = \bar{k}_0 = 0.77$ 代入式(1), 其他物理量按照文献[1]中取值, 根据工程前后的流场分布, 得到考虑波浪作用的促淤区泥沙淤积强度, 淤积强度计算值与实测值吻合较好, 见图3。

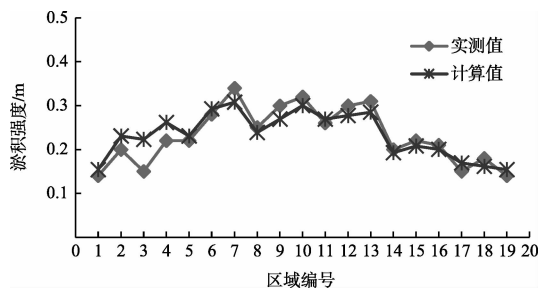


图3 计算值和实测值

5 结语

河口海岸工程泥沙问题的研究和应用是一个非常复杂的问题。本文在文献[1]提出的淤泥质河口边滩促淤后淤积强度预报模式的基础上, 就波浪作用对促淤区泥沙淤积影响进行了研究, 定义了波浪作用引起的促淤区泥沙淤积影响系数 k_0 , 并建立了系数 k_0 与相对波高 γ 的关系。根据工程区波浪情况, 计算出综合考虑1 a 中各级波浪作用对泥沙淤积影响的加权平均值 \bar{k}_0 , 将 $k_0 = \bar{k}_0$ 代入式(1)得到的考虑波浪作用的促淤区泥沙年淤积强度计算值与实测值吻合较好, 对完善文献[1]提出的河口边滩促淤围垦后淤积预报模式起到积极作用。然而河口海岸地区动力因素复杂, 对于不同地区、不同的促淤围垦工程布置形式以及不同的口门大小等, 波浪作用对泥沙促淤效果是否受不同因素的影响, 是今后研究的一个方向。

参考文献:

[1] 王义刚, 林祥, 吴中. 河口边滩围垦后淤积计算方法研究[J]. 海洋工程, 2000, 18(3): 67-70.
 [2] 刘家驹, 喻国华. 淤泥质海岸保淤促淤计算及预报[J]. 海洋工程, 1990, 8(1): 51-59.
 [3] 王义刚, 林祥, 冯卫兵. 计算淤泥质海岸围垦多年回淤强度的一种简便方法[J]. 河海大学学报, 2000, 28(6): 100-102.

[4] 罗勇, 罗肇森. 上海外高桥电厂取排水域中潮位下极限淤积估算[J]. 泥沙研究, 2001(5): 67-72.
 [5] 庄小将, 陈方东, 王丰平, 等. 温州大门跨海大桥及大、小门岛填海工程实施后流场及冲淤变化的数值研究[J]. 海洋学研究, 2010, 28(3): 43-51.
 [6] 李孟国. 温州浅滩围涂促淤工程泥沙数值模拟研究[J]. 泥沙研究, 2005(4): 4-12.
 [7] 宋立松. 钱塘江河口围垦回淤过程预测探讨[J]. 泥沙研究, 1999(3): 74-79.
 [8] 沈正潮, 崔冬. 南汇东滩区域促淤工程淤积效果定量分析[J]. 上海水务, 2008(24): 45-47.
 [9] 陈长英, 张幸农, 王金波, 等. 镇海新泓口围垦工程潮流数值模拟及泥沙淤积计算[C]//第七届全国泥沙基本理论学术讨论会论文集. 北京: 中国水利学会, 2008: 756-759.
 [10] 钱进, 刘瑛琦, 朱素霞. 铁基湾围垦工程对潮流泥沙影响数值计算与分析[C]//第十二届中国海岸工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2005: 530-533.
 [11] 崔冬, 刘新成, 俞相成. 潮汐河口大型中低滩促淤工程内部布局研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(2): 27-33.
 [12] 曹祖德, 王桂芳. 波浪掀沙潮流输沙的数值模拟[J]. 海洋学报, 1993, 15(1): 107-118.
 [13] 窦希萍, 罗肇森. 波浪潮流共同作用下的二维泥沙数学模型[J]. 水利水运科学研究, 1992(4): 331-338.
 [14] 窦国仁, 董凤舞, 窦希萍, 等. 河口海岸泥沙数学模型研究[J]. 中国科学: A 辑, 1995, 25(9): 995-1001.
 [15] 辛文杰. 潮流、波浪综合作用下河口二维悬沙数学模型[J]. 海洋工程, 1997, 15(2): 30-47.
 [16] 朱志夏. 波浪、潮流联合作用下的泥沙数学模型的理论研究及其应用[D]. 天津: 天津大学, 1997.
 [17] Zhang Jinshan, Lu Peidong, Xu Ming. Numerical modeling on suspended sediment transportation in the Hangzhou Bay [J]. China Ocean Engineering, 1998, 12(1): 87-98.
 [18] 马福喜, 李文新. 河口水流、波浪、潮流、泥沙、河床变形二维数学模型[J]. 水文学报, 1999(5): 39-43.
 [19] Mead C T. An investigation of the suitability of two dimensional mathematical models for predicting sand deposition in dredged trenches across estuaries [J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(4): 444-464.
 [20] 孔令双. 河口、海岸波浪、潮流、泥沙数值模拟[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2001.