

海域水动力对老虎石海滩养护响应关系分析

匡翠萍¹, 冒小丹¹, 顾杰², 杨燕雄³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306;

3. 河北省地矿局秦皇岛矿产水文工程地质大队, 河北 秦皇岛 066003)

摘要: 老虎石海滩的海滩养护工程包含三段滩肩补砂和两个吹填的水下沙坝式潜堤。采用软件 Mike 21 建立老虎石 2 维潮流和波浪数学模型。根据 2011 年水文波浪实测资料对数学模型进行了验证和计算效率评价, 评价结果表明计算的潮位和潮流过程与实测值吻合较好, 精度较高。重点研究了海滩养护对其近岸区域潮流和波浪的影响, 得到沙坝坝身处是流速、波高变化最大的位置, 受动力作用影响最大。吹填沙坝因波浪增高掀沙、潮流挟沙输运, 可为其后方的海滩提供沙源补充。近岸区域潮流动力较弱, 波浪变化较小, 采用人工补砂和水下沙坝式潜堤双重整治的海滩养护工程对海滩上人工养护泥沙的保存非常有利。

关键词: 海滩养护; 老虎石; 水动力响应; 软件 Mike 21

中图分类号: P753

文献标志码: A

Analysis of Hydrodynamic Response to Beach Nourishment at Tiger-Rock Beach

KUANG Cuiping¹, MAO Xiaodan¹, GU Jie², YANG Yanxiong³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Qinhuangdao Mineral Resource and Hydrogeological Brigade of Hebei Geological Prospecting Bureau, Qinhuangdao 066001, China)

Abstract: Beach nourishment project, involving both beach nourishment and submerged sandbars construction, will be carried out on Tiger-Rock Beach. Based on finite volume method, the software Mike 21 is employed to establish a 2D flow and wave model of study area. Simulation results of the models are minutely verified by a comparison with the measured hydrodynamic data in 2011. Furthermore, the model efficiency is evaluated. Results show that the computation processes of tidal level, current coincide fairly well with field data, and with a high accuracy. This paper

focuses on the influence of beach nourishment project to the surrounding current and wave. The levee of the submerged sandbars, where is the largest variation of velocity and significant wave height occur, is an additional sand source for artificial filled sands backyard with the long-term dynamic loads. For the weak current and little wave change, the beach nourishment combining artificial filled sands and submerged sandbars is advantageous to save filled sands on the beach.

Key words: beach nourishment; Tiger-Rock Beach; hydrodynamic response; the software Mike 21

在全球海岸普遍遭受侵蚀的背景下, 中国亦有 70% 左右的砂质海岸线存在不同程度的蚀退现象^[1-2]。其中, 河北省砂质海岸是渤海海岸侵蚀最严重的区域之一, 且主要集中于秦皇岛北戴河海滩^[3], 表现为滩面变窄、滩砂粗化和滩面下蚀^[4-5]。自 20 世纪 60 年代以来, 秦皇岛入海河流河沙枯竭, 输海泥沙几乎为零, 北戴河海岸侵蚀愈来愈严重^[6]。20 世纪 60~70 年代, 北戴河海岸侵蚀速率约为 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 由于中西海滩以砂质海岸为主, 侵蚀主要集中在这两段海岸; 20 世纪 80 年代后, 海滩因局部岸段修建的砌石护岸而失去向陆发育空间, 渐渐地岸线后退转为滩面下蚀, 礁石出露^[7]。老虎石海滩位于北戴河中、西海滩之间。老虎石浴场沙滩平均侵蚀速率达 $2\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。继东海滩、中海滩和西海滩的海滩养护取得一定成效后^[8-11], 为了抑制海岸侵蚀, 开展老虎石浴场的海滩养护。

目前, 海岸保护的对策主要分为硬体工程和软体工程两类。北戴河海滩养护将两种方法结合, 通过海滩抛沙补充滩面沙源, 藉硬体工程削减波能, 稳定海滩, 促进其淤长。此外, 在人工岬头的靠岸端留有潮汐通道, 以防湾内水质恶化^[12]。

收稿日期: 2013-08-17

基金项目: 中央分成海域使用金项目(2011919, 2013286); 河北省科学技术研究与发展计划(11276709D)

第一作者: 匡翠萍(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为河口海岸工程。E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通讯作者: 冒小丹(1988—), 女, 博士生, 主要研究方向为海岸侵蚀和海洋环境。E-mail: daniel_071103@163.com

海岸线的变迁是近岸水动力、海岸泥沙运动和海岸地貌之间平衡制约的物理过程,其中海岸水动力又是其他两者的基础动力.老虎石海滩养护工程的建设势必会对老虎石近岸海域水动力产生一定的影响,为了详细了解养护方案对工程区域附近潮流和波浪的影响和变化,本次研究以有限体积法为基础,分别采用软件 Mike 21 的 Flow 和 Spectral Wave 模块建立老虎石 2 维潮流和波浪数学模型,详细研究海域水动力对老虎石海滩养护工程的响应关系.

1 海滩养护设计方案介绍

老虎石海滩养护工程采用三段滩肩补砂和两个吹填的水下沙坝式潜堤结合的方法修复老虎石公共浴场与浪涛屿浴场,修复岸线总长度 820 m,修复后滩肩高程达到 2 m 以上,沙滩宽度在原有基础上平均增加 30 m.在老虎石岬头离岸 300 m 海域吹填两个水下沙坝式潜堤,起到消浪和近岸补砂的双重作用.人工沙坝沿岸布设,沙坝总长约 600 m,宽约 50 m,坝顶高程为 -0.9 m ^[13].

2 二维潮流波浪数学模型

2.1 模型简介

Mike 21 模型是丹麦水力学研究所(Danish Hydraulic Institute, DHI)^[14]研发的通用数学模拟系统,主要模拟河流、湖泊、河口、海洋及海岸的水流、波浪、泥沙及环境变化. Mike 21 Flow Model (FM)子模块属 2 维潮流模型,根据布辛涅斯克假定、静水压力假定、浅水假定和初边界条件,通过控制体积法求解由不可压缩雷诺平均纳维-斯托克斯概化的浅水方程. Mike 21 Spectral Wave(FM)子模块为波谱模型,属第 3 代波浪模型,以波作用密度谱,而不是能量密度谱来描述的^[15],因为在水流存在情况下,波作用密度是守恒的,而能量密度并不守恒.波作用密度谱为能量密度谱与相对角频率之比.

2.2 数值解法

数学模型在空间上采用有限体积法进行离散^[14],应用非结构网格提高计算域对于复杂岸线和地形的适应性.在时间上采用显性欧拉法进行离散^[16],显式算法有较高的计算效率,但时间步长需受库朗数的限制.本文在保证计算稳定的情况下,选择快速的 1 阶显式欧拉法.

2.3 计算范围及参数选取

考虑到东海滩、中海滩和西海滩的海滩养护均有潜堤工程,且有个别潜堤距离老虎石较近,对附近的潮流会有一定的影响,故本次研究中,东边界在山海关以北约 20 km 处,西边界在滦河口以南近 14 km 处,南边界距离岸线 55 km.节点数为 14 373,网格单元数为 27 643,其中外海区域网格较为稀疏,网格空间步长可达 6 km;为反映工程对流场的影响,对老虎石海滩的工程区域附近网格进行了加密,网格空间步长约 10 m,模型总共覆盖近 7 512 km² 计算范围.计算范围和工程局部网格如图 1 所示,图中采用北京 54 坐标系.拟建设沙坝区域的地形在 $-4.14\text{ m} \sim -2.44\text{ m}$ 范围变化,且由西向东水深逐渐减小.

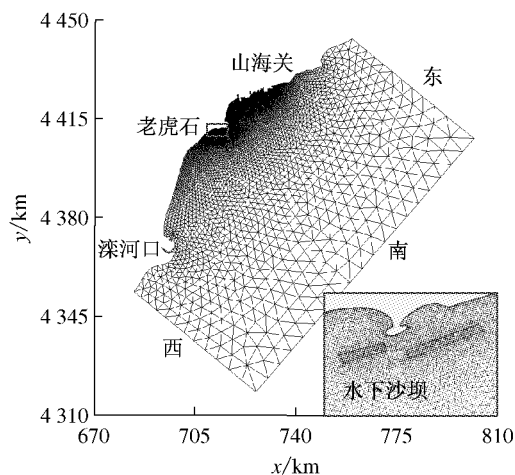


图 1 计算范围及网格

Fig.1 Computational domain and mesh

计算域内的陆地岸线采用固壁边界,外海的东、西边界和南边界为开边界,采用潮位作为边界条件.由于计算开边界远离岸线,没有可利用的实测潮位资料,因此本次研究中首先设计一个包含该区域的渤海潮流模型,以烟台至大连连线为开边界,由潮位过程控制.计算时间为 2011 年 5 月 18 日至 5 月 22 日,时间步长范围为 0.1~60 s.对环渤海 25 个潮位站的潮位进行验证,验证结果均较好^[17],从结果中提取计算区域的开边界潮位.

模型初始时刻潮位取各边界潮位的平均值;初始时刻流速取为 0. 涡黏性系数采用 Samagorinsky 亚网格尺度模型来计算.边界滩地采用动边界处理滩地的干湿交换过程.模型选用曼宁系数,根据计算范围内的粒径资料取平均值 0.013 5.模拟时间为 2011 年 5 月 18 日至 5 月 21 日,时间步长范围取 0.1~1 s.

3 验证计算

采用现场实测水文和波浪资料对模型进行验证. 实测水文资料包括秦皇岛潮位站及10个垂向平均流速、流向的同步资料(2011年5月大潮);波浪资料为老虎石外海750 m处站点2011年6月至10月实测波高. 水文及波浪实测站位如图2所示.

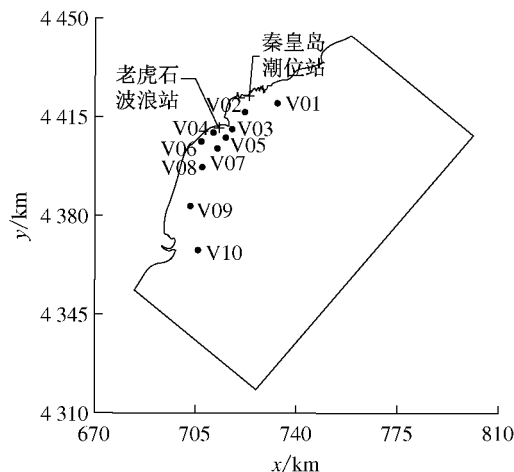


图2 水文波浪测站位置示意图

Fig.2 Position sketch of tide, current stations and wave buoys

3.1 潮流模型验证

根据2011年5月20日11:00至5月21日11:00(大潮)计算区域内站位实测资料,对潮流模型进行了验证计算,秦皇岛站潮位验证和部分流速流向验证分别如图3和图4所示.从验证结果可以看出,计算的潮位、流速和流向过程与实测值吻合良好.

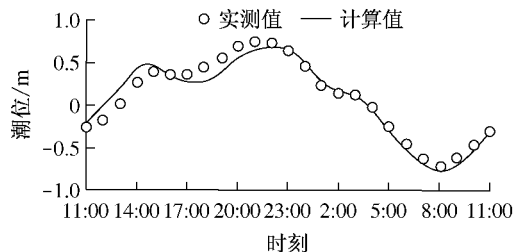
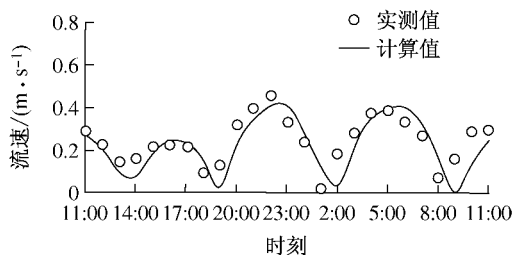


图3 秦皇岛站潮位过程验证

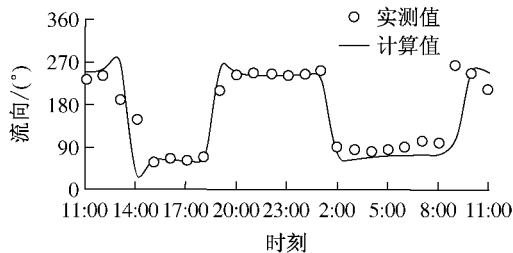
Fig.3 Verification of tidal level process at Qinhuangdao Station

3.2 潮流模型计算效率评价

本文采用百分比偏差率法^[18]对本次研究模型的计算结果进行评价,该方法计算模型的模拟结果 M 与实测值 D 之间的百分比偏差率.其计算方法为



a V01 流速



b V01 流向

图4 典型测点潮流过程验证

Fig.4 Verification of tidal current at selected stations

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N |D - M|}{\sum_{i=1}^N D} \times 100 \quad (1)$$

其中, P 为标准化模型误差系数,当其值 ≤ 10 时为极好; $>10 \sim 20$ 为非常好; $>20 \sim 40$ 为好; >40 时为差.

经计算得秦皇岛站潮位的 $P=19$,评价为非常好.10个潮流观测站的流速计算得到 P 范围为25~35,评价为好;流向 P 范围为18~28,评价为非常好.由此可见,该数学模型计算结果与实测值拟合很好,精度较高.

3.3 波浪模型验证

根据2011年老虎石站的实测波浪统计资料,得出常浪有效波高为0.562 m,方向为 159° ;强浪的有效波高为1.28 m,方向为东北偏东.分别将其有效波高采用斯涅尔定律外推到外海,得到波浪模型的计算边界条件.计算得出常浪向有效波高为0.561 m,强浪向为1.282 m,基本上与验证站的实测波高统计值相符,两个方法评价的波浪模型计算效率均为极好.其中老虎石附近海域常浪向的有效波高分布如图5所示.

4 工程响应预测

为研究老虎石海域水动力环境与养护工程之间的响应关系,数学模型岸线采用滩肩补砂所形成的

新岸线,并修改两个吹填而成的水下沙坝地形以反映初步设计工况,其他计算参数与验证模型相同。

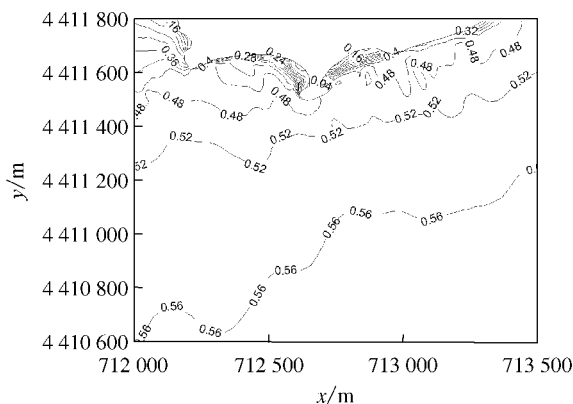


图5 2011年常浪向入射下有效波高分布(单位:m)

Fig.5 Significant wave height distribution under normal incident wave in 2011 before project execution (unit: m)

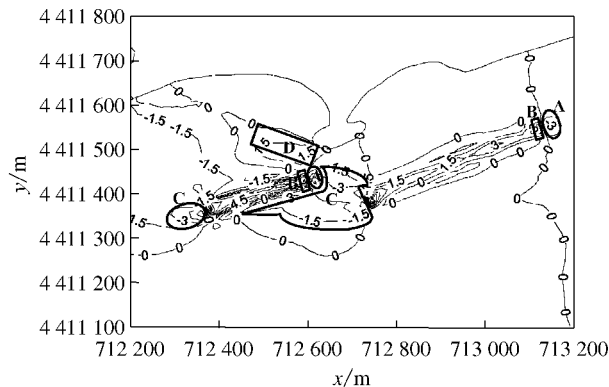
4.1 潮流响应分析

图6为工程前后典型时刻流速变化(工程后减工程前),潮流为半日潮,总体表现为顺岸往复流,涨潮流基本为西南偏西方向,落潮流基本为东北偏东方向.工程方案实施后,无论是整体区域还是老虎石海滩养护工程附近区域,主流态未发生大的改变,主流向仍保持与岸线或等深线基本平行.由于沙坝与水流走向保持与岸线基本平行,且沙坝顶托水流起到一定的导流作用,使得流速的变化主要发生在沙坝上方、两个端头以及两个沙坝之间的水流通道的。

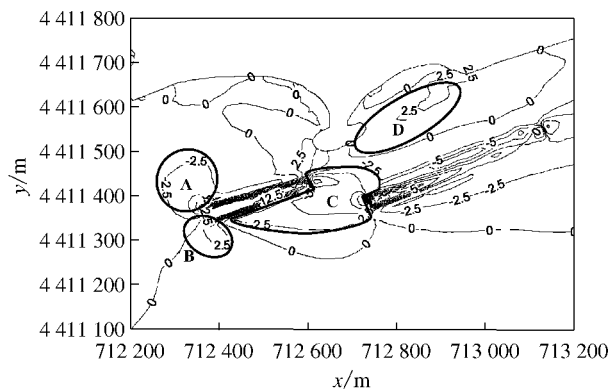
涨急时刻(图6a)潮流为西南偏西方向,东端坝头前方(A区)受沙坝分流作用而使得流速减小,坝头(B区)因处于迎水位置和工程产生的地形突然抬高,流速会迅速增加,沙坝挑流使得东侧堤头的流向在北面一侧顺时针偏转,南面一侧逆时针偏转,范围 $1^{\circ}\sim 8^{\circ}$;反之,沙坝西端及西侧辐射区域(C区)由于地形降低造成流速减小,沙坝西端因地形突变而流速减幅最大;坝顶因顶托水流流速也会有一定幅度的增加,且东侧沙坝坝顶的流速增幅要小于西侧的,东侧沙坝流向基本不变,西侧沙坝流向顺时针偏转 $8^{\circ}\sim 12^{\circ}$,这主要是因为西侧沙坝受到东侧沙坝与老虎石岬头束窄水流的作用;老虎石岬头与西侧沙坝之间(D区)也因水道束窄出现流速小幅增加(约 $1.5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$)。

涨憩时刻涨潮流速最小,沙坝周围的流速有小幅变化,变化幅度一般小于 $2.5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$;东侧沙坝坝顶流速增加较小,为涨潮过程增幅最低值;西侧沙坝坝顶流速增加范围为 $1.8\sim 7.5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,与涨急

时刻流速增加最大值位于坝顶偏西侧不同,此时增幅最大处位于坝顶偏东端,而坝顶西端流速反有小幅减小。



a 涨急



b 落急

图6 典型时刻流速变化(工程后减工程前)分布(单位: $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.6 Distribution contours of velocity magnitude change at representative time (unit: $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)

涨急时刻(图6c)主流向为东北偏东方向,老虎石岬头西侧沙坝附近受西海岸岸线折转挑流,潮流方向发生偏转,造成沙坝西端北侧A区流速减小($4\sim 8\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$),南侧B区流速增加(约 $4\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$),流向顺时针偏转 $8^{\circ}\sim 28^{\circ}$;类似地坝顶因顶托水流流速也会有一定幅度的增加,由于两个沙坝所处位置地形均是东高西低,沙坝西端地形变化更大,流速增加约 $25\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,往东侧流速增幅逐渐减小,流向顺时针偏转角度小于 30° ;沙坝前后堤脚流速均减小 $4.0\sim 7.5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,流向基本无变化;两个沙坝之间的C区,流速减小 $2.5\sim 7.5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$;另外,由于老虎石岬头的挑流和束水作用,岬头与西侧沙坝之间和岬头东侧狭长区域(D区)出现了 $0.3\sim 2.5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流速增长。

落憩时刻无论是沙坝周围还是坝顶,流速均出现不同程度的减小,其中以坝顶变化幅度最大,范围

为 $6 \sim 9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; 其次为两个沙坝之间, 减幅为 $4.5 \sim 7.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

4.2 波浪响应分析

常浪条件下, 工程前后有效波高的分布如图7所示。可见工程实施后有效波高仅在潜堤工程附近发生较小的变化。设计方案建设会使得常浪方向有效波高因爬坡而增加 $0.015 \sim 0.030 \text{ m}$; 越过坝顶后, 有效波高逐渐减小, 减幅为 $0.015 \sim 0.070 \text{ m}$; 由于两个沙坝走向基本与常浪方向垂直, 起到了很好的削减波浪的作用, 沙坝后波影区有效波高削减达 0.12 m 。原位于沙坝后方的 0.40 m 有效波高等值线约向南移动了 150 m 。

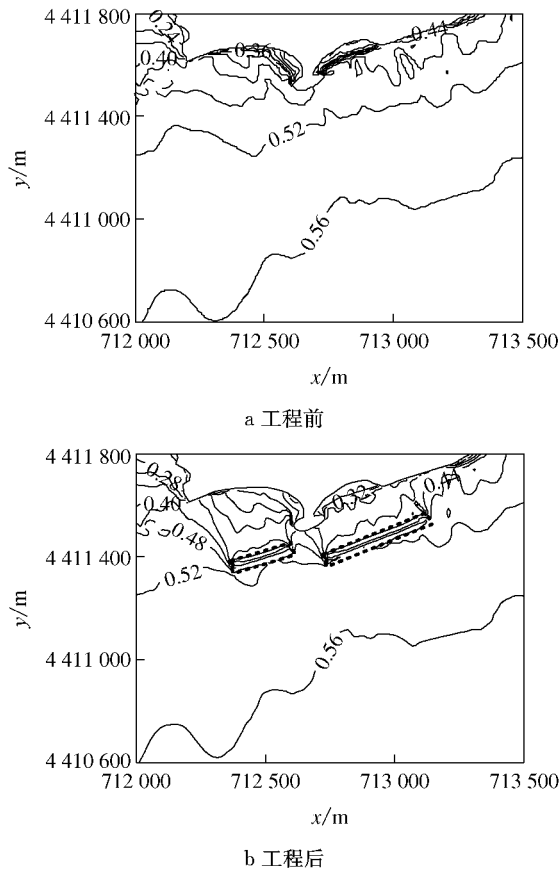


图7 常浪有效波高分布(单位:m)

Fig. 7 Significant wave height distribution under a normal incident wave (unit: m)

强浪条件下, 工程前后有效波高的分布如图8所示。通过工程前后波高分布的对比可以发现, 有效波高变化不大, 主要发生在沙坝西面和西北区域。堤顶有效波高增加 $0.015 \sim 0.100 \text{ m}$, 且潜堤两端因地形突变波高增幅最大; 受沙坝走向影响, 堤身两侧和沙坝西面区域有效波高增加 $0.015 \sim 0.040 \text{ m}$, 而沙坝西北方区域波高减小了约 0.015 m 。

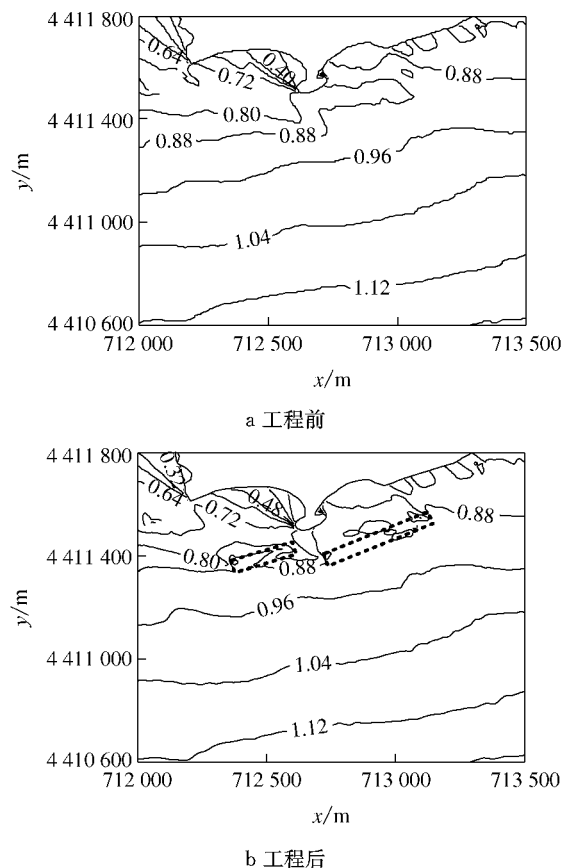


图8 强浪有效波高分布(单位:m)

Fig. 8 Significant wave height distribution under a strong incident wave (unit: m)

5 结论

本文基于软件 Mike 21 建立的 2 维潮流和波浪数学模型, 采用现场实测的潮位、潮流和波浪数据进行验证, 计算预测老虎石海滩养护工程设计方案实施后, 老虎石海域潮流、波浪对工程的响应关系, 得到如下主要结论:

(1) 老虎石养滩沙坝吹填形成后, 对潮流和波浪主要影响区域集中在沙坝周围 200 m 左右的范围, 该范围以外, 潮流波浪受影响较小, 500 m 以外几乎不受影响。

(2) 沙坝坝顶因顶托作用, 流速增幅最大达 $7.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 常浪波高最大可增加 0.03 m ; 坝头因地形变化较大, 流速增幅最大可达 $25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 这两处为受影响最大、时间最长的地方。

(3) 两个沙坝之间的潮流因沙坝的阻滞作用流速减小, 常浪向波高基本不变。

(4) 水下沙坝式潜堤的南北向两个堤脚处流速减小, 而常浪向波浪从南向前堤脚爬坡致波高增大,

吹填而成的两个沙坝因波浪增高掀沙、潮流挟沙输运,可为后方的海滩提供一定的沙源补充。

(5) 近岸海域潮流流速非常低,一般小于 $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,沙坝后方、老虎石岬头两侧区域流速变化较小,一般小于 $2.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,波浪亦有小幅削减。由于老虎石海滩滩沙中值粒径介于 $0.29 \sim 0.35 \text{ mm}$ 之间,而沙源区沙粒径介于 $0.42 \sim 0.61 \text{ mm}$ 之间,平均起动流速为 $32.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,潮流动力和常浪难以起动泥沙,因此采用人工补砂和水下沙坝式潜堤的双重整治的海滩养护工程对人工养护泥沙的保存是非常有利的,但需注意强浪下的侵蚀作用。

参考文献:

- [1] Komar P D. Beach processes and sedimentation[M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.
- [2] Bird E C F. Coastline changes: a global review [M]. Chichester: Wiley-Interscience, 1985.
- [3] 冯金良,崔之久,邸明慧,等. 秦皇岛地区侵蚀性海滩的演化及保护[J]. 海岸工程, 1999, 18(4): 29.
FENG Jinliang, CUI Zhijiu, DI Minghui, et al. The evolution and protection of beach in Qinhuangdao District[J]. Coastal Engineering, 1999, 18(4): 29.
- [4] 孔繁德. 秦皇岛市海岸侵蚀研究及防治对策[J]. 城市发展研究, 2008(1): 73.
KONG Fande. The research on coastal erosion of Qinhuangdao and the suggestions of prevention and restoration[J]. Urban Development Studies, 2008(1): 73.
- [5] 冯金良. 人类工程活动对秦皇岛海滩侵蚀及淤积的影响[J]. 海岸工程, 1997, 16(3): 41.
FENG Jinliang. The effect of man's engineering activities on beach erosion and sediment at Qinhuangdao Coast[J]. Coastal Engineering, 1997, 16(3): 41.
- [6] 庄振业,杨燕雄,刘会欣. 环渤海砂质岸侵蚀和海滩养护[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(2): 1.
ZHUANG Zhenye, YANG Yanxiong, LIU Huixin. Sandy beach erosion and beach nourishment in Circum-Bohai Bay [J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(2): 1.
- [7] 邱若峰,杨燕雄,庄振业,等. 北戴河海滩养护中的原滩环境调查[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(2): 17.
QIU Ruofeng, YANG Yanxiong, ZHUANG Zhenye, et al. Environmental investigation for nourishment of Beidaihe Beach [J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(2): 17.
- [8] 匡翠萍,潘毅,张宇,等. 北戴河中直六、九浴场沙滩工程效果分析与预测[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(4): 509.
KUANG Cuiping, PAN Yi, ZHANG Yu, et al. Performance analysis and prediction of beach nourishment project in Zhongzhi 6th and 9th Bathing Places in Beidaihe[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(4): 509.
- [9] ZHANG Yu, HE Lulu, KUANG Cuiping, et al. Numerical study of shoreline changes by emergency beach nourishment project at the Middle Beach of Beidaihe, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 31(1): 125.
- [10] 姜山. 人工养护后海滩地貌及沉积特征研究——以北戴河中海滩为例[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
JIANG Shan. Beach geomorphology and sedimentary characteristics after nourishment—a case study of the Middle Beach in Beidaihe[D]. Tsingtao: Ocean University of China, 2011.
- [11] 包敏. 人工养护后海滩地貌及沉积特征研究——以北戴河西海滩为例[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
BAO Min. Beach geomorphology and sedimentary characteristics after nourishment—a case study of the western beach in Beidaihe[D]. Tsingtao: Ocean University of China, 2010.
- [12] KUANG Cuiping, PAN Yi, ZHANG Yu, et al. Performance evaluation of a beach nourishment project at west beach in beidaihe, China[J]. Journal of Coastal Research, 2011, 27(4): 769.
- [13] 河北省地矿局秦皇岛矿产水文工程地质大队. 北戴河老虎石浴场及周边岬湾海岸修复工程说明书[R]. 秦皇岛: 河北省地矿局, 2012.
Qinhuangdao Mineral Resource and Hydrogeological Brigade of Hebei Geological Prospecting Bureau. Instruction of beach nourishment project of Laohushi Bathing Place and surrounding bays in Beidaihe [R]. Qinhuangdao: Hebei Geological Prospecting Bureau, 2012.
- [14] DHI. Mike 21 & Mike 3 flow model hydrodynamic and transport module scientific documentation[M]. Horsholm: DHI Water & Environment, 2009.
- [15] Moeini M H, Etemad-Shahidi A. Application of two numerical models for wave hindcasting in Lake Erie[J]. Applied Ocean Research, 2007(29): 137.
- [16] 王卫远,杨娟,何倩倩,等. 苏北沿海大丰海域潮流场数值模拟计算[J]. 人民长江, 2012, 43(19): 79.
WANG Weiyuan, YANG Juan, HE Qianqian, et al. Numerical simulation of tidal current field of Dafeng Sea area in North Jiangsu Province[J]. Yangtze River, 2012, 43(19): 79.
- [17] 同济大学土木工程学院. 北戴河老虎石浴场及周边岬湾海岸修复工程报告[R]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2013.
Tongji University. Report of beach nourishment project of Laohushi Bathing Place and surrounding bays in Beidaihe[R]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2013.
- [18] Allen J I, Somerfield P J, Gilbert F J. Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models[J]. Journal of Marine Systems, 2007, 64(1/4): 3.