

波流共同作用下围垦促淤计算方法研究

刘 红^{1,2}, 谢 军¹, 熊志强¹, 陈 中¹, 陈海英¹

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200124; 2. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要:在改进王义刚等提出的淤泥质海岸围垦淤积计算方法基础上,提出了波流共同作用下围垦促淤计算方法。采用实测水沙资料对挟沙力公式进行率定,得到了横沙东滩水域波流共同作用下半潮平均水沙关系式,其相关系数明显优于仅考虑潮流作用的水沙关系式。采用上述计算方法和水沙关系式对横沙东滩促淤圈围工程的淤积效果进行计算,计算结果与实测值较为接近。由于考虑了波浪作用对含沙量的贡献,比仅考虑潮流作用的计算模式具有明显优势,以后可进一步尝试采用本模式研究砂质和粉砂质潮滩促淤效果问题。

关键词:横沙东滩; 淤泥质海岸; 波流共同作用; 滩涂; 围垦; 促淤; 计算模式

中图分类号: TV148

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)04-0022-06

滩涂处于陆海相互作用的过渡地带,是一种重要的土地资源、空间资源和生态资源。随着社会经济的快速发展,城市用地的矛盾日渐突出,结合河势控制和河口整治工程进行促淤圈围不失为一种缓解城市用地矛盾的有效途径。围垦造地具有较大的成本优势^[1],适度的滩涂圈围还是河势控制和河口整治的有效措施之一^[2]。圈围工程实施前需通过工程措施创造良好的淤积环境,充分利用本区域水文、泥沙条件,加快淤积和成陆建设进程,减少后期的吹填工程量,从而降低造地成本。因此,围区内的促淤效果分析是促淤圈围工程关注的关键技术问题之一。

目前,分析促淤效果主要采用物理模型、泥沙数学模型和经验公式等手段^[3],由于物理模型研究耗时长、投入较大,泥沙数学模型计算精度有限,因此,利用半理论半经验公式进行估算受到海岸工程学家的青睐。一个使用方便的经验公式至少需要满足以下两个条件:①物理概念清晰,②相关参数易于测量和率定。

前人在淤泥质海岸促淤预报模式方面开展了许多有益的工作。刘家驹等^[4]建立了淤泥质海岸保滩促淤计算模式,并在江苏吕四海岸促淤效果的计算中吻合较好,但刘家驹公式中未考虑当地的背景含沙量,仅突出了工程实施前、后波浪衰减的影响。王义刚等^[5]建立了淤泥质潮滩促淤预报模式,在南汇南滩促淤效果计算中取得满意的结果,但该模式仅考虑了工程前后潮流动力变化对促淤效果的影响,未考虑波浪动力的影响,因此,在波浪作用不显著的淤泥质潮滩围垦促淤计算中效果较好,但无法适用于波浪影响较大区域的围垦促淤计算。

风浪和潮流是两个相对独立的动力因素,均对泥沙的起动、输运和沉降具有重要作用,它们的挟沙能力可用各自的流速来体现。基于这一思路,本文对王义刚模式进行了改进,选用波流共同作用下的挟沙力公式推导得出波流共同作用下的滩涂围垦促淤计算模式,并以横沙东滩促淤(四期)工程进行了验证。

收稿日期: 2013-12-13

基金项目: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司专业建设项目(2013-1065);河口海岸学国家重点实验室开放基金项目(SKLEC-KF201201)

作者简介: 刘 红(1978-),男,湖北宜昌人,高级工程师,博士,主要从事河口海岸水动力和工程泥沙研究。

E-mail: liuhongshiw@163.com

1 模式建立及参数率定

1.1 模式建立

窦国仁^[6]潮汐水流悬沙运动微分方程为:

$$\frac{\partial(AS)}{\partial t} + \frac{\partial(Q_x S)}{\partial x} + \alpha B \omega (S - S_*) = 0 \quad (1)$$

式中: A 为河床断面面积; S 为含沙量; Q_x 为 x 方向的流量; α 为泥沙沉降机率; B 为河宽; ω 为悬沙沉降速度; S_* 为水流挟沙能力。

令 H 为水深, q 为 x 方向的单宽流量,则式(1)改写为:

$$\frac{\partial(HS)}{\partial t} + \frac{\partial(qS)}{\partial x} + \alpha \omega (S - S_*) = 0 \quad (2)$$

参照罗肇森^[7]的研究方法,在潮周期内对式(2)积分,并简化得:

$$P = \frac{\alpha n k_0 H S_{*1}}{\rho_s} \left(1 - \frac{S_{*2}}{S_{*1}} \right) \quad (3)$$

式中: P 为年淤积强度(m/a); α 为沉降机率; n 为1年中的潮数; k_0 为系数, $k_0 \leq 1$,根据实测淤积资料率定; H 为工程前的全潮平均水深(m); S_{*1}, S_{*2} 为工程前、后的挟沙能力(kg/m^3);泥沙干密度 $\rho_s = 1\,750\, (d_{50})^{0.183}$ (kg/m^3)。

曹祖德等^[8]的波、流共同作用下挟沙力公式为:

$$S_* = k \left[\frac{(u_c + \beta u_w)^3}{g H \omega} \right]^m \quad (4)$$

式中: k 为挟沙力系数; m 为挟沙力指数,是水流和泥沙条件的函数,需通过当地实测流速和含沙量资料,通过相关分析来确定; β 为系数,淤泥质海岸 $\beta=0.5$,粉砂质海岸 $\beta=0.6$,砂质海岸 $\beta=0.7$; u_c 为潮流流速; u_w 为波浪底部水质点最大轨迹速度; g 为重力加速度; ω 为悬浮泥沙沉降速度(m/s)。

波浪底部水质点最大轨迹速度 u_w 可由下式计算:

$$u_w = \frac{\pi h}{T \sinh\left(\frac{2\pi H}{L}\right)} \quad (5)$$

式中: h 为波高; T 为波周期; L 为波长。

将式(4)代入式(3)得到波、流共同作用下潮滩促淤预报模式:

$$P = \frac{\alpha n k_0 H S_{*1}}{\rho_s} \left[1 - \left(\frac{u_{c2} + \beta u_{w2}}{u_{c1} + \beta u_{w1}} \right)^{3m} \right] \quad (6)$$

式中: u_{c1}, u_{c2} 为工程前、后的潮平均流速(m/s); u_{w1}, u_{w2} 为工程前、后波浪底部水质点最大轨迹速度(m/s)。

王义刚等^[5]仅考虑潮流作用下挟沙力公式得到的淤泥质河口边滩围垦后的年淤积强度公式:

$$P = \frac{\alpha n k_0 H S_*}{\gamma_0} \left[1 - \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^{2m} \right] \quad (7)$$

式中: u_1, u_2 为工程前后的平均流速(m/s)。

本文得到的式(6)在式(7)基础上有较大改进,在波浪影响很小的工程区域,两式淤积效果计算($u_w=0$)的结果相差不大;然而对于波浪影响较大的工程区域,式(6)具有明显的优势。

1.2 参数率定

1.2.1 沉降机率 α 根据窦国仁^[6]的研究,沉降机率 α 可写为: $\alpha = 0.5 + \varphi\left(\frac{\omega}{\sigma}\right)$,其中,函数 $\varphi\left(\frac{\omega}{\sigma}\right)$ 根据机率积分,可由表查得^[6]; σ 为脉动流速的均方根,可根据 $\sigma = 1.25 \frac{u\sqrt{g}}{C}$ 近似确定, u 为平均流速, C 为谢才系数。

当河口海岸区域床面为淤泥或粉砂时,罗肇森^[7]计算了15℃、平均流速为0.4 m/s和憩流附近的沉降机率参考值;当泥沙粒径 d 分别为<0.03,0.05,0.10,0.15,0.20,>0.20 mm时,沉降机率分别为0.67,0.68,0.72,0.78,0.83和0.84。

本次计算沉降机率根据横沙东滩四期工程前后的实际促淤效果率定后给出,取值 0.60 ~ 0.67。

1.2.2 沉降速度 ω 在淤泥质海岸,水体中悬沙呈絮凝状态,絮凝沉速 $\omega=0.000\ 4\sim0.000\ 5\text{ m/s}$,相当于当量粒径 $d=0.03\text{ mm}$ 。对于粉砂质和砂质海岸,沉降速度可采用张瑞瑾^[9]公式计算:

$$\omega = \sqrt{\left(13.95 \frac{\nu}{d}\right)^2 + 1.09 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} - 13.95 \frac{\nu}{d} \quad (8)$$

式中: ν 为水的运动黏度; d 为泥沙粒径; γ_s 和 γ 分别为泥沙和水的重度。

工程区附近的悬沙中值粒径在 0.010 ~ 0.015 mm 之间,按照絮凝沉速 ω 取 0.000 5 m/s。

1.2.3 水流挟沙能力 S_* 采用 2008 年 3 月横沙东滩附近海域大潮期间的实测水沙资料来率定挟沙力公式参数,水文测验期间的波浪参数由实测风速资料经莆田公式计算得到,经相关分析得到横沙东滩附近海域半潮平均水沙关系式。将式(4)等号两边取自然对数,得到: $\ln S = \ln k + m \ln \frac{(u_c + \beta u_w)^3}{gH\omega}$, 由图 1 中方程式得到横沙东滩波、流共同作用上涨潮平均挟沙力公式中 k 为 0.723 0, m 为 0.131 1;落潮平均挟沙力公式中 k 为 0.223 7, m 为 0.305 6(图 1)。

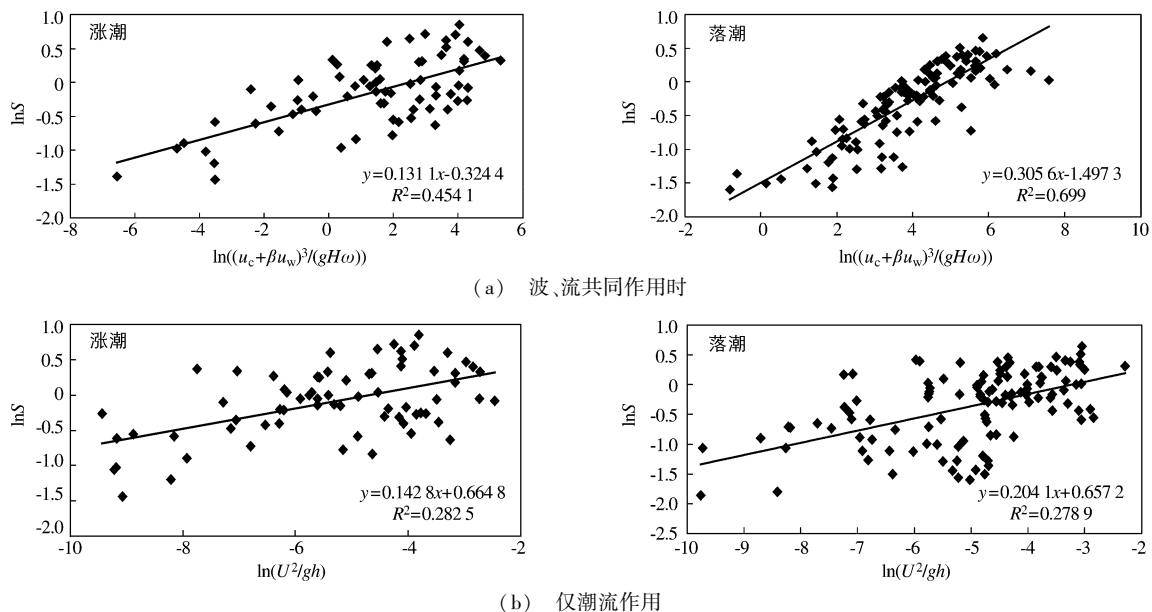


图 1 半潮水沙关系式

Fig. 1 Flood and ebb averaged sediment-carrying capacity formula

同理,潮流作用下的挟沙力公式 $S = k \left(\frac{u_c^2}{gH} \right)^m$ 可改写为: $\ln S = \ln k + m \ln \frac{u_c^2}{gH}$ 。经相关分析,仅潮流作用下涨潮平均挟沙力公式中 k 为 1.944 1, m 为 0.428 0;落潮平均挟沙力公式中 k 为 1.929 4, m 为 0.204 1。

从相关系数上看(图 1),考虑波浪和潮流作用的半潮平均水沙关系明显优于仅考虑潮流作用的半潮平均水沙关系。

2 研究区概况

横沙东滩位于长江口横沙岛东侧,处于长江口北港与北槽之间,是长江口三大浅滩之一,也是上海市促淤围垦的重点区域。在 1998 年长江口深水航道治理工程实施前,横沙东滩处于自然条件演变下,除有少量南北向甬沟发育外,大部分滩面平坦、基本稳定,高程始终保持在 +1.0 m 至 -1.0 m 之间。由于横沙东滩东侧区域潮流和风浪作用影响较大,横沙东滩自然淤涨速度非常缓慢,横沙东滩呈现“长大不长高”的状态。

随着长江口深水航道北导堤和 N23 促淤潜堤的建成,横沙东滩泥沙截留, N23 潜堤西侧滩面淤积。与长江口深水航道工程疏浚土处理相结合,横沙东滩已进行了不少的促淤圈围工程。自 2003 年以来,横沙东滩一至六期工程,累计形成促淤面积 81.73 km^2 (12.26 万亩),圈围面积 17.33 km^2 (2.6 万亩)(图 2)。

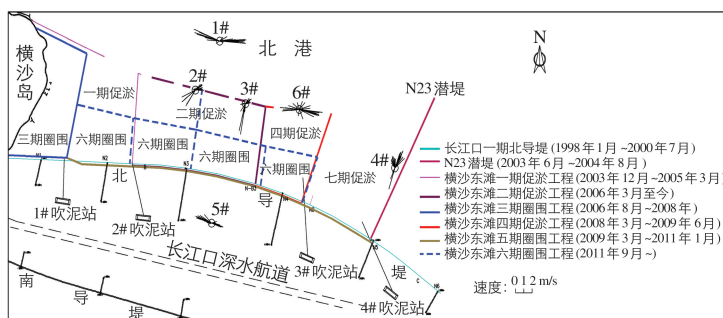


图2 横沙东滩已建工程及流速矢量

Fig. 2 Existing works and current velocity vector in the eastern Hengsha shoal

2008 年 3 月 9—10 日(农历二月

初二至初三)大潮期间工程区域进行了水文测验,垂线平均涨潮流速 $0.17 \sim 0.88 \text{ m/s}$,垂线平均落潮流速 $0.14 \sim 1.05 \text{ m/s}$ 。涨潮平均含沙量 $0.52 \sim 1.79 \text{ kg/m}^3$,落潮平均含沙量 $0.33 \sim 1.22 \text{ kg/m}^3$ 。

横沙东滩水域主要受到 NNE-ESE 向波浪的影响,工程区东北侧余山站多年平均波高为 0.9 m ,台风和寒潮引起的滩面冲刷对横沙东滩促淤圈围工程影响较大。据统计,影响上海的台风每年平均有 $2 \sim 3$ 个,在横沙东滩四期工程促淤期间,2008 年 9 月第 13 号台风“森拉克”影响上海,总体而言,台风个数较往年偏少。影响上海的寒潮天气平均每年为 3.5 次,促淤期间 2008 年 12 月 5 日、2008 年 12 月 20—22 日和 2009 年 1 月 22—23 日出现了 3 次明显的寒潮过程,与多年平均值基本持平。

3 结果及分析

2008 年 3 月横沙东滩四期促淤工程建设,2009 年 5 月工程完工。根据 2008 年 3 月和 2009 年 10 月地形统计(图 3),四期北侧自然淤积 0.36 m ,按时间折算成年淤积强度为 0.23 m/a ,淤积量约为 290 万 m^3 。南侧区域由于受到长江口深水航道疏浚土上滩的影响,淤积强度较大,淤积厚度为 2.04 m ,是自然淤积和疏浚土上滩的共同作用所致。本次采用四期北侧自然淤积结果进行模式验证和分析。将横沙东滩促淤四期工程北侧划分为 12 块区域,分别统计各区淤积强度的平均值进行分析。

根据波流共同作用下围垦促淤计算模式,计算得到四期工程建设 1 年后北侧平均淤积幅度 0.24 m ,除沿堤流和口门冲刷所在局部区域误差较大外(验证的 1,4,8 区),该模式预测的地形冲淤范围和强度与实测值较为一致(图 4,表 1)。因此,本次验证结果较好地反映了横沙四期促淤工程实施以来的促淤效果,相关参数取值合理。

若仅考虑潮流作用的式(7)采用相同参数进行计算,北侧平均淤积幅度为 0.18 m ,与实测值相差较大,本文得到的式(6)计算结果好于式(7)(图 4(b),表 1)。由于本文得到的计算方法既考虑工程实施后潮流流速减少、挟沙力降低对促淤效果的贡献,又考虑了工程后波浪衰减对促淤效果的作用,而且物理概念清晰,因此,本文建立的波流共同作用下围垦促淤预报模式具有明显优势。

考虑到促淤工程实施后的第 1 年淤积效果最好,第 2 年以后淤积强度将会随着滩面的不断淤高而逐渐减小,直至冲淤平衡。多年淤积强度可按照地形迭代法进行数学模型计算,直至滩面冲淤相对平衡,或参照王义刚等^[11]简便方法近似估算。

由于淤积计算模式采用波、流共同作用下挟沙力公式,能较好地反映波浪掀沙对促淤效果的影响。因此,本模式进行率定后,可进一步尝试研究砂质和粉砂质潮滩促淤效果问题。

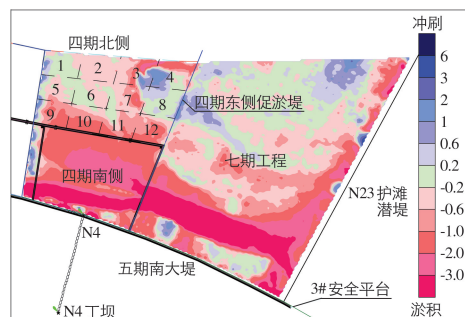


图3 横沙东滩促淤圈围四期和七期工程地形冲淤(2008-03—2009-10)(单位: m)

Fig. 3 Erosion-deposition variation in stages No. 4 and No. 7 reclamation works of the eastern Hengsha shoal from March 2008 to October 2009 (unit: m)

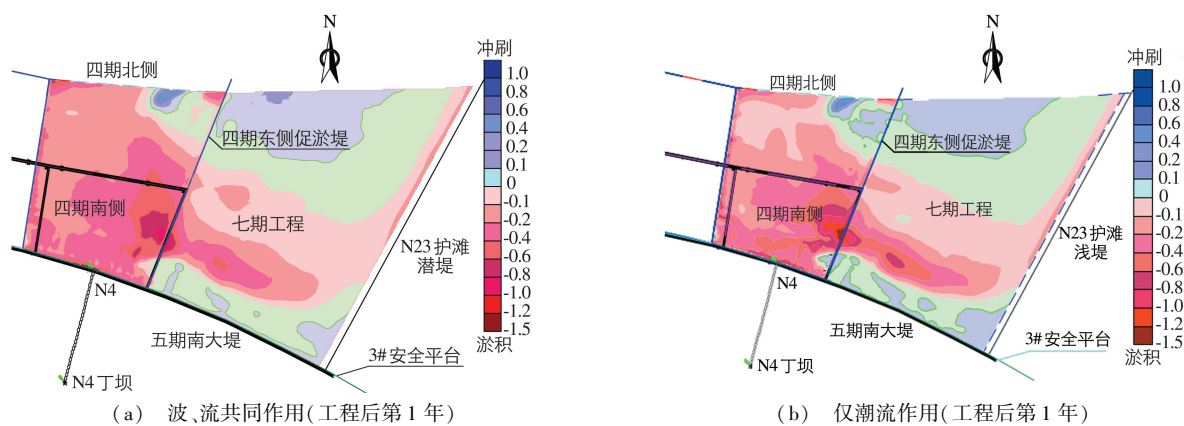


图 4 横沙东滩四期北侧淤积强度(单位: m)

Fig.4 Siltation intensity in the north side of stage No.4 reclamation work of the eastern Hengsha shoal (unit: m)

表 1 横沙东滩四期北侧实测年淤积强度和预测值对比

Tab.1 Comparison between the predicted and measured values of siltation intensity in the north side of stage No.4 reclamation work of the eastern Hengsha shoal (m · a⁻¹)

区 域	实测值	计 算 值		区 域	实测值	计 算 值	
		本文式(6)	王义刚式(7)			本文式(6)	王义刚式(7)
1	0.04	0.14	0.09	7	0.30	0.30	0.28
2	0.20	0.25	0.24	8	-0.10	0.14	0.04
3	0.19	0.07	-0.03	9	0.42	0.39	0.36
4	0.14	0.11	0.04	10	0.47	0.41	0.47
5	0.12	0.24	0.20	11	0.44	0.43	0.41
6	0.19	0.24	0.19	12	0.51	0.48	0.47

4 结 语

采用长江口横沙东滩水域水沙观测资料对波流共同作用下挟沙力公式进行了率定,得到了波流共同作用下半潮平均水沙关系式,其相关系数明显优于仅考虑潮流作用的水沙关系式。

对王义刚等提出的淤泥质促淤计算模式进行了改进,采用波、流共同作用下的挟沙力公式推导得到波、流共同作用下围垦促淤计算模式,并对横沙东滩促淤圈围工程的淤积效果进行计算,结果与实测值较为接近。由于考虑了波浪作用对含沙量的贡献,物理概念清晰,今后本模式进行率定后,可进一步尝试开展砂质和粉砂质潮滩促淤效果的计算。

需要说明的是,本模式未能考虑极端天气条件下促淤区的冲刷和沿堤流冲刷的问题,在淤积效果预测时需根据极端天气资料对促淤效果进行局部校正。

参 考 文 献:

[1] 刘红,方伟,王大伟,等. 台州湾浅滩取土区方案优化研究[J]. 水运工程, 2012(12): 148-155. (LIU Hong, FANG Wei, WANG Da-wei, et al. Project optimization of borrow area in shoal of Taizhou bay[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(12): 148-155. (in Chinese))

[2] 陈吉余,程和琴,戴志军. 河口过程中第三驱动力的作用和响应——以长江河口为例[J]. 自然科学进展, 2008(9): 994-1000. (CHEN Ji-yu, CHENG He-qin, DAI Zhi-jun. Effect and response on the third driving force in the estuarine process [J]. Progress in Natural Science, 2008(9): 994-1000. (in Chinese))

[3] 谢军. 长江口挟沙能力和浅滩促淤工程数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2011. (XIE Jun. Numerical simulation of the

- Yangtze River estuary sediment-carrying capacity and numerical simulation study on accelerative silting project[D]. Nanjing: Hohai University, 2011. (in Chinese))
- [4] 刘家驹, 喻国华. 淤泥质海岸保滩促淤计算及预报[J]. 海洋工程, 1990(1): 51-59. (LIU Jia-ju, YU Guo-hua. Calculation and forecast of the beach protection and accretion acceleration on the silt beach[J]. The Ocean Engineering, 1990(1): 51-59. (in Chinese))
- [5] 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(3): 67-70. (WANG Yi-gang, LIN Xiang, WU Zhong. A method for calculating depositional rate after warping the bank in the silty estuary[J]. The Ocean Engineering, 2000(3): 67-70. (in Chinese))
- [6] 窦国仁. 潮汐水流中的悬沙运动及冲淤计算[J]. 水利学报, 1963(4): 13-24. (DOU Guo-ren. Suspended sediment movement and erosion & deposition calculation in the tidal currents[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1963(4): 13-24. (in Chinese))
- [7] 罗肇森. 河口航道开挖后的回淤计算[J]. 泥沙研究, 1987(2): 13-20. (LUO Zhao-sen. Sediment transport under the coexisting action of waves and currents and the prediction of sudden sedimentation in navigation channel[J]. Journal of Sediment Research, 1987(2): 13-20. (in Chinese))
- [8] 曹祖德, 李蓓, 孔令双. 波流共存时的水体挟沙力[J]. 水道港口, 2001(4): 151-155. (CAO Zu-de, LI Bei, KONG Ling-shuang. Carrying capacity for a wave-current coexistent system[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2001(4): 151-155. (in Chinese))
- [9] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 49-51. (ZHANG Rui-jin. River sediment dynamics [M]. 2nd ed. Beijing: China WaterPower Press, 1998: 49-51. (in Chinese))
- [10] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 横沙东滩促淤(七期)工程工程可行性研究报告[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2013. (Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co, Ltd. Project feasibility study report on the 7th phase reclamation project of eastern Hengsha shoal[R]. Shanghai: Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co, Ltd, 2013. (in Chinese))
- [11] 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(6): 100-102. (WANG Yi-gang, LIN Xiang, FENG Wei-bing. A simple method for calculating long-term deposition rate after construction of warping bank in estuary[J]. Journal of Hohai University, 2000(6): 100-102. (in Chinese))

Analysis of silting calculation for reclamation works under wave and current interaction

LIU Hong^{1,2}, XIE Jun¹, XIONG Zhi-qiang¹, CHEN Zhong¹, CHEN Hai-ying¹

(1. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200124, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: A new silting calculation method for the reclamation works under the wave and current interaction has been established by improving Wang Yi-gang's calculation method applied to muddy coast shore reclamation. The coefficients of flood and ebb averaged sediment-carrying capability formula under the wave and current interaction are determined by the measured data of current velocity, wind speed and suspended sediment concentration, and the analysis results are significantly better than those which only consider the tidal flow. The siltation intensity of the eastern Hengsha shoal enclosure engineering has been calculated using the above method and the calibrated sediment-carrying capability formula, and the research results agree with the measured values. Because of considering the wave contribution to the sediment concentration, this model has obvious advantages over the calculation model only considering the tidal action. This model can be further tried to calculate the siltation intensity of the reclamation works placed in the silty and sandy tidal flat.

Key words: eastern Hengsha shoal; muddy coast; interactions of wave and current; shore reclamation; silting; calculation mode