文章编号:1002-3682(2016)01-0024-09

# 防波堤建设对海底泥沙冲淤环境影响研究

曹成林,张永强,熊丛博,胡泽建,李 霞 (国家海洋局第一海洋研究所,山东青岛,266001)

摘 要:以烟台八角海域为例,分别采用数值模拟计算与实测值对比两种方式分析评价防波 堤建设对海底冲淤变化的影响。研究结果表明,防波堤建设导致研究区海底沉积物由原来的 平衡状态转变为"浅水冲深水淤"的态势,冲刷及淤积速率均为0~0.06 m/a。除构筑物附近 等边界区域外,模型计算结果与实测泥沙运移趋势基本一致。 关键词:防波堤;数值模拟;泥沙运移

中图分类号: P75 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2016.01.003

近年来,为了开发利用深水岸线资源,修建防护工程是较为通用的方法,尤其在受风 浪作用明显的海岸带,防护工程需要突出于海岸线一定距离才能满足防浪挡沙的要求,保 证船舶靠泊条件。海洋构筑物的存在改变了海域周围流体的流动方式,导致了紊流的产 生、波的反射和绕射等,这些改变常常引起局部泥沙输移量的增加,由此导致海床的冲 刷<sup>[1]</sup>。张玮等应用数学模型模拟计算了连云港海域大型海岸工程实施后对于水流泥沙运 动的影响<sup>[2]</sup>。解鸣晓等建立波流共同作用下的泥沙数学模型,研究了连云港口门防波堤 建设对年平均含沙量场及进港航道回淤的影响<sup>[3]</sup>。崔方水等用二维潮流泥沙数学模型及 大风骤淤三维数学模型对田湾核电站扩建工程实施后的二维潮流场、泥沙场、地形冲淤场 进行了模拟计算分析<sup>[4]</sup>。

工程海域的地貌环境及海域水动力条件不同,构筑物对海洋水动力场及泥沙冲淤场 的影响有较大的差异。此外,在数值模拟过程中,海底沉积物类型不同,计算采用的参数 也须调整。本文根据烟台西港区海域海底沉积物类型及水动力条件,选取适合于研究区 的计算参数,利用二维平面数值模型模拟计算烟台西港区海域防波堤工程建设引起的海 底泥沙冲淤变化,同时采用实测水深资料对比分析,探讨研究防波堤建设对研究海域海底 地形变化的影响,为其他海岸工程建设提供参考依据。

1 研究区域概况

烟台西港区位于套子湾西侧、顾家围子山东侧的海域。研究海区以风浪为主,强浪向 和次强浪向分别为 N 向和 NNE 向。研究海区海流为往复流,最大流速约 30 cm/s。

(陈 靖 编辑)

<sup>\*</sup> 收稿日期:2015-09-17 资助项目:山东省自然科学基金项目——细粒土侵蚀强度与冲刷深度量化研究(ZR2014DP002) 作者简介:曹成林(1983-),女,工程师,硕士,主要从事海洋工程地质灾害方面研究.E-mail:ccl@fio.org.cn

烟台港所处岸段原为基岩岬角海岸,近岸已建设南北向的防波堤及烟台西港区码头 工程,岸边为已修建的养殖池,养殖池外侧海底有一部分为礁石区,礁石外侧海底主要为 粉砂质细颗粒沉积物。港区建设前研究区属于弱侵蚀的基岩海岸。研究区 2004 年海底 水深地形见图 1。



图 1 研究海区海底水深(m) Fig. 1 Water depth in the study area (m)

2 波流共同作用下泥沙输运数值模拟计算

## 2.1 波流共同作用下泥沙输运数学模型

## 1) 泥沙输运方程

泥沙的水动力模型采用二维平面数值模型,泥沙输运方程:

$$\frac{\partial DS}{\partial t} + \frac{\partial u DS}{\partial x} + \frac{\partial v DS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (DK_x \frac{\partial S}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (DK_y \frac{\partial S}{\partial y}) + \alpha \omega_s (\beta S_* - S), \quad (1)$$

式中,S为含沙量; $D=H+\eta;\omega$ 为悬沙沉速; $S_*$ 为水流挟沙力; $\beta$ 为线性比例系数; $\alpha$ 为沉降机率; $K_x$ 、 $K_y$ 分别为X、Y水平方向的扩散系数; $\omega_s$ 为颗粒沉降速度。

2)底床变形计算方程

底床变形计算方程采用如下计算公式

$$\gamma_s \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\alpha \omega_s (\beta S_* - S), \qquad (2)$$

式中, γ。为泥沙容重, η为底床冲淤厚度。

3)模型概况

本研究使用非结构网格技术(Flexible Mesh Approach)对计算区域进行空间离散。 通过使用非等距三角形网格,使模型中的陆地岸线保持相对平滑,从而最大程度减少锯齿 岸线对计算结果的不利影响。研究区所在海域计算网格空间步长约15 m。

4)水动力模型验证

采用国家海洋局第一海洋研究所 2014-07-28T10:00-29T11:00 在工程海域 1 个站 潮位资料和 6 个站海流实测资料对模型进行验证(图 2)。通过潮位验证曲线(图 3)、潮流 验证曲线(图 4)可知,计算潮位过程线、潮流流速和流向过程线与实测基本吻合,表明所 采用潮流数学模型较好的模拟了工程区附近海域潮流变化规律,所选用的计算参数是合 理的,能够满足进一步研究的需要。



图 2 潮位、潮流验证点站位图 Fig. 2 Locations of Tidal level and tidal current verification stations





Fig. 4 Current verification curve

#### 2.2 模型参数计算结果

#### 1)资料引用

参数选取对于模型计算结果具有重要的意义,为了较准确的计算研究区海底冲淤量, 采用 2014 年研究区海底沉积物实际调查资料计算模型中所需要的参数。研究区海底沉 积物类型如图 5 所示。由图可知,研究区主要沉积物类型为粉砂质砂及粉砂,中值粒径为 6~125 μm。



图 5 研究区海底沉积物类型及中值粒径(µm)分布图 Fig. 5 Distributions of sediment typies and medium diameters(µm) of seabed sediments in the study area

### 2) 泥沙起动临界值

工程区海底沉积物主要为粉砂质细颗粒物质,因此泥沙起动的临界切应力采用唐存 本考虑泥沙的黏性导出的公式<sup>[5]</sup>:

$$\tau_{c} = \frac{1}{77.5} \left[ 3.2(\gamma_{s} - \gamma)D + (\frac{\gamma_{b}}{\gamma_{b0}}) \times \frac{\mathrm{K}}{D} \right], \tag{3}$$

式中, $\gamma$  为水容重; $\gamma_{b0}$  为床面泥沙稳定密实容重,取 1.6 g·cm<sup>-3</sup>; $\gamma_{b0}$  为土体容重;K= 2.842×10<sup>-3</sup>;D 为土体中值粒径( $\mu$ m)。

3)水流挟沙力

本文采用刘家驹关于波浪挟沙能力经验公式计算在风浪作用下的泥沙悬浮能力:

$$S_* = 0.027 \ 3\gamma_s \frac{(|V_1| + |V_2|)^2}{gh}, \tag{4}$$

式中,V1为平均潮流流速与风生流流速之和;V2为波浪水质点的平均水平流速。

28

4)颗粒沉降速度

由于工程区悬沙含量较小,泥沙絮凝沉降作用不明显,计算时沉速 ω,采用斯托克斯 公式:

$$\omega_s = \frac{1}{18} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g \frac{D^2}{v}, \qquad (5)$$

式中,v为运动黏性系数,取1.31 mm<sup>2</sup>/s。

5)参数计算结果

根据以上公式及图 5 中沉积物粒度参数计算研究区海底沉积物的起动流速、挟沙力 及沉降速度,计算结果见表 1。

序号	$D/\mu{ m m}$	水深/m	$\tau_c/Pa$	$S_*$ / mg · L <sup>-1</sup>			/mm • a <sup>-1</sup>
				1 m≪ <i>H</i> <2 m	2 m≪ <i>H</i> <2.5 m	2.5 m≪ <i>H</i> <3.0 m	$\omega_{s}$ / mm • s ·
1	25	7.0	0.188	302	450	628	0.43
2	19	15.0	0.239	125	168	218	0.24
3	8	21.5	0.563	70	92	118	0.04
4	7	21.5	0.602	70	92	118	0.04
5	7	21.0	0.602	72	96	122	0.04
6	15	21.0	0.308	72	96	122	0.14
7	11	25.0	0.401	55	72	91	0.08
8	6	7.0	0.690	302	450	628	0.03
9	10	20.0	0.429	78	104	133	0.07
10	8	25.1	0.526	54	71	91	0.05
11	21	22.8	0.225	63	83	106	0.28
12	16	17.0	0.289	102	136	175	0.16
13	31	28.0	0.160	46	60	75	0.65
14	13	26.4	0.351	50	66	83	0.11
15	17	22.8	0.271	63	83	106	0.19
16	109	22.6	0.112	64	85	108	7.83
17	125	28.1	0.117	46	59	75	10.33
18	27	18.7	0.178	87	116	149	0.49
19	22	25.0	0.212	55	72	91	0.32

表1 模型参数计算结果

Table 1 Calculated parameters used in the model

#### 2.3 海底冲淤强度计算结果

根据上述计算方法及参数计算结果,计算研究区海底冲淤强度(图 6)。由图 6 可知, 研究区东侧海域海底为侵蚀冲刷状态,冲刷速率约 0~0.06 m/a,该区域海底冲刷主要是 由于研究区受 NE 向强浪作用,海底沉积物在 NE 向浪作用下被运移至防波堤附近后落 淤。防波堤附近海域海底为弱淤积,淤积幅度较小,约 0~0.06 m/a,其原因主要是由于 防波堤及矿石码头凸入海中,潮流在两侧形成回流,悬沙落淤所致。在矿石码头堤头处, 由于堤头挑流作用,水动力对海底作用增强,产生堤头冲刷,冲刷速率约 0.02~0.10 m/a。



Fig. 6 The annual scouring and depositing rates obtained by numerical simulation in the study area (m)

## 3 模型计算结果与海底实测水深对比分析

## 3.1 海底实测泥沙冲淤变化特征分析

在海床稳定的前提下,水深的变化可以表征海床底部沉积物的输移变化。由于研究 海区地质构造相对稳定,特别是在几十年的时间尺度内,可认为海床是稳定的。因此,采 用水深资料对比法,结合工程区水动力,分析研究区海床底部沉积物的泥沙输移变化特 征。

本文收集了研究区 2004 年与 2014 年两期实测水深资料,平面坐标统一到 WGS84 坐标,将深度统一到理论深度基准面,采用 surfer 绘图软件绘制两期水深的等值线图,再 用 AutoCAD 绘制研究区海底地形地貌图(图 7)。根据研究区水动力特征对 2 期水深地 形资料进行详细的对比分析。由于 2014 年水深资料仅有防波堤东侧区域一部分,考虑到 对比结果的准确性,本文仅对防波堤东侧海域的冲淤趋势进行分析。

由图 7 可知,研究海域海底地形变化呈条带状。与 2004 年相比,在防波堤东侧近岸 区 5 m 以浅海域,由于海底沉积物主要为礁石,水深变化不大。在近岸防波堤堤根处有 微弱的淤积,幅度约 0.01 cm/a,考虑测量误差原因,可认为该区域海底地形也处于冲淤 平衡的状态。在 15 m 以深海域海底均呈淤积趋势,淤积幅度约 0~0.05 m/a。而在水深 约 5~10 m 的海域,以及防波堤以东 700 m 海域海底出现一条冲刷带,冲刷幅度约 0~ 0.05 m/a,其中研究区东侧海域的海底冲刷幅度稍大,约 0.05~0.08 m/a。



图 7 研究区 2004-2014 年间海底冲淤图



## 3.2 实测结果与模拟结果对比讨论

通过图 6 与图 7 的对比分析可看出,在近岸区海底冲淤计算结果与实测值有一定的 差异外。在研究区东侧及 10 m 以深的海域,模型计算结果与实测冲淤趋势基本一致。

在研究区东侧海域,计算结果与实测冲淤趋势相同,海底均是冲刷状,冲刷强度基本都在 0~0.06 m/a,局部区域冲刷量最大达到 0.08 m/a。而在防波堤附近、15 m 以深的海域, 近岸及东侧的再悬浮泥沙在潮流回流作用下,运移至此落淤,淤积速率约 0~0.05 m/a。

在防波堤堤根及养殖池外侧区域,计算结果与实测值有一定的差异。根据实测结果, 在养殖池外东侧凹入的局部海域海底呈淤积状态,而模型计算结果则显示在养殖池外东 侧由近岸至深海区海域全部为冲刷状态,两种计算方法出现相反结果。此外,在防波堤堤 根处也出现不同的冲淤态势,实测结果显示在防波堤堤根处有微弱的冲刷,考虑误差原因 可认为水深基本未变,而在模型计算结果中,在堤根处则是淤积状态。

4 结果与讨论

1)研究区泥沙来源较少,波浪、潮流对基岩海岸的侵蚀,是研究海域最重要的泥沙来 源。研究区海底沉积物主要为粉砂质砂及粉砂等细颗粒沉积物,中值粒径为 6~125 μm。 海底沉积物运移方式主要为悬移质输沙,其较为典型的泥沙运移模式是"波浪掀沙,潮流 输沙"。研究区海底沉积物起动临界力值较小,为 0.112~0.690 Pa,说明研究区泥沙易 于再悬浮。

2)构筑物对海底冲淤趋势的影响主要是由于对水动力的改变引起。研究区受 N 向和 NNE 向波浪作用较为明显,且研究区水深较大,波浪在防波堤堤根处破碎,破浪破碎及反射均增强了对海底的作用力。因此,泥沙在波浪作用下起动,后被潮流运移至深水区

沉降。由此形成"浅水冲深水淤"的态势,即防波堤外侧海域在近岸为冲刷态势,冲刷强度 为 0~0.05 m/a, 而 15 m 以深的海域海底出现淤积,淤积速率约 0~0.05 m/a。

3)研究区东侧海域海底出现大面积的冲刷区,冲刷强度约0~0.08 m/a。此区域海 底产生冲刷主要是由于东侧海底沉积物在 NNE 向浪作用下被掀起,而后被潮流输移至 防波堤附近落淤。

4)由对比结果分析可知,整体上海底冲淤趋势计算结果与实测冲淤量基本一致。在 受构筑物建设影响较小的区域内,即研究区东侧及 15 m 以深的海域,计算与实测结果在 冲淤趋势及量值上均较为接近。而在构筑物建设影响程度较大的海域,尤其是近岸及防 波堤堤根附近,计算结果与实测结果相差较大。究其原因,可能与近岸处构筑物使水动力 发生变化,波浪及潮流均受到地形地貌的影响而有所改变,具有一定的不规律性,因此计 算结果与实测结果相差较大。

#### 参考文献

[1] 宋慧芳,李昌良,高学平.波浪作用下堤前冲淤研究综述[J].海洋技术,2007,26(1):80-85.

[2] 张玮,刘燃,钱伟,等. 大型海岸工程对水流和泥沙运动的影响研究[J]. 水道港口,2014,35(1):1-7.

[3] 解鸣晓,张玮. 连云港口门防波堤建设对航道回淤影响数值研究[J]. 泥沙研究,2008(5):15-21.

[4] 崔方水,顾磊,李文丹. 田湾核电站扩建工程泥沙问题研究[J]. 水道港口,2013,34(4):323-326.

[5] 常瑞芳.海岸工程环境[M].青岛:青岛海洋大学出版社,1997:128-129.

## Research on the Influence of Breakwater Construction to Seabed Sediment Scouring and Silting Environment

CAO Cheng-lin, ZHANG Yong-qiang, XIONG Cong-bo, HU Ze-jian, LI Xia

(The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: By taking the Bajiao sea area of Yantai as an example, the influence of breakwater construction to seabed sediment scouring and silting environment is studied and evaluated by numerical simulation and comparison with measured data respectively. The results show that the breakwater construction in the study area can lead to a change of seabed sedimentation from the original equilibrium state into a state of "scouring in the shallow water and depositing in the deepwater", with the scouring and the depositing rates being both  $0 \sim 0.06$  m/a. It is also revealed that the trends of sediment transportation resulted from the numerical calculations and the measurements are basically the same in the study area, except for the boundary areas close to the breakwater. **Key words:** breakwater; numerical simulation; sediment transportation