

基于XBeach模型的离岸堤群防护效果评价指标

朱磊^{1,2}, 孙家文^{3,4}, 王宏⁴, 房克照^{2,4}, 张洪艳⁴

(1.河北省地矿局第八地质大队,河北秦皇岛 066000; 2.河北省海洋地质资源调查中心,河北秦皇岛 066000; 3.国家海洋环境监测中心,辽宁大连 116023; 4.大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁大连 116024)

摘要: 离岸堤等海岸防护工程会引起波浪的绕射和折射,改变海岸区域的水动力情况。针对 XBeach 模型进行扩展以提高波浪绕射作用下波浪场、流场和岸滩演变的预测精度,并利用双突堤绕射试验对模型进行验证,数值计算结果与实测结果吻合较好。同时开展了坡度为 1:50 的理想平直海滩(含离岸堤)的演化数值试验,试验结果表明改进后岸滩演变更加合理。基于拓展的 XBeach 模型建立了考虑工程量的离岸堤群防护效果评价体系,同时在特定条件下对口门宽度及离岸堤高度对平直沙质海岸可能产生的影响进行了模拟和分析,并给出了该条件下的最优方案。所提出的指标区别于以往学者对离岸堤后沙质海滩的形态演变研究,具有较高的实际工程应用价值。

关键词: XBeach; 岸滩演变; 离岸堤; 评价指标

中图分类号:P753 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2020)05-0684-10

Evaluation index of protection effect of breakwaters based on XBeach model

ZHU Lei^{1,2}, SUN Jia-wen^{3,4}, WANG Hong⁴, FANG Ke-zhao^{2,4}, ZHANG Hong-yan⁴

(1.The Eighth Geological Brigade, Hebei Geological Prospecting Bureau, Qinhuangdao 066000, China; 2.Hebei Center of Marine Geological Resources Survey, Qinhuangdao 066000, China; 3.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 4.State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Shore protection structures such as detached breakwaters may cause wave diffraction and refraction, and change the hydrodynamics in coastal region. An extended version of XBeach model is presented in this paper to improve the accuracy of prediction on wave, current fields and sandy beach evolution when wave diffraction takes effect. The extended model is validated by comparing the simulation results with the physical test of wave propagation through a breakwater gap, with satisfactory agreement. Numerical simulation test was carried out for an ideal flat beach with a slope of 1:50 behind a breakwater and results show that the extended model generates more reasonable results. Based on the extended XBeach model, the evaluation system of the protection effect is established for the offshore breakwater group considering the engineering quantity. The possible effects of width and height of breakwaters on the evolution of plane sandy coast are analyzed under certain wave condition based on numerical tests leading to the optimal scheme finally presented. The proposed index is different from previous researches on the morphological evolution of sandy beaches behind the breakwaters, and has high practical engineering value.

Key words: XBeach; beach evolution; detached breakwater; evaluation index

收稿日期:2019-06-28, 修订日期:2019-08-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51809053, 51709054)

作者简介:朱磊(1989-),男,山东潍坊人,工程师,硕士,主要从事海岸工程、人工养滩和数值模拟研究, E-mail: siriusn@126.com

通讯作者:孙家文(1983-),男,山东德州人,副研究员,博士,主要从事海岸动力学方面研究, E-mail: jwsun@nmemc.org.cn

随着沿海地区旅游资源的不断开发,离岸堤、丁坝等构筑物被大量用于海滩的防护和修复。作为一种常见的海岸地区防护结构,离岸堤在岸滩侵蚀防护方面的主要作用是削减外海波浪能,使泥沙颗粒在堤后绕射波高相对较小的波影区落淤,形成沙嘴或连堤沙洲,达到拓宽滩面和减缓侵蚀的目的。但盲目地建设此类构筑物,会使近岸的波浪场、波生流场发生剧烈变化,从而造成不平衡输沙,破坏沙质海岸的稳定性。从2016年开始,在哥伦比亚加勒比海岸已修建了至少1484座包括丁坝、离岸堤、海墙等在内的硬质结构^[1],其中90%的构筑物防护效果不理想,甚至与预期相反,自然岸线被人工岸线取代,造成上游沙源被阻断,加剧侵蚀进程,产生新的侵蚀热点等严重后果。相似的惨痛经历也同样发生在其他国家^[2-4]。这些悲剧的不断上演很大程度上归因于缺乏对构筑物防护效果科学的论证和长远评估。目前已有部分国家和地区意识到该问题,开始拆除或重新改建沙质海岸地区的硬防护工程^[1,5-6],但如何合理地操作仍有待进一步的研究,因此离岸堤对沙滩防护效果的预测研究十分重要。

在过去的数十年间,众多学者对离岸堤后沙质海岸的岸滩响应进行了研究,通常认为离岸堤的几何特征(堤长、离岸距离、开口宽度等)是影响离岸堤后岸滩响应的三大因素^[7]。Dally^[8],黎维祥^[9]均通过研究建立了离岸堤长度和离岸距离与连岛坝和沙嘴形成的经验关系。Suh^[10]以及Harris^[11]则通过物理模型试验研究了离岸堤群口门宽度对堤后岸线的演变形态的影响。最近, Jackson等人^[12]则对离岸堤群与岸线夹角对岸滩演变的影响进行了相关研究。在以往研究中,许多学者都建立了经验关系表达式,说明了离岸堤各项几何特征与岸线响应的相关关系^[7],但研究重点大多是沙质海岸所形成的最终岸线形态,并未从实际角度出发,结合离岸堤具体的防护效果和实际工程量给出合理的量化指标。另外,以往的研究往往依赖于众多的现场实测和模型试验,不仅耗费大量的人力成本,同时也耗费大量的时间成本,虽然得到的结果较为满意,但有时很难满足实际工程中的迫切需要。本研

究基于能够考虑绕射的XBeach数值模型,建立了一个满足工程实际需求的离岸堤防护效果评价指标,能较好地解决上述问题,对工程应用及科学研究都有建设性的指导意义。

1 材料与方法

1.1 XBeach模型及改进

XBeach^[13]是一个基于过程的开源的数值模型,用于近岸水域及海岸地区的地形动力模拟,最初被发展用于极端风暴潮与飓风条件对沙质障壁岛系统影响的数值模拟^[14-15],能较好地解决包括海滩和沙丘侵蚀、越顶流冲刷、内陆洪水等在内的海岸地貌演化问题。XBeach不仅代码开源,而且提供了开放的模型维护平台和用户使用论坛,这使得科研工作者能够根据研究需求对模型进行改进,同时能够跨越空间距离与世界各国的学者进行模型开发、使用和完善方面的交流。XBeach模型核心模块涉及波浪计算、波生流计算、输沙计算和岸滩地形更新计算,最新版本拥有3种波浪模拟模式:(1)定常模式(stationary mode);(2)破波拍模式(surf beat mode);(3)非静压模式(non-hydrostatic mode)。这3种模式中,非静压模式属于波浪相位解析类模式,计算最为准确,但需要更小的空间分辨率和更小的时间步长,计算代价高,因此,目前并不适用于较大空间区域和长时间跨度的工程实践数值模拟。定常模式和破波拍模式采用相位平均方法计算波浪场,利用辐射应力概念驱动平均流场的思路,计算效率高,是目前XBeach应用的主要模式,本文的工作基于破波拍模式。

波浪绕射现象在近岸地区十分常见,多出现在离岸堤、海岬、近岸岛屿^[16]、浅滩等不规则地形^[17]和其他存在局部能量耗散的区域^[18]。绕射效应的存在使得近岸的波浪及波生流场变得更加复杂,并且对岸滩的地形演化产生显著影响^[19-21]。目前XBeach模型中计算成本较低的定常模式和破波拍模式无法考虑短波绕射效应^[22],因此当XBeach被用于绕射作用明显的区域时,可能会带来不确定性^[23]。为了能够更加准确地考虑波浪绕射效应对波浪场、流场和岸滩演变带来的影响,建立更加准确的评价指标体系,本文对XBeach

模型进行了改进和拓展,使其能够更加准确地模拟绕射现象。

XBeach 控制方程繁多,在此仅给出考虑绕射效应时对波作用量沿空间坐标及角度方向的传播速度进行修正的相关表达式,其他公式保持不变。当不考虑波流相互作用时,波作用量沿空间坐标及角度方向的传播速度 c 可由下式得到:

$$\begin{aligned} c_{x,0}(x,y,t,\theta) &= c_g \cos(\theta) \\ c_{y,0}(x,y,t,\theta) &= c_g \sin(\theta) \\ c_{\theta,0}(x,y,t,\theta) &= \frac{\sigma}{\sin h 2kh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: c_g 为群速度; h 为局部水深; θ 为波浪传播方向(角度)。

基于 Holthuijsen 等人^[24]的方法,在改进的 XBeach 模型中将式(1)中的波浪传播速度替换为:

$$\begin{aligned} c_x &= c_{x,0} \bar{\delta}_{E_w}, c_y = c_{y,0} \bar{\delta}_{E_w} \\ c_\theta &= c_{\theta,0} \bar{\delta}_{E_w} - \frac{\partial \bar{\delta}_{E_w}}{\partial x} c_{y,0} + \frac{\partial \bar{\delta}_{E_w}}{\partial y} c_{x,0} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\bar{\delta}_{E_w} = \sqrt{1 + \delta_{E_w}}$ 并且绕射参数 δ_{E_w} 的表达式为:

$$\delta_{E_w} = \frac{\nabla(cc_g \nabla \sqrt{E_w})}{k^2 cc_g \sqrt{E_w}} \quad (3)$$

式中: k 为采用程函方程进行修正后得到的波数,用于计算绕射参数的总波能 $\sqrt{E_w}$ 通过在方向上积分得到:

$$E_w(x,y,t) = \int_0^{2\pi} E(x,y,t,\theta) d\theta \quad (4)$$

可见,绕射效应主要通过改进后的方向变化速率 $c_\theta(\theta$ 域上的传播速度)来反映。需要指出,采用这种方法考虑绕射,需要对波浪场进行光滑,否则计算容易发散失败^[24],为此在 XBeach 输入文件中增加光滑次数关键字 `itertimes`。

1.2 模型验证

1.2.1 波高验证

Yu 等人^[25]开展了一系列的物理模型试验来研究不同入射方向波浪在防波堤口门后方所产生的绕射及折射现象,为数值模型验证提供了宝贵的数据。对于不规则波,试验采用 JONSWAP 谱造波,试验水池尺寸为 55 m(长)×34 m(宽)×1.3 m(高),试验水深为 0.4 m,防波堤宽度为 0.35 m。为了对扩展的 XBeach 模型验证,本文选取了一组工况(工况 2)进行模拟,口门宽度为 4L(即 4 倍波长),单向波浪与口门轴线呈 45°夹

角斜向入射,入射有效波高 0.05 m,谱峰周期 1.20 s。试验布置如图 1 所示。

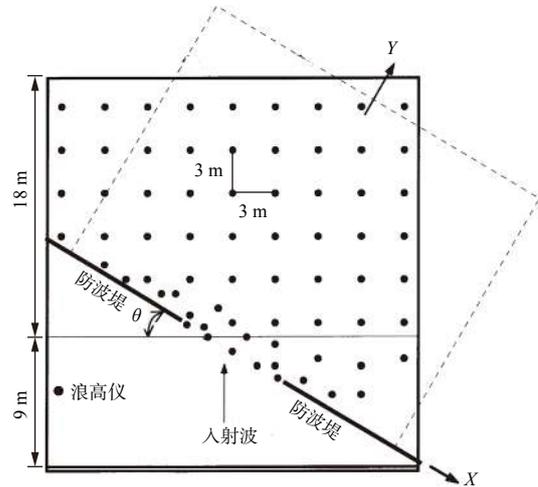


图 1 试验布置

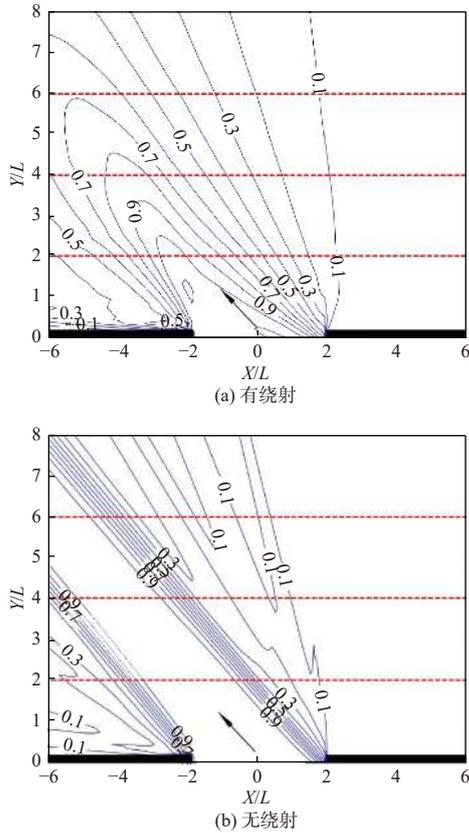
(修改自文献 [25])

Fig. 1 Layout of the wave basin

对于数值模型设置,采用等间距网格进行模拟,网格间距为 $\Delta n = \Delta s = 0.196$ m,则计算域所涵盖的网格数为 122(沿岸方向)×137(垂岸方向)。绕射光滑迭代次数,将方向扩散因子设置极大值 $s=100000$ 来产生单向入射的不规则波,其他参数设置取默认值。

图 2(a)(b) 所示为工况 2(波浪入射角度为 45°)防波堤口门后有无绕射作用时计算所得绕射系数 ($K_d = H_s/H_{s,i}$) 随无因次化空间的分布情况。从图中可以看出,当不考虑绕射时,波浪受入射角度及模型计算角度分辨率的影响,出现“伪绕射”现象,波能仍主要集中于非阴影区,防波堤后阴影区波高沿水平 X 方向衰减很快。而考虑绕射后,计算得到的波高分布更为合理,由于绕射作用,波高在堤后遮蔽区的衰减变慢。

为进一步验证改进模型的有效性,选取平行于离岸堤且位于口门后方不同位置(即 $Y=2L, 4L, 6L$)的 3 个横断面(如图 2 所示)上的计算绕射系数与实测结果进行比较,见图 3。可以看出,相较于不考虑绕射的情况,改进后的模型在口门非阴影区的波高分布更加接近实测值,且在阴影区的计算结果也优于未改进之前的结果,这说明改进后的模型在绕射效应明显的情况下,能够更为准确地计算出防波堤后的波高分布。



($X=0$ 表示口门中心; 箭头表示入射方向; 虚线表示图 3 中所比较的绕射系数剖面)

图 2 绕射系数空间分布比较

Fig. 2 The distribution of diffraction coefficient from simulation

1.2.2 Nicholson 离岸堤测试算例

Nicholson 等^[26]开展了一个包含离岸堤的坡度为 1 : 50 的理想平直海滩的数值演化试验, 比较了 5 种海岸区域形态动力学模型的性能。Lesser 等人^[27]之后也采用相同的模型设置对 Delft3D 模型进行测试。防波堤长 300 m, 距海岸线 220 m。泥沙颗粒中值粒径为 $d_{50}=0.25$ mm。入射波为单向波, 波高 $H_{rms}=2.0$ m, 谱峰周期 $T_p=8.0$ s。模型的空间分辨率和角度分辨率分别为 $\Delta n = \Delta s = 10$ m 和 $\Delta\theta=5^\circ$ 。根据 Nicholson 等人^[26]的研究, XBeach 模型的其他参数使用默认值。波浪作用 72 h 后的计算水深和流场如图 4 所示。可见, 是否考虑绕射所得到的波生流场和地形演变结果差异明显。在不考虑绕射情况下, 漩涡主要集中在防波堤堤尖附近, 平静的阴影区泥沙淤积较多。考虑绕射后, 计算结果更加合理。

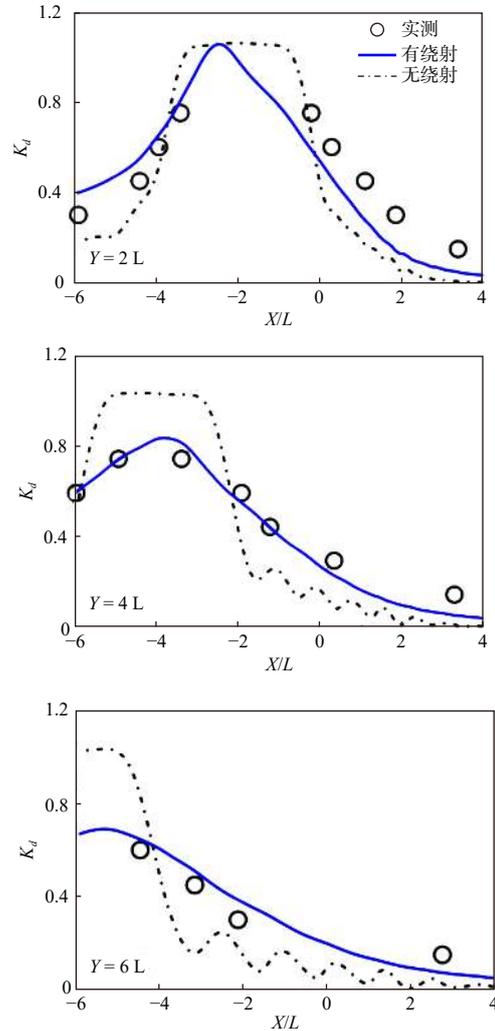


图 3 模型改进前后计算绕射系数与不同剖面实测绕射系数的比较

Fig. 3 Comparison of observations with computed diffraction coefficients before and after modification along transects for the test

1.3 评价指标

1.3.1 指标的建立

各国研究学者表明离岸堤的几何尺度(离岸距离、离岸堤长度、离岸堤群口门宽度以及离岸堤堤顶高程)是影响海滩形态变化的因素之一, 而这些几何尺度也与建造离岸堤的工程量及施工难度密不可分。在极端天气下, 海滩发生侵蚀是不可避免的, 但离岸堤的存在削弱了侵蚀的程度。本节基于 XBeach 的数值模拟建立了一个新的评价指标 I , 以达到结合其工程量对不同尺度的离岸堤群的沙滩防护效果进行综合评价的目的。

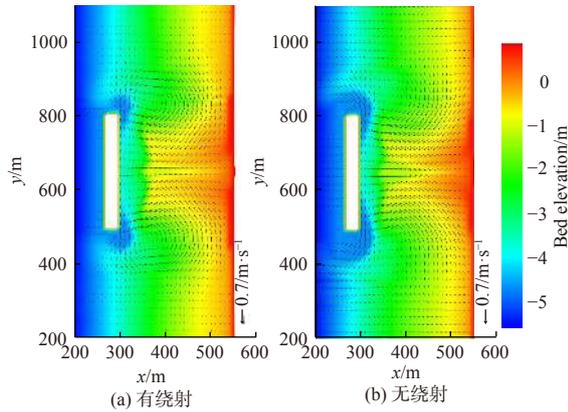


图 4 72 h 波浪作用后计算地形和流场

Fig. 4 The computed bathymetry and flow field after 72 hours of wave action for offshore breakwater test

$$I = S_I \times L_I \times W_I \times H_I$$

$$= \frac{S_h - S_m}{S_{tot}} \times \left(1 - \frac{L_{B1} + 2 \times \sum_{i=1}^{n_B-1} L_{Bi} + L_{Bn_B}}{L_I} \right) \times \left(1 - \frac{0.5W}{X} \right) \times \left(1 - \frac{\alpha H_B}{h} \right) \quad (5)$$

式中： S_I 、 L_I 、 W_I 、 H_I 分别为面积指标、长度指标、宽度指标和高度指标，分别等于第二行中的第一、二、三、四项乘数。 S_{tot} 为原始地形(即不存在离岸堤)条件下，控制波浪作用一定时间后，预设置离岸堤区域被侵蚀滩面的面积，它等于保护岸线总长度 L_I 与岸线后退距离的乘积； S_h 为修建离岸堤群后，相较 S_{tot} 被保留住的面积； S_m 为修建离岸堤群后，位于无堤时侵蚀岸线后方被加剧侵蚀部分的面积，该值可能为 0； n_B 表示保护岸线长度范围内，离岸堤的数量($n_B \geq 2$)； L_{Bi} 为第 i 个离岸堤长的一半； L_{Bn_B} 为第 n_B 个离岸堤长的一半； L_I 为人为定义的保护岸线的总长度； W 为离岸堤的宽度，假设每个堤的宽度是相等的； X 为离岸堤顶中心到初始岸线的水平距离，当离岸堤的离岸距离不一致时，可取平均离岸距离； H_B 表示离岸堤的高度，假设所有离岸堤位于同样的水深且堤身的高度一致； α 为离岸堤高度系数，在本文中取 0.5； h 指离岸堤处的水深。当 $n_B=2$ 时，式 (5) 中各水平尺度的定义如图 5 所示，图中无堤时侵蚀岸线以上阴影部分为 S_h ，无堤时侵蚀岸线以下的阴影部分为 S_m ，黄色区域为 S_{tot} 。当离岸堤与岸线不完全平行时，也可类似定义评价指标。

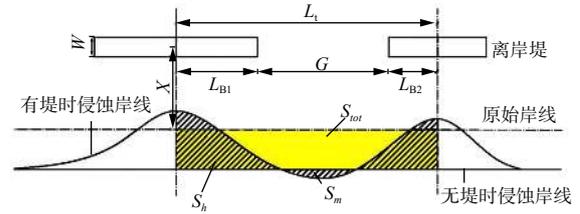


图 5 $n_B=2$ 时，各水平几何尺度定义

Fig. 5 Definition of horizontal geometric scales when $n_B=2$

1.3.2 评价指标的理论及物理意义

上述评价指标是基于离岸堤群在极端天气下所保持的泥沙量与离岸堤工程量之间平衡所建立的，为一个无量纲指标。式 (5) 中等号除右端第一项乘数在泥沙大量淤积的情况下存在大于 1 的概率以外，其他各项均小于 1，且各乘数值越大越好。但第一项乘数与后三项乘数形成制约关系：(一)第二项中，当 $n_B/2 \times \sum_{i=1}^n L_{Bi} = L_I$ 时，说明整个岸线被离岸堤挡住，口门宽度 $G=0$ 。此时 S_I 接近 1 或等于 1，但已经偏离工程设计的需求，即满足防护的同时，兼顾旅游，水体交换，工程经济性等要求，第二项乘数为 0， $I=0$ ；(二)在第三项中，当 $0.5W=X$ 时，说明堤脚已位于初始岸线之上，此时离岸堤变成护岸或海墙，完全背离实际需要，第三项乘数等于 0， $I=0$ ；(三)对于第四项，一般情况下，离岸堤建于破波区，且破碎水深大于入射波高，这里假设当堤身高度为水深的两倍时，已完全不满足景观需求，第四项乘数等于 0， $I=0$ ，因为实际工程中需要离岸堤更低的同时依然保持很好的防护性能，在具体评价时，也可根据实际需要修改离岸堤高度系数 α ；(四)当第二、三、四项中任意一项为 1 时，说明离岸堤不存在，此时 $S_h - S_m = 0$ ， $I=0$ 。

当对式 (5) 中的第二、三项分子分母进行通分后，式 (5) 将变为 4 个面积与垂直尺度的函数，对于图 5，即

$$I = \frac{S_h - S_m}{S_{tot}} \times \frac{G \times (X - 0.5W)}{L_I \times X} \times \left(1 - \frac{0.5H_B}{h} \right) \quad (6)$$

式中： G 为口门宽度。式 (6) 中第二项的物理意义为离岸堤后口门正对水域的面积与离岸堤影响空间的面积之比，换言之，该项所寻求的是在保护岸线及离岸距离一定的情况下，口门宽度尽可能增大，但此时也会影响第一项中的 $S_h - S_m$ 。

从上述式中可以看出, 由于离岸堤各项几何尺度的相对关系, 造成离岸堤各尺度对于评价指标 I 的贡献程度并不相同。因此该评价指标属于相对评价指标, 当只有单个离岸堤的几何尺度发生变化时, 可只考虑 S_l 与对应发生变化的指标, 并帮助寻找最优的离岸堤设置方案。一般的操作方法如下: (1) XBeach 模拟原始岸滩侵蚀状况, 并计算无堤时原始岸滩的岸线后退距离; (2) 使用同样的波浪边界条件, 利用 XBeach 模拟各备选方案侵蚀状态, 并计算各方案实际定义保护岸线长度内的 S_h-S_m ; (3) 计算各方案的 S_{toi} ; (4) 根据各方案的各几何尺度, 计算 I 并比较, I 值最大的方案为最优方案。

2 结果与讨论

2.1 模型设置

在本研究中, 基于 Uda 等人^[28]所采用的 1:20 的平直海滩进行双离岸堤防护的数值模拟。计算域的模拟范围为 2000 m(沿岸方向)×600 m(垂岸方向), 原点坐标(600, 0), 采用均匀网格, 网格间距 5 m($\approx 1/20L$), 入射边界处水深 20 m。海滩的泥沙中值粒径为 0.2 mm, 孔隙率取默认值 0.4。用于模拟极端天气的入射波高 $H_{m0}=3.0$ m, 谱峰周期 $T_p=8.0$ s, 深水波长 $L\approx 100$ m, 单向浪($s=100000$)垂直入射, $\gamma=3.3$, 重力加速度 $g=9.85$ m/s², 采用 JONSWAP 谱造波, 角度分辨率 $\Delta\theta=12^\circ$, 模拟时长为 72 h。为了模拟理想无限长海滩的情况, 设置循环边界参数 $cyclic=1$, 其他模型参数取默认值。设置两道离岸堤位于水深 5 m 处, 堤顶宽 20 m($\approx 0.2L$), 根据 Toyoshima^[29]的研究, 取单个离岸堤长度为 250 m($\approx 2.5L$), 离岸距离取 100 m($\approx 1.0L$), 在本节主要讨论离岸堤口门宽度及堤顶高程对沙质海本节的防护情况。图 6 为当口门宽度为 1 倍波长时, 堤顶高程为 3 m 时的初始地形。

2.2 不同离岸堤口门宽度岸滩防护模拟

为了研究离岸堤口门宽度对岸滩防护效果的影响, 设置 11 组不同口门宽度的方案进行比较, 堤顶高程为 3 m, 各方案的口门宽度如表 1 所示。

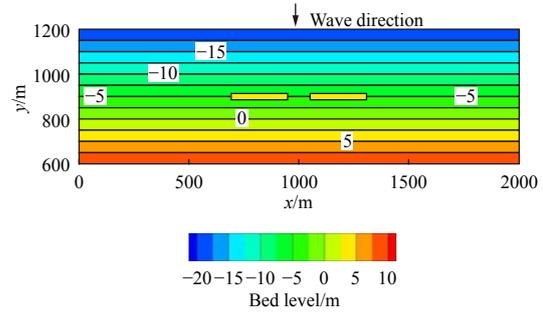


图 6 离岸堤口门宽度为 L 时初始地形

Fig. 6 Initial topography with the width of the gap is L

表 1 不同备选方案的口门宽度

Tab.1 The width of gaps in different schemes

备选方案	口门宽度 G
无离岸堤	L_t
方案一	$0.5L$
方案二	$1L$
方案三	$1.5L$
方案四	$2L$
方案五	$2.5L$
方案六	$3L$
方案七	$3.5L$
方案八	$4L$
方案九	$4.5L$
方案十	$5L$
方案十一	$5.5L$

当离岸堤不存在时, 岸滩呈现强烈的侵蚀特征, 泥沙输运方式为离岸输沙, 虽然离岸平均流速并不大, 约为 0.25 m/s, 但却将沉积物颗粒从滩面挟带至距离初始岸线 200 m 的范围内, 如图 7 中 $G=L_t$ 时所示, 经计算岸线后退距离为 41.665 m。图 7 中 $G=0.5L \sim 5.0L$ 则分别给出了方案一到方案八以及方案十第 60 h ~ 72 h 的平均流场和模拟结束后的侵淤场, 由于左右离岸堤的侵淤情况以及流场和波浪场均相同, 因此, 图中仅给出右侧离岸堤附近的侵淤和流场情况。离岸堤存在时, 由于其遮蔽和波浪的绕射作用, 堤后流速出现水平分量, 使得垂向离岸运动的沉积物变为向离岸堤后掩护区域移动, 并在离岸堤后淤积。与此同时, 由于离岸堤所处水深较浅, 堤前迎浪侧发生少量侵蚀。可以看出由于离岸堤的存在, 离岸堤附近至少 200 m 范围内的流场发生了变化,

但堤后区域的流场状态是十分相似的, 口门宽度越大相似度越高, 这说明口门宽度越大, 离岸堤之间的相互影响越来越小。当口门宽度较窄时, 口门处及口门后方的流场则较不稳定, 呈现漩涡状。从图中可以看出, 当采用 $2.5L$ 的离岸堤长

度时, 岸线的响应状态为出现沙嘴, 且在一定宽度内随着口门宽度的增加, 超出原始岸线显示为淤积的沙嘴宽度也在增加, 当口门宽度大于 $2.5L$ 时, 基本不再增加。但仅凭肉眼并不能判断何种方案最佳。

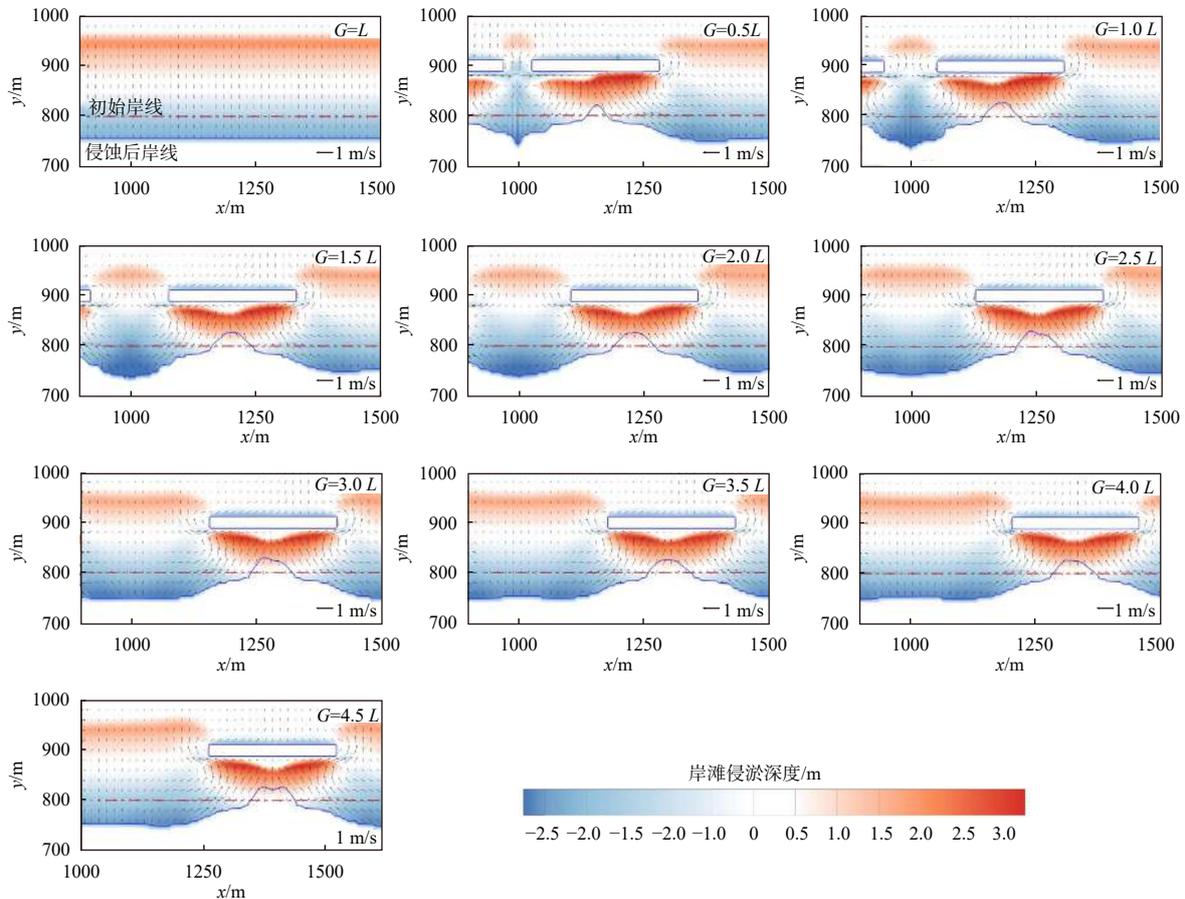


图 7 离岸堤高程 3 m 时不同方案第 60 h ~ 72 h 的平均流场和模拟结束后的侵蚀场

Fig. 7 The average flow field at 60 ~ 72 hours in different schemes and the invasion and morphological changes after 72 hour-simulation with 3-meter-high breakwaters

为此采用新建立的评价指标对上述 11 种方案进行比较, 列于表 2。可见, S_I 随口门宽度的增大并不严格递减, L_I 则随口门宽度增大而严格单调递增, 这说明不能仅依靠单独某个指标对防护效果进行评价。最终在所比较的十一种方案中, 方案五 ($G=2.5L$) 为最佳方案, 但由于 H_I 较小, 造成所有的 I 值均较小。若考虑对 S_I 进行下限设置, 可以在设计方案时减少计算工作量。

2.3 不同离岸堤高度岸滩防护模拟

在上节中, 所采用的离岸堤高程为 3 m, 即绝对不能越浪, 这在实际情况中是几乎不会出现的, 因此需要对离岸堤堤顶的高程进行优化, 以

选定最佳方案。Dean 和 Dalrymple 将堤顶位于波浪波谷线以下的离岸堤称为离岸潜堤^[30], 而离岸潜堤在大浪条件下消浪效果较差, 因此本节基于上节中最佳口门宽度 $2.5L$ (即方案五), 选用堤顶高程位于入射波高 H_{m0} 波谷线以上的离岸堤进行岸滩防护效果的模拟和比较。表 3 所示为各备选方案的离岸堤高度。

当不发生越浪时, 改变堤身高度主要引起堤身坡度的变化, 而当堤身坡度较大时, 由于模型本身的特点, 使得堤前堤后的波高、流场几乎不发生变化, 因此地形也不发生变化。根据模拟, 当堤顶高程为 1 m 时, 仍与堤顶高程为 3 m 时的

表 2 离岸堤高程 3 m 时不同备选方案评价指标比较

Tab.2 Comparison of evaluation indexes in various schemes with 3 m-meter-high breakwaters

方案	G	S_I	L_I	I
方案一	0.5L	0.494	0.167	0.0148
方案二	L	0.455	0.286	0.0234
方案三	1.5L	0.409	0.375	0.0276
方案四	2L	0.380	0.444	0.0304
方案五	2.5L	0.348	0.500	0.0313
方案六	3L	0.281	0.545	0.0276
方案七	3.5L	0.254	0.583	0.0267
方案八	4L	0.224	0.615	0.0248
方案九	4.5L	0.234	0.643	0.0271
方案十	5L	0.217	0.667	0.0260
方案十一	5.5L	0.198	0.688	0.0245

侵淤状态一致, 此时方案五-2 显然更优。图 8 所示为方案五-2 至方案五-7 第 60 h ~ 72 h 的平均流场和模拟结束后的侵淤场。从图 7 中可以看出, 随着离岸堤高程的不断降低, 沙嘴不再出现,

表 3 不同备选方案的堤身高度

Tab.3 The height of detached breakwaters in different schemes

方案	H_B/m	堤顶高程/m
方案五	8.0	3.0
方案五-1	7.0	2.0
方案五-2	6.0	1.0
方案五-3	5.5	0.5
方案五-4	5.0	0
方案五-5	4.5	-0.5
方案五-6	4.0	-1.0
方案五-7	3.5	-1.5

所有岸线均发生后退, 但离岸堤遮蔽区域的后退程度要小于无掩护区域。这是因为离岸堤高程越低, 直接透过离岸堤的水体越多, 离岸堤的掩护效果越差, 这同时也说明是否产生沙嘴不仅与离岸堤的长度有关, 也与离岸堤的高度有关, 但离岸堤的存在确实对削弱到达滩面的波浪能起到一定的作用。离岸堤高程不断降低, 离岸堤口门处的流场变得不再对称, 这是因为此时波浪在

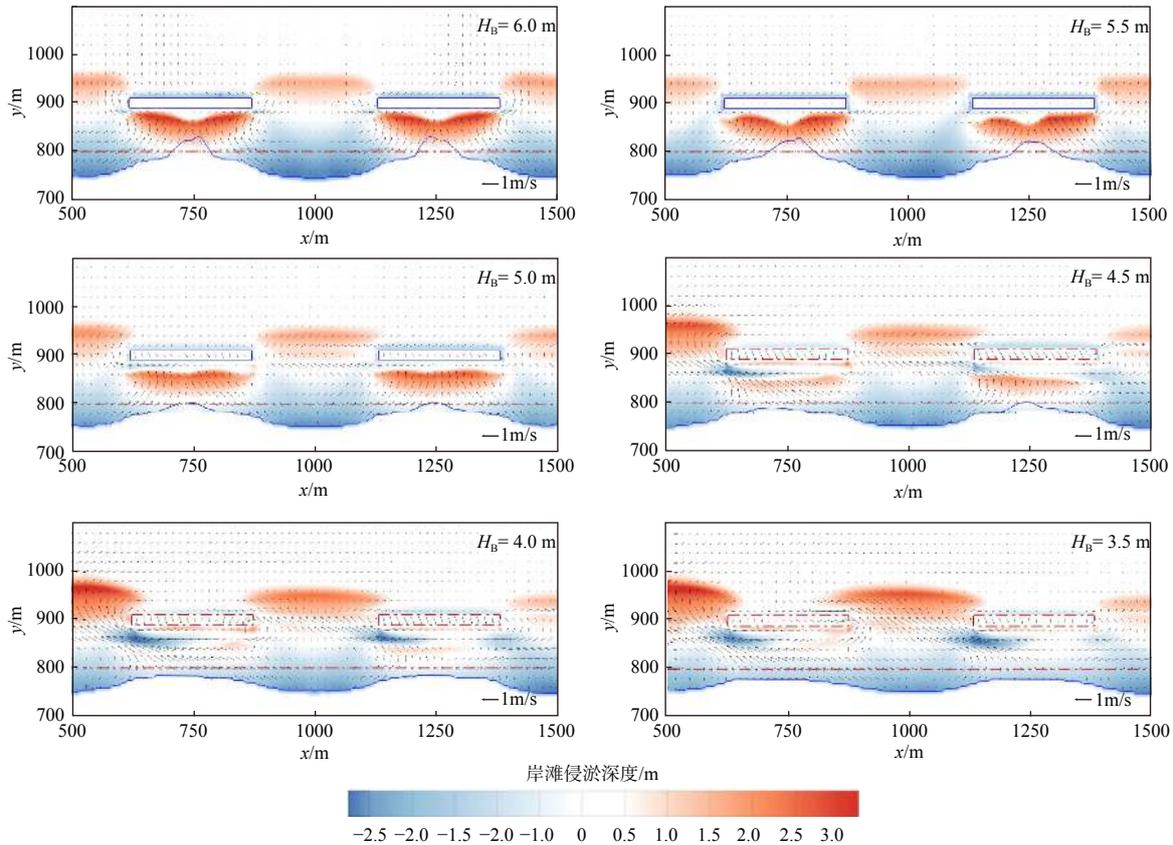


图 8 不同方案第 60 h ~ 72 h 的平均流场和模拟结束后的侵淤场

Fig. 8 The average flow field at 60 ~ 72 hours in different schemes and the morphological changes after 72 hour-simulation

离岸堤附近发生越浪和破碎,发生越浪的水体向堤后两侧流动,使流场的复杂程度增加,但也可能是模型在计算实际入射波浪方向时的误差所引起的。离岸堤高程位于静水位以下时在堤前的侵蚀要略小于出水的离岸堤所产生的侵蚀,但与此同时,堤近岸侧产生了一定侵蚀,且单个离岸堤左侧的侵蚀量大于右侧的侵蚀量(如图8 $H_B = 4.5$ m 时),这是因为离岸堤所处水深较浅,而破碎所产生的流速较大引起的冲刷,因此在实际工程设计中,如何设置离岸堤所处水深和离岸堤高程的关系,需要对具体情况进行仔细的分析。

为进一步比较各方案的综合防护效果,采用评价指标进行评价,结果列于表4。可见,当 $H_B = 5.5$ m, 即堤顶高程为 0.5 m 时方案最佳,且此时 S_I 也达到最大。

表4 不同备选方案评价指标比较

Tab.4 Comparison of evaluation indexes in various schemes

方案	H_B/m	S_I	H_I	I
方案五	8	0.348	0.200	0.0313
方案五-1	7	0.348	0.300	0.0469
方案五-2	6	0.348	0.400	0.0626
方案五-3	5.5	0.418	0.450	0.0847
方案五-4	5	0.358	0.500	0.0805
方案五-5	4.5	0.296	0.550	0.0734
方案五-6	4	0.243	0.600	0.0656
方案五-7	3.5	0.202	0.650	0.0590

综合以上结果说明,当离岸堤长度、离岸距离、离岸堤宽度,以及其他条件与本节中所描述一致时,选取口门宽度为 $2.5L$, 堤顶高程 0.5 m 时,(考虑工程量)综合防护效果最佳,此时基本不形成沙嘴,且能保证最有利岸滩防护效果。综合以上分析,所建立的评价指标能够有效地挑选出最佳离岸堤设置方案,这对于离岸堤群岸滩防护工程设计有着十分重要的意义。

3 结论

本研究对 XBeach 模型进行了扩展,使其能够在波浪绕射发生的情况下更准确地预测水动力条件和海滩的演变。基于改进后的 XBeach 模型所建立的离岸堤群在极端天气下防护效果的评价指标,综合考虑了离岸堤长度、离岸距离、

离岸堤群口门宽度以及离岸堤堤顶高程(即工程量)对岸滩侵蚀面积的影响。依据考虑工程量的防护效果评价指标比选了备选方案,指出出水离岸堤比堤顶位于静水面以下的离岸堤整体防护效果(考虑工程量条件下)更好,当堤顶高程低于一定水平时,沙嘴不再出现。结合改进模型与考虑工程量的防护效果评价指标所构成的评价体系能够有效地得出较优综合方案,对实际工程设计有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] RANGEL-BUITRAGO N, WILLIAMS A T, ANFUSO G. Hard protection structures as a principal coastal erosion management strategy along the Caribbean coast of Colombia. A chronicle of pitfalls[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 156: 58-75.
- [2] PRANZINI E, ANFUSO G, CINELLI I, et al. Shore protection structures increase and evolution on the northern Tuscany coast (Italy): influence of tourism industry[J]. *Water*, 2018, 10(1647): w10111647.
- [3] BERNATCHEZ P, FRASER C. Evolution of coastal defence structures and consequences for beach width trends, Québec, Canada[J]. *Journal of Coastal Research*, 2012, 28(6): 1550-1566.
- [4] ESCUDERO-CASTILLO M, FELIX-DELGADO A, SILVA R, et al. Beach erosion and loss of protection environmental services in Cancun, Mexico[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 156: 183-197.
- [5] PRANZINI E, ROSSI L, LAMI G, et al. Reshaping beach morphology by modifying offshore breakwaters[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 154: 168-177.
- [6] PRANZINI E, WILLIAMS A. Coastal erosion and protection in Europe[M]. New York: Routledge, 2013.
- [7] 季小强, 陆培东, 喻国华. 离岸堤在海岸防护中的应用探讨[J]. *水利水运工程学报*, 2011, (1): 35-43.
- [8] DALLY W R, POPE J. Detached breakwaters for shore protection[R]. Vicksburg: Army Engineer Waterways Experiment Station, 1986.
- [9] 黎维祥, 刘家驹. 沙质海岸突式建筑物下游离岸堤防护的试验研究[J]. *水利水运科学研究*, 1991, (3): 227-232.
- [10] SUH K, DALRYMPLE R A. Offshore breakwaters in laboratory and field[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1987, 113(2): 105-121.
- [11] HARRIS M M, HERBICH J B. Effects of breakwater spacing on sand entrapment[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1986, 24(5): 347-357.

- [12] JACKSON N L, HARLEY M D, ARMAROLI C, et al. Beach morphologies induced by breakwaters with different orientations[J]. *Geomorphology*, 2015, 239: 48-57.
- [13] ROELVINK D, RENIERS A, VAN DONGEREN A, et al. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(11/12): 1133-1152.
- [14] MCCALL R T, VAN THIEL DE VRIES J S M, PLANT N G, et al. Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(7): 668-683.
- [15] LINDEMER C A, PLANT N G, PULEO J A, et al. Numerical simulation of a low-lying barrier island's morphological response to Hurricane Katrina[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(11/12): 985-995.
- [16] GODA Y. Random seas and design of maritime structures[M]. New Jersey: World Scientific, 2010.
- [17] DALRYMPLE R A, SUH K D, KIRBY J T, et al. Models for very wide-angle water waves and wave diffraction. Part 2. Irregular bathymetry[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989, 201: 299-322.
- [18] DALRYMPLE R A, KIRBY J T, HWANG P A. Wave diffraction due to areas of energy dissipation[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1984, 110(1): 67-79.
- [19] TANG J, LYU Y, SHEN Y M, et al. Numerical study on influences of breakwater layout on coastal waves, wave-induced currents, sediment transport and beach morphological evolution[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 141: 375-387.
- [20] NAM P T, LARSON M. Model of nearshore waves and wave-induced currents around a detached breakwater[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2010, 136(3): 156-176.
- [21] PÉREZ BOLOIX G. Shoreline response to detached breakwaters: overview of design guidelines and application to field cases[D]. Spain: Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- [22] CAMINADA I. The influence of diffraction on artificial pocket beaches: a morphological assessment with XBeach[D]. Delft: Delft University of Technology, 2018.
- [23] MCCALL R T. The longshore dimension in dune overwash modelling: development, verification and validation of XBeach[D]. Delft: Delft University of Technology, 2008.
- [24] HOLTHUIJSEN L H, HERMAN A, BOOIJ N. Phase-decoupled refraction-diffraction for spectral wave models[J]. *Coastal Engineering*, 2003, 49(4): 291-305.
- [25] YU Y X, LIU S X, LI Y S, et al. Refraction and diffraction of random waves through breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 2000, 27(5): 489-509.
- [26] NICHOLSON J, BROKER I, ROELVINK J A, et al. Intercomparison of coastal area morphodynamic models[J]. *Coastal Engineering*, 1997, 31(1/2/3/4): 97-123.
- [27] LESSER G R, ROELVINK J A, VAN KESTER J A T M, et al. Development and validation of a three-dimensional morphological model[J]. *Coastal Engineering*, 2004, 51(8/9): 883-915.
- [28] UDA T, SERIZAWA M, MIYAHARA S. Prediction of typical beach changes owing to human activities[M]//Morphodynamic Model for Predicting Beach Changes Based on Bagnold's Concept and its Applications. IntechOpen, 2018.
- [29] TOYOSHIMA O. Design of a detached breakwater system[C]//Proceedings of 14th International Conference on Coastal Engineering. Copenhagen: American Society of Civil Engineers, 1974.
- [30] DEAN R G, DALRYMPLE R A. Coastal processes with engineering applications[M]. Cambridge New York: Cambridge University Press, 2002.