

防波拦沙堤在人工沙滩设计中的应用研究

周瀛涛¹, 王为群¹, 张宸豪², 陆 杨³

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125;
2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;
3. 水利部交通运输部 国家能源局南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要:海滨城市核心区的沙质海滩是吸引人们旅游度假的一道靓丽风景线,无论是自然沙质海滩还是人工沙质海滩,演变稳定后均形成岬湾弧形岸线形态。兴建防波拦沙堤可以对沙滩起到良好的护沙固沙作用,其不仅可以作为沙滩的硬质边界线存在,将岸线塑造成适合养滩的岬湾地形;且能遮蔽外海风浪,在人工沙滩近岸区域形成波高流速均稳定的水域。基于海口湾畅通三期工程中的人工沙滩建设项目,综合分析了防波堤的堤线布置,设计出合适的断面形式,通过建立沙滩海域波浪泥沙 XBeach 数值模型,分析了防波拦沙堤建设后对近岸水域的掩护效果,经研究发现东西两侧防波堤拦沙堤的设置能进一步减小堤前波高与流速,形成适合铺填人工沙滩的稳定水域;结合二维水沙运动特征及一维岸线模型预测防波拦沙堤设计对人工沙滩的演变影响,揭示出在本设计方案下防波拦沙堤对海滩的掩护效果较好,海滩在常浪作用下将处于动态平衡的特征。

关键词:人工沙滩;防波拦沙堤;数值模拟;海滩演变

中图分类号:P717

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2021)02-0107-14

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2021.02.003

引用格式:ZHOU Y T, WANG W Q, ZHANG C H, et al. Application of anti-wave sediment barrier in the design of artificial beach[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(2): 107-120. 周瀛涛, 王为群, 张宸豪, 等. 防波拦沙堤在人工沙滩设计中的应用研究[J]. 海岸工程, 2021, 40(2): 107-120.

伴随着目前发展迅速的滨海旅游业,在国内外诸多沿岸城市都有通过人工方法建成沙质海滩的成功案例^[1-2]。而随着时间的推移,不少人工沙滩的滩面优质沙逐步流失,裸露出泥质基底。如今,越来越多的研究集中于海滩养护工程^[3],海滩岸线的稳定是人工沙滩设计中的关键重点。由于岬角弧形岸线能够遮蔽湾内水域,具有改善湾内波流状况的独特地形优势^[4-6],故人工沙滩的开发多借助于现有弧形堤岸或将滩面塑造成弧形岬湾岸线。特殊地形下的河口及海岸水沙运动是一项十分复杂的研究课题^[7-9],水下沙坝运动和近岸坡度的变化也是人工沙滩演变过程中需要关注的重点^[10-12],水动力要素、泥沙运动和地貌演变三者间相互作用,彼此影响。

修建防波拦沙堤作为海滩养护最重要的方式之一,已被广泛运用到工程实践当中。匡翠萍等^[13]研究了防波堤布置对于福建海坛湾龙凤头海滩的养护效果;曹成林等^[14]在进行日照石臼港人工沙滩设计时,通过比选不同堤头长度最终确定最优防波堤拦沙设计方案。因此,防波拦沙堤的设计不仅关系到沙滩的演变趋势,更能减少海滩建成后的滩面沙流失,极大降低二次补沙养滩的成本。但目前大多数的防波拦沙堤的修建是沙滩已发生侵蚀后所采用的二次工程措施,缺乏与沙滩本身的统一规划和设计,同时防波拦沙堤的建设需十分慎重,实体堤的修筑将改变小区域范围内的水动力场,对沙滩的演变影响也应经过充分论证^[15]。海口湾人工沙滩建设是打造海口城市风貌的重要工程,本文基于海口湾工程区域的测量地形与波浪数据,对该区域人工沙滩的防波拦沙堤设计方案进行分析。研究了长期常浪作用下防波拦沙堤对人工沙滩的掩护效果,

收稿日期:2020-09-03

资助项目:国家重点研发计划资助项目——湖库水沙资源、配置和功能恢复综合措施与策略(2017YFC0405206)

作者简介:周瀛涛(1994—),男,助理工程师,硕士,主要从事河口海岸动力学方面研究. E-mail: zhouyingtao@sucdri.com

(李 燕 编辑)

分析了波浪要素、剖面形态、岸线变化及泥沙输运等与海岸演变直接相关的物理量变化情况,通过数值模拟和经验方法揭示了本人工沙滩在长期主导波向的常浪作用下稳定的岸线形态,为海滩建成后的管理养护提供借鉴。

1 研究区域

海口湾人工沙滩是致力于打造海口市核心滨海区兼具功能性与观赏性黄金海岸的重要工程项目。本项目规划将在海口湾万绿园西侧海岸形成较完整海滩形态,并有一定的干滩区域供市民、游客休闲、亲水,策划沙滩音乐节和烟火表演等时尚休闲活动,丰富市民生活,彰显城市活力。海口湾人工沙滩的建设内容包括:东西两侧新建防波拦沙堤作为海滩边界,同时阻挡外海传播至近岸的涌浪,掩护湾内形成有利于养滩的稳定水域,并在现状堤岸外抛沙形成人工海滩。

海口湾是一个向北敞开的半圆形海湾,东起白沙角,西至后海,与广东省雷州半岛隔海相望,海岸线全长20.5 km,湾内水深为2~6 m,整体水深较浅。海口湾畅通三期工程范围西起丽晶路,东至世纪公园龙珠桥,全长7.5 km,其中人工沙滩构筑段长916 m(图1d),现状堤岸为东西两端岬角与中间的凹入段组成的岬湾弧形岸线,海口湾生态整治与修复项目已于本工程前实施,将工程范围内浅滩均清除并疏浚至2.8 m水深,西侧岬头前水深约2.8 m,东侧岬头前水深约4 m,近岸存在条状沟槽,宽约100 m,水深约5~6 m。



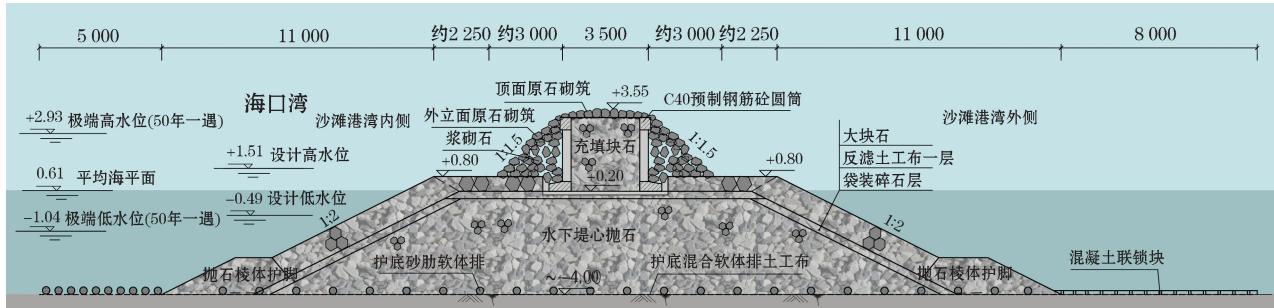
图1 人工沙滩工程概况
Fig.1 General situation of artificial beach

人工沙滩工程区域离岸1 km处建有人工岛,占海面积0.35 km²,应中央环保督察组及海口市政府要求,该岛屿将予以全面拆除至-2.0 m标高,拆除后缺乏掩护的人工沙滩区域将直面外海风浪作用。

在充分考虑工程规划、现状地形与近岸水动力条件的基础上,对防波堤堤线布置进行优化设计。由于工程海域近岸水深较浅,且属于海口湾的内湾,波流等动力要素均较小,考虑到沙滩的景观视野、工程地质条件等,依靠现有岸线凸角布置的堤线如图4b所示。该堤线设计主要考虑遮挡N向入射波浪,且作为人工沙滩的硬质边界,在现状弧形岸线的基础上塑造人工岬湾海滩,进一步减少人工沙滩区域表层优质沙源的流失。

在防波拦沙堤的断面设计中,在本工程设计采用平潮时出露水面宽度较小、不上游人、景观性观感佳的混合式抛石防波堤。考虑到亲水及规范要求,本工程防波堤顶高程取为3.55 m,堤心采用大块石抛填,抛石顶0.2 m标高处防止预制钢筋混凝土圆筒,内部填充块石,圆筒外侧填充浆砌石,并在顶面采用原石砌筑,以营造自然观感。防波堤设计断面如图2所示。

在东西两侧防波拦沙堤内抛填设计人工沙滩岸线长度916 m,干滩宽度约30 m,湿滩宽度约60 m,预期形成沙滩总面积27 588 m²。



注:图中数值单位为m

图2 防波拦沙堤设计断面

Fig.2 The designed section of the anti-wave sediment barrier

湾东西两侧短期波浪站(白沙门和后海)资料统计结果表明:该湾全年波浪以风浪为主。该区域月均波高为0.2~0.7 m,在重现期50 a设计高水位下,护岸最大H_{1%}波高近1.4 m,有效波高H_{13%}最大为1.0 m左右,由于附近白门沙和后海测站的常浪向以NE,ENE,N向为主,因此本文采用对地貌塑造作用较大的有效波高为1.4 m的不规则波进行研究;波浪周期分别取该海域平均周期3.0 s与较大波高对应的6.0 s;来波波向分别选取对工程区域影响最大的N向与NW向。

设计潮位采用海口市长堤路的海口(三)水位站(109°29'E, 20°03'N)的资料统计分析确定,工程区域潮位特征属于不规则日潮混合潮,月均日潮天数为15~18 d,其他时间为正规半日潮,且潮汐不等现象显著。统计该站年最高(低)潮位资料(2006—2016年),以P-III型曲线(图3)进行分析后,得到设计潮位成果见表1。根据《海港水文规范》^[16]规定,当设计上采用这类曲线时,常取用高潮累积频率为10%所对应的潮位为设计高水位,低潮累积频率为90%所对应的潮位作为设计低水位。

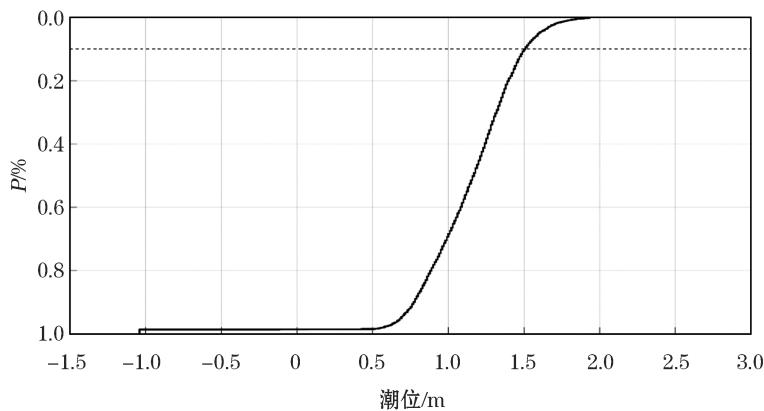


图3 工程区域潮位累积频率曲线

Fig.3 Cumulative frequency curve of the tide level in the study area

表 1 海口(三)站设计潮位成果表

Table 1 Tidal level designed for the Haikou(3) station

类 别	均 值	累积频率 P					
		$P=1\%$	$P=2\%$	$P=3.3\%$	$P=5\%$	$P=10\%$	$P=20\%$
年最高潮位/m	2.13	3.08	2.93	2.81	2.72	2.55	2.38
年最低潮位/m	-0.84	-1.07	-1.04	-1.01	-0.99	-0.94	-0.90

表 2 常浪情况工况组合表

Table 2 Combination of working conditions during the normal wave

设计工况	设计波高(H_s)/m	设计周期(T_p)/s	来波波向	模型地形	备 注
工况 1	1.4	3.0	N	现状堤岸	
工况 2	1.4	6.0	N		
工况 3	1.4	3.0	NW		
工况 4	1.4	6.0	NW		
工况 5	1.4	3.0	N	仅东防波堤+人工沙滩	
工况 6	1.4	6.0	N		波浪数学模型
工况 7	1.4	3.0	NW		
工况 8	1.4	6.0	NW		
工况 9	1.4	3.0	N	仅西防波堤+人工沙滩	
工况 10	1.4	6.0	N		
工况 11	1.4	3.0	NW		
工况 12	1.4	6.0	NW		
工况 13	1.4	3.0	N	东西两侧防波堤+人工沙滩	
工况 14	1.4	6.0	N		波浪泥沙数学模型
工况 15	1.4	3.0	NW		
工况 16	1.4	6.0	NW		

注:空白处表示无数据

2 研究内容与方法

本文基于近岸实测地形资料,采用数值模拟手段对工程区域水动力特征开展研究;分别讨论两侧防波拦沙堤对沙滩区域的掩护效果,依据设计方案对建设后的人工沙滩进行典型常浪情况下的泥沙运动分析。

本研究采用 XBeach 数学模型^[16],该模型是基于结构化 Fortran 77/90 架构的海岸动力学数值模型。模型的水动力学核心是沿水深平均的非线性浅水波方程,其采用迎风差分和高阶 Lax-Wendrof 差分方法离散化偏微分方程求解,对于风浪等短波,采用波能平衡方程求解波浪场,并对求得的波高应用线性波理论换算求得波生水质点速度,并叠加在浅水波方程获取的水质点速度上。泥沙输运方面,采用二维沿水深平均的对流扩散方程解得泥沙浓度场,并据此计算岸线和海床演变^[17]。目前,XBeach 数学模型已广泛应用于模拟潮流、海啸波、风暴潮以及相应的海岸线演变、海床演变和泥沙输运等海岸动力学过程^[18-21]。

模型计算范围包含人工沙滩工程区域在内的近岸海域,网格外边界离岸约 1 km,采用笛卡尔坐标系,设计离岸方向为 m 向,沿岸方向为 n 向,网格以左下角为原点逆时针旋转 290°。模型采用高分辨率矩形网格,

分辨率为 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$,共26 000单元。在计算域中,采用分辨率为1/1 000的实测地形数据,该高程的零点对应于1985国家高程基准。模型地形及网格如图4所示。

模拟计算时采用Surfbeat模式^[17]。输沙公式采用Van thiel-van Rijn方程^[22]计算。模型参数设置见表3,计算步长1 h,每100 s更新一次地形,海上边界允许斜入射和反射波穿过边界,外侧边界诺伊曼边界条件。离岸和陆地边界均采用的是二维弱反射边界,横向边界采用诺伊曼边界(恒定水位梯度)。模型地貌演变参数取mor=10,模拟时长1个月,代表10个月的常浪作用,足以反映常浪期海滩演变情况。

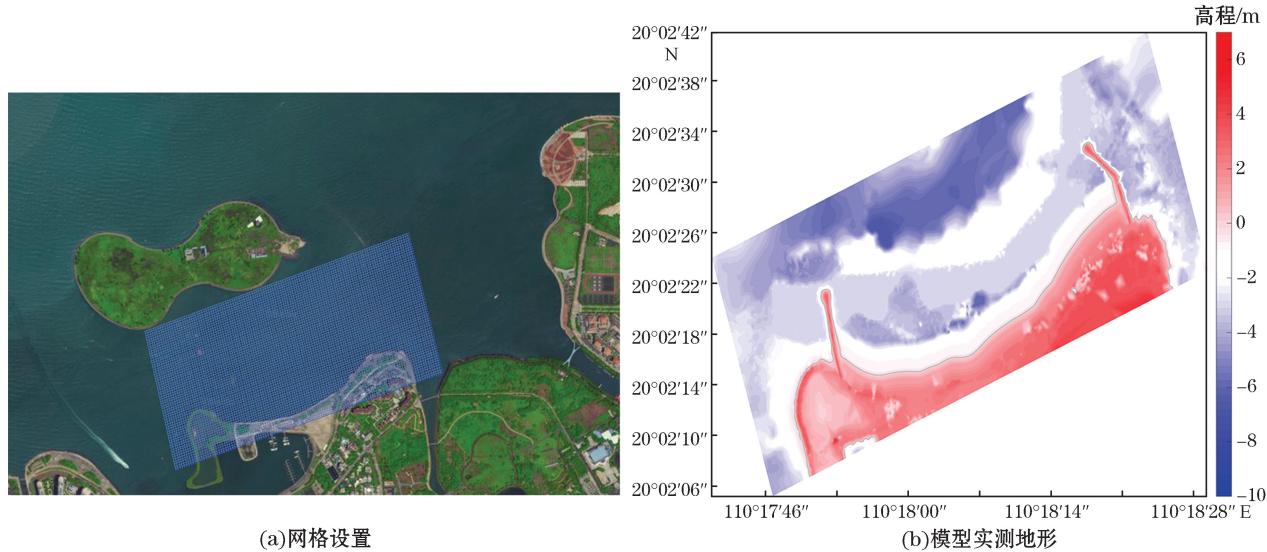


图4 模型网格及工程初始地形

Fig.4 Model grid and initial topography in the study area

表3 主要参数设置

Table 3 Settings of the main parameters

参 数	描 述	取 值	参考值范围
CFL	最大科朗数	0.7	0.1~0.9
morfac	形态加速因子	10	0~1 000
bedfriccoef	曼宁系数/($\text{s} \cdot \text{m}^{-1/3}$)	0.02	0.035~0.900
wetslp	水下临界崩塌坡度	0.3	0.1~1.0
dryslp	水上临界崩塌坡度	1.00	0.1~2.0
D_{50}	中值粒径/mm	0.4	—
por	孔隙率	0.4	0.3~0.5
reposeangle	内摩擦角/(°)	30	0~45

注:“—”表示无数据

3 结果分析

3.1 现状水动力特征

通过对现状堤岸下工程区域的波浪场数值模拟(工况1~工况4),可见常浪作用下(图5),堤前有效波高(下文中均简称为波高)和波生流流速均较小,入射波浪边界为离岸1 km处,在N向波浪作用下,近岸堤

前波高 0.4 m, 且在西侧岬角东部形成波高小于 0.1 m 的波影区; NW 向波浪垂直于堤岸方向, 近岸堤前波高 0.6 m 且呈沿岸均匀分布特征, 无明显波影区存在, 由于西侧岬角更为向海凸出, 在其与堤岸凹角处形成小面积波影区。

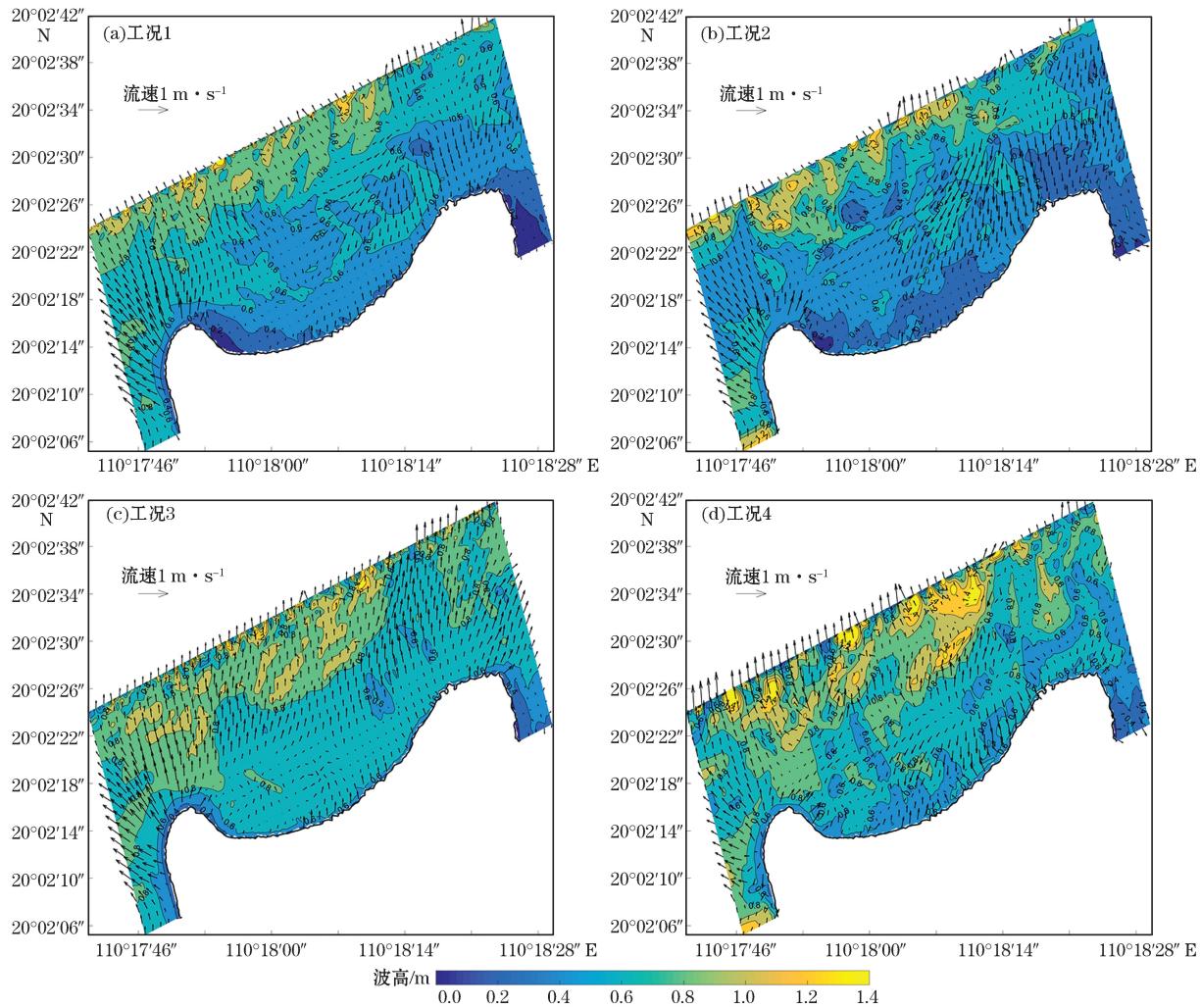


图 5 工程区域工况 1~工况 4 情况下现状波高与流速分布

Fig.5 Distributions of wave height and flow velocity in the study area before the project (condition 1~condition 4)

由近岸波生流流速分布情况, 可见在西侧岬角西部和工程清淤区流速较大, 约为 1.0 m/s, 而传至近岸处流速均小于 0.5 m/s。就不同入射方向来看, NW 向入射条件下, 堤岸前的波高均大于 N 向入射。由于近岸水深较浅, 一定程度上减少了堤前波高, 部分波浪通过东西两侧岬角附近水深较深处绕射至堤前, 在靠近两侧岬角附近波高较大, 远离岬角的中部堤岸前波高较小。通过对比发现, 同向入射的波浪, 波高相同时, 入射周期与近岸波高成反比, 与波生流流速成正比; 入射周期对近岸波高分布的影响, 在大波高时尤为显著。在相同入射波高情况下, 相较于较更大周期(6.0 s)的浪, 小周期的浪(3.0 s)对近岸波高的增加贡献更大。

由于在常浪作用下, 西侧岬角对堤前水域有掩护作用, 但效果不明显, 波高沿岸分布较为均匀, 流速未有明显衰减, 因此需要通过相关措施减小近岸波高与流速。由于西侧在岬角处辐聚后的波浪沿着岬角内侧自西向东沿岸涌至堤前, 因此在西侧设置长为 205.5 m 的防波堤, 使得设计堤长能够切断波能辐聚区内的来浪; 由于东侧近岸有水深大于 4 m 条带状沟槽存在, 且东侧岬角前水深较深, 岬角平缓, 波高辐聚效果不明显, 因此东侧波浪沿着西侧岬角自东向西涌至堤前时波高未能明显降低, 在东侧设置长为 175.5 m 的防波

堤,以减小波浪绕射过程中的波高。东、西两侧防波堤的设置如图 4b 所示。

3.2 兴建防波堤拦沙堤后水动力特征

由于西侧防波拦沙堤(以下简称西堤)的设置扩大了其东部的波影区(图 6),减小了原本堤岸靠近西侧岬角情况下的近岸波高,在 N 向入射波条件下,西堤遮蔽段能覆盖工程堤岸中西部区域,使近岸波高小于 0.2 m;NW 向入射波条件下,波影区虽不及 N 向范围大,但较现状仍将 0.6 m 波高等深线向海滩中东部推移,海滩中西部波高较现状降低 20%,但西堤的设置并未有效减小中部堤前波高,这是由于大部分的波浪从西侧岬角附近涌向堤前,且西侧岬角更为尖锐,而东侧较为平缓,尖锐的岬角凸向海中导致波能辐聚更为明显。现状地形下由于堤岸西侧岬角较为突出,其能辐聚较大能量的波浪,使得岬角附近流速大于 1.0 m/s,西堤的修建可以较好地将工程沙滩区域与外部进行阻隔,形成利于养滩的稳定水域,但西堤西侧仍属于流速较大区,可能产生对防波拦沙堤本身的冲刷,需考虑进一步加强堤脚及堤身防护措施。

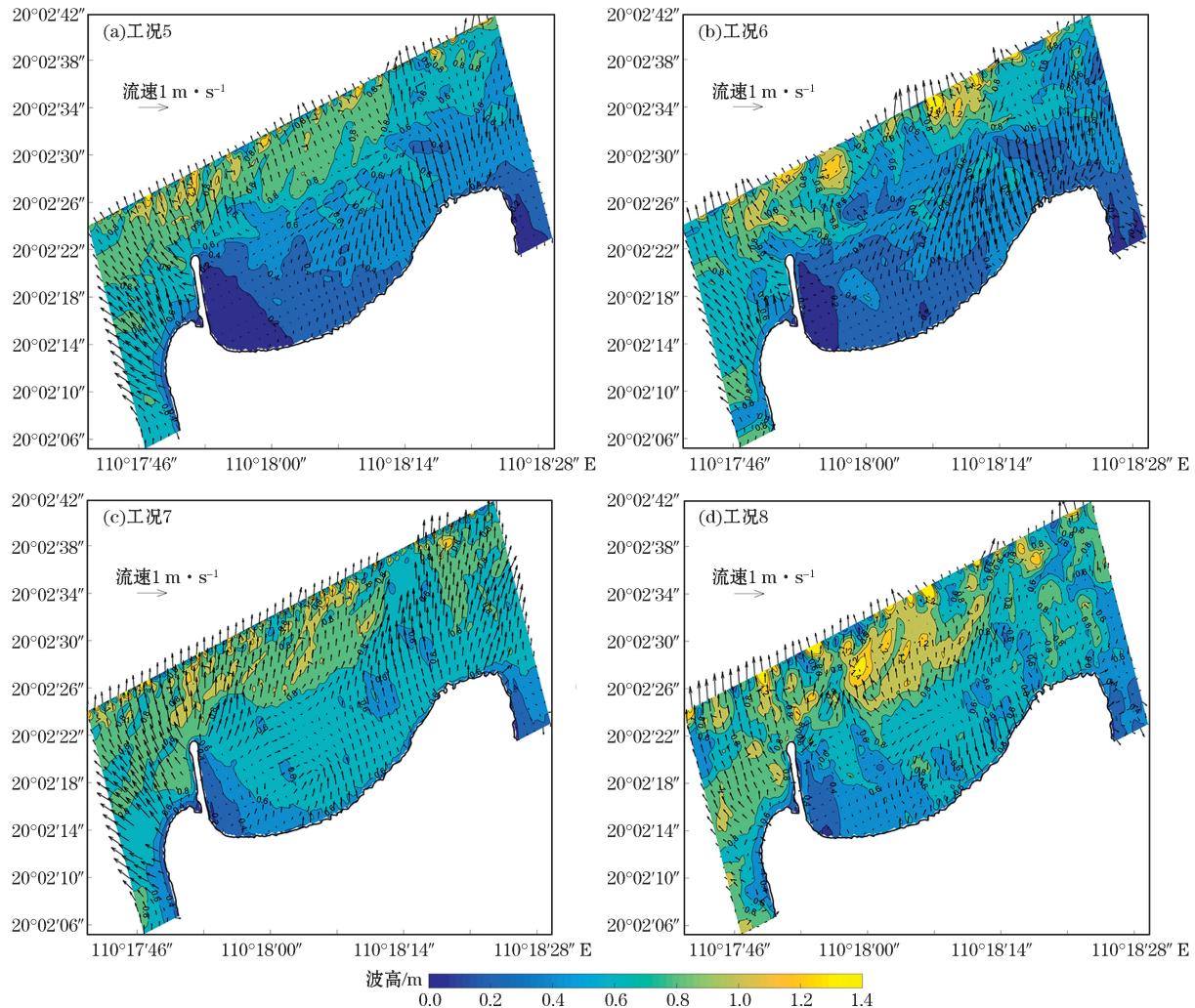


图 6 西侧建防波堤后工况 5~工况 8 情况下波高与流速分布

Fig.6 Distributions of wave height and flow velocity after the construction of breakwater at the western side
(condition 5~condition 8)

东侧防波拦沙堤(以下简称东堤)的设置在其附近形成小范围波影区(图 7),波影区范围内波高小于 0.4 m。由于东堤的折线形设计,使其在 NW 向入射波浪条件下对堤前东部的掩护效果较 N 向入射更好。

现状地形下,堤岸东部由于水深较深,流向稳定且流速可达 1.0 m/s ,而东堤修建后由于辐聚效应将“吸引”一部分波浪在防波拦沙堤前破碎,从而减少工程区域堤前波流要素。在东堤波影区内流速可降低至现状的 $20\% \sim 50\%$,均小于 0.2 m/s 。

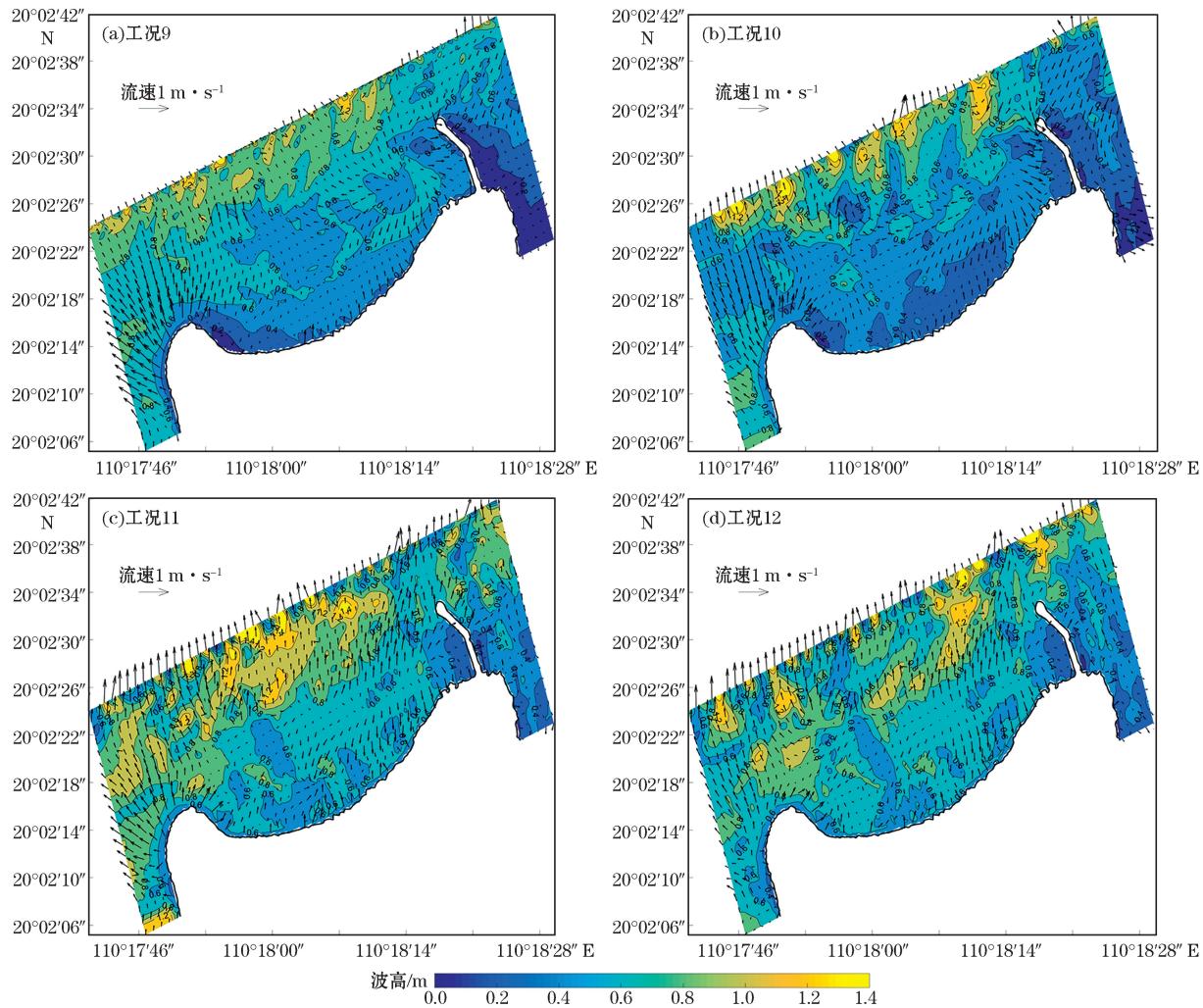


图 7 东侧建防波堤后工况 9~工况 12 情况下波高与流速分布

Fig.7 Distributions of wave height and flow velocity after the construction of breakwater at the eastern side
(condition 9~condition 12)

由于西堤的修建对减小近岸波高与流速效果更为明显,因此在实施本工程过程中,应先修建西侧防波堤,再修建东侧防波堤。

通过图 8 可以看出,两侧防波堤均修建完工后,近岸波高在各工况作用下均明显减小。但在 NW 向常浪作用下,近岸中东部波高仍较大,因此该部分岸线在海滩建成后应是地貌演变明显区域,需着重监测关注。

3.3 人工沙滩水沙运动分析

在沙滩与防波拦沙堤完工的情况下,分别就工况 13~工况 16(即 N 向与 NW 向不同周期的 4 组工况)进行了二维水沙数值模拟。在波向同为 N 向的情况下,波浪在向沙滩前传播过程中,随着水深变浅波高已逐渐衰减,使得沙滩前波高仅为入射波高的 $1/4$ 左右。由于两侧防波堤的设置进一步减小了沙滩前的波高,波生流流速在 NW 向入射时均大于 N 向,长周期波浪(6.0 s)的入射条件下,离岸流流速约为 $0.5 \sim 0.7 \text{ m/s}$,

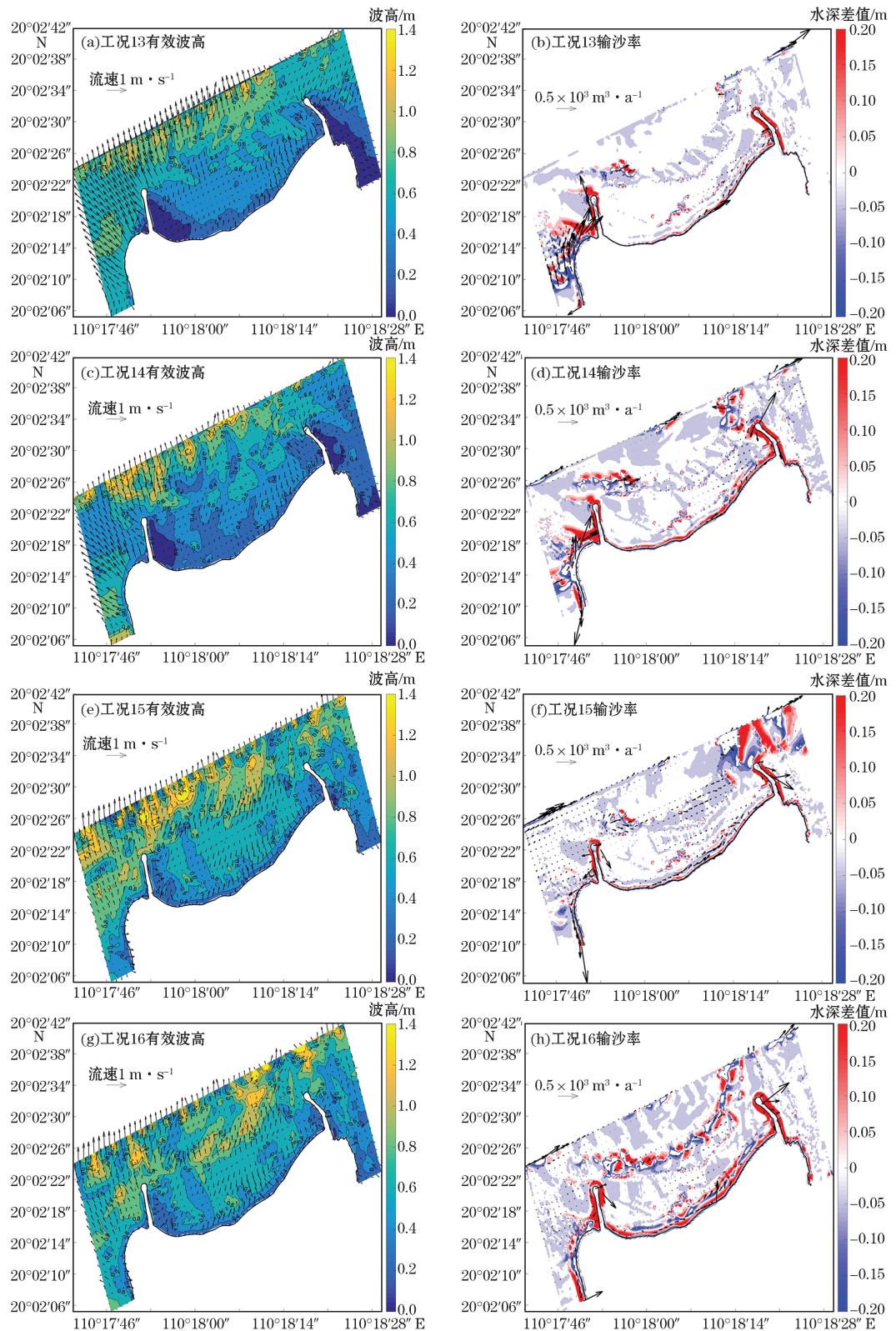


图 8 工况 13~工况 16 情况下波高、流速、输沙率和地形变化差值

Fig.8 Differences in wave height, flow velocity, sediment transport rate and topographic change under different conditions
(condition 13~condition 16)

将推动滩面近岸的泥沙离岸输运。同时,海滩东部岸线前波高大于海滩其余位置,约为 $0.4\sim0.6$ m,这可能是由于东侧岬头前水深较深,波浪经防波堤头绕射后仍能传向近岸。在海滩西侧近岸流流速较大,以近岸浅滩为界,浅滩上部流速向西北,浅滩下部流速向西南,有明显的南北分流趋势。这种现象在大波高大周期更为明显。泥沙运动的强弱及方向与波生流方向基本吻合,表现为N向波作用时,海滩中西部较为稳定,中东部泥沙在周期较大时存在沿岸自西向东输运趋势,同时,西侧防波堤外侧根部存在较强的冲刷趋势。

就泥沙输运而言(图8b,8f),除了在岬头处的离岸输沙,泥沙绕过西侧防波堤沿岸输运,而东侧防波堤则观察到有泥沙输出工程区域的情况,整体来看泥沙的输运方向是自西向东。岬角内侧的在NW向入射流速较大的海滩西侧,存在明显的沿西向东输沙趋势。从演变前后地形差值可见,在NW向波浪入射下,海滩呈现明显的沙坝剖面,且在滩面侵蚀离岸落淤后,沙坝海侧继续侵蚀的现象;不管在何种组次下,东西两侧防波拦沙堤周围均存在较大侵蚀,是因为防波堤沿岸发生了波能辐聚,其中东侧防波堤与西侧防波堤西部,将有较大的侵蚀趋势,应在设计时加强堤脚抛石,以达到稳定堤身的目的。图9分别选取了规划海滩的西部、中部、东部三个剖面,在10个月的常浪作用下,可见3个剖面均有冲浪带泥沙被削去,向海侧落淤形成小沙坝。就一维剖面来看,入射波周期越大,对海滩中部剖面的侵蚀下切深度越大,大周期的波浪可将泥沙带到更远的离岸处落淤,形成

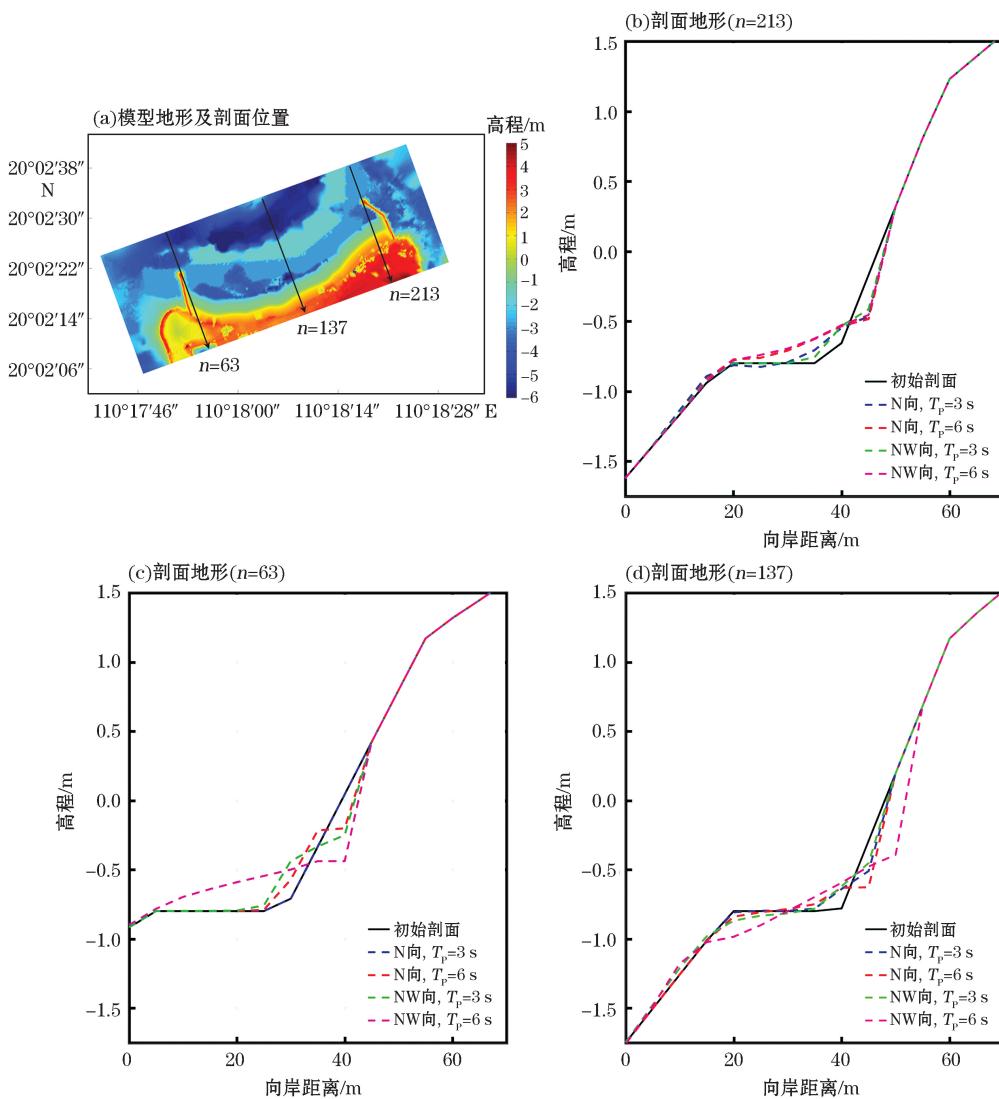


图9 常浪作用前后剖面变化

Fig.9 Changes of beach profiles before and after the action of normal wave

较小周期、更为平缓的滩肩带。泥沙的冲淤存在沿岸不均的现象,东部剖面沙坝增加的泥沙量大于滩肩减少的泥沙量,可见东部剖面离岸小沙坝的形成是与剖面冲浪带泥沙的离岸落淤和海滩自西向东的沿岸输沙有关。

4 讨 论

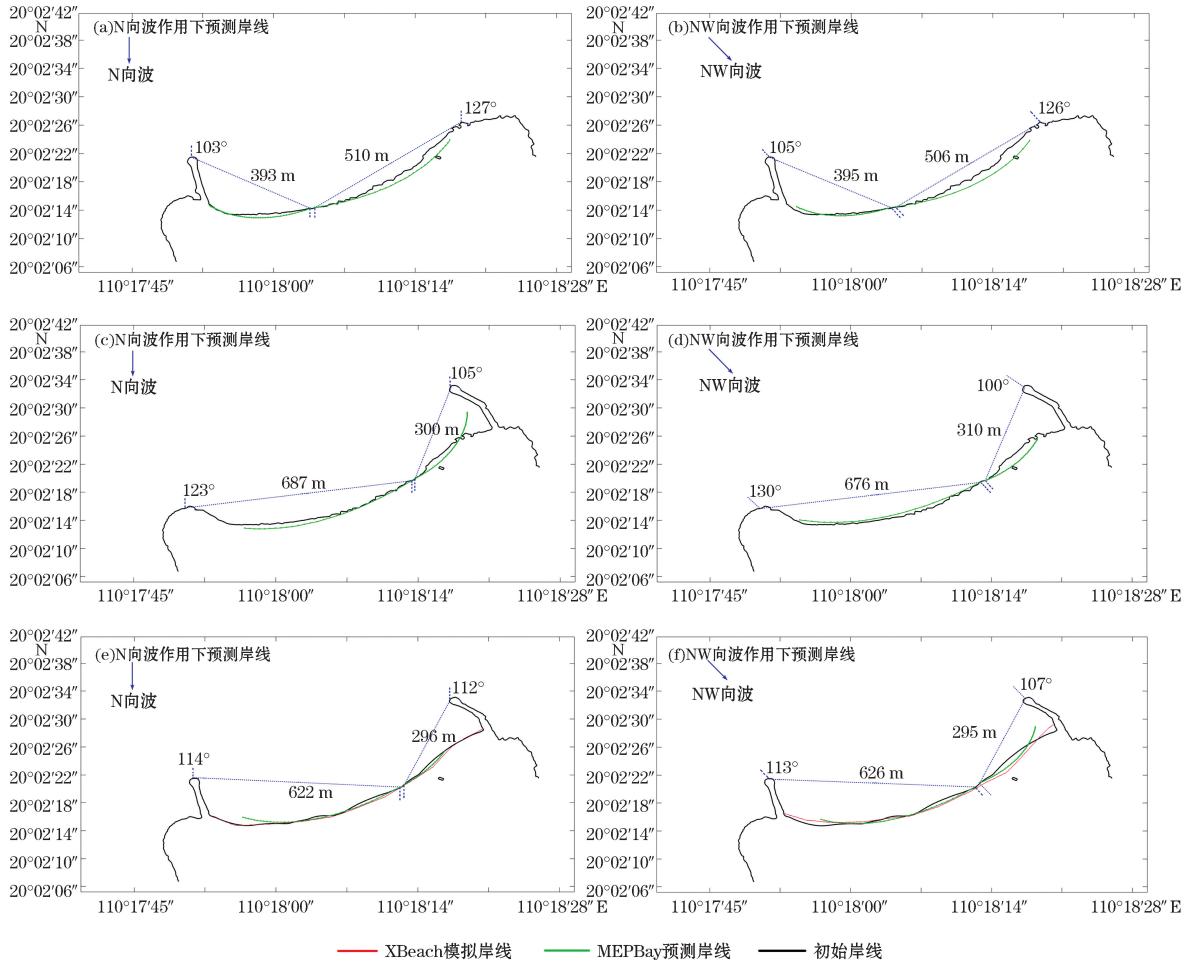
岬湾弧形岸线是一种较为稳定的岸线存在形式,其两侧的岬角对中间岸线的控制起到至关重要的作用,为了验证本设计方案在长期常浪作用下人工沙滩的岸线能保持稳定,本文应用基于抛物线型静态平衡岬湾经验公式^[23]开发的 MEPBay 软件^[24-25],对岸线平面线形的演变规律进行预测。该软件采用结合室内物理模型试验与实测岸线演变资料的经验公式对岸线变化进行拟合(式 1),考虑了岬角或波浪绕射点之间的控制线长度 R ;波浪入射波峰线于岬角处与控制线间角度 β ;岬角控制点的波峰线到湾岸任意点的极坐标角度 θ ;岬角控制点到湾岸上任意点的极坐标距离 R 。并由波浪入射角度确定系数 C (式 2~式 4)。

$$R_n/R_0 = C_0 + C_1(\beta/\theta) + C_2(\beta/\theta)^2, \quad (1)$$

$$C_0 = 0.0707 - 0.0047\beta + 0.000349\beta^2 - 0.00000875\beta^3 + 0.00000004765\beta^4, \quad (2)$$

$$C_1 = 0.9536 - 0.0078\beta + 0.00004879\beta^2 - 0.0000182\beta^3 + 0.000001281\beta^4, \quad (3)$$

$$C_2 = 0.0214 - 0.0078\beta + 0.0003004\beta^2 - 0.00001183\beta^3 + 0.00000009343\beta^4. \quad (4)$$



注:图 e,f 给出了东西两侧防波堤均修建后的 XBeach 模拟结果与 MEPBay 预测岸线,结果吻合较好

图 10 常浪作用下不同试验工况岸线演变预测

Fig.10 Shoreline evolution predictions at different testing conditions under the action of normal Wave

根据海滩稳定性特征,岬湾海滩可以分为静态平衡海滩、动态平衡海滩和不稳定海滩。达到静态平衡的海滩波浪到达岸线时波峰线近似平行于岸线,此时波浪破碎,波能没有沿岸分量,沿岸输沙几乎为零。此类海岸没有长时间的堆积和侵蚀,即使在风暴潮的作用下发生侵蚀,风暴过后涌浪又把风浪造成的沙坝重新推回海滩而恢复原来的面貌。所以静态平衡海滩被当做一种稳定的岸线形式^[26]。

若预测岸线在现有岸线向海侧,表明岸线动态平衡;相反在陆侧,则表明岸线不稳定;重合则表明岸线静态平衡。

当以 N 与 NE 向波作用时,分别以东西两侧防波拦沙堤为控制点,图 10 中绿色弧线为 MEPBay 软件预测的岸线。可以看出:在只修建西堤的情况下,海滩中西部预测岸线与规划岸线基本重合,说明该段岸线未来基本趋于静态平衡;而海滩中东部预测岸线倾向于规划岸线陆侧,说明未来该段岸线将处于不稳定的后退趋势;在只修建东堤的情况下,海滩中东部岸线不稳定状态将有所减弱;当两侧防波拦沙堤都修建后,对沙滩海域将形成有效遮蔽,岸线演变整体趋于动态平衡,这与常浪作用下数值模拟的结果相吻合。因此,整体来看,在该海域常浪(N 向、NW 向)作用下,海滩岸线将呈平衡稳定的状态,部分岸线向外海移动,不会出现大面积侵蚀后退。

5 结 论

本文基于海口湾畅通工程人工沙滩规划,在研究了现状堤前水动力条件下,提出了切实可行的人工沙滩设计方案,并且为了减少二次补沙的成本,设计了两道防波拦沙堤以进一步护沙固沙并改善工程区域水动力条件;通过对两侧防波拦沙的掩护效果进行评估,以及对海滩建成后进行典型工况下的二维水沙数值模拟,分析了近岸的波高、流速分布及泥沙运动情况,在此基础上进一步预测了岸线演变的趋势。对人工沙滩常浪作用下演变规律开展了初步研究,主要结论概括如下:

1)滨海区域人工沙滩防波拦沙堤的设计,需结合现状地形、堤岸形态、设计水位等综合考虑,其堤线布置既要能分隔波高、流速较大的区域,也不能影响亲水感官效果。

2)本工程经综合考虑后的防波拦沙堤设计方案,能在现状堤岸内的工程区域形成有效波影区,明显减小堤前波高与近岸波生流流速,形成有利于海滩养护的稳定水域。

3)西侧防波拦沙堤的波影区能遮蔽到海滩中西部,东侧防波拦沙堤能掩护堤根部西侧水域,海滩中部在 N 向及 NW 向波浪作用下的侵蚀风险较大,需加强关注。

4)常浪作用下,规划沙滩岸线整体呈现动态平衡发展趋势,海滩剖面在平均水位附近将产生小沙坝特征的剖面形态,且在波浪作用下,滩面泥沙离岸落淤后有自西向东沿岸输运的趋势。

参考文献(References):

- [1] CHEN W C, ZHAUNG Z Y, CAO L H, et al. Influence mechanism of artificial headland on Moon Bay bushing beach in Longkou City [J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(3): 80-86. 陈文超, 庄振业, 曹立华, 等. 人工岬角对龙口市月亮湾浴场的影响机制[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(3): 80-86.
- [2] ZHANG J F, SUN J W, SUN Z C. Application of artificial headland beach raising method in the plane design of Moon Bay bath beach [J]. China Water Transport Monthly, 2016(6): 305-307. 张简凡, 孙家文, 孙昭晨. 人工岬湾养滩方法在月亮湾浴场平面设计中的应用[J]. 中国水运月刊, 2016(6): 305-307.
- [3] R G DEAN. Beach conservation: theory and practice[M]. Beijing: Ocean Press, 2010. R G 迪安. 海滩养护: 理论与实践[M]. 蔡锋, 曹惠美, 刘建辉, 译. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [4] ZHOU Y T, FENG X, GUAN W B, et al. Characteristics of beach erosion in headland bays due to wave action: taking the Narrabeen beach in Australia as an example[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64: 223-233. 周瀛涛, 冯曦, 管卫兵, 等. 波浪作用下岬湾海滩蚀积特点: 以澳大利亚 Narrabeen 海滩为例[J]. 科学通报, 2019, 64: 223-233.
- [5] ZHOU Y T, FENG X, GUAN W B, et al. Study on the erosion and silting process of cape shaped curved beach under storm wave action

- [J]. *Sediment Research*, 2019, 4:73-80. 周瀛涛, 冯曦, 管卫兵, 等. 风暴浪作用中岬角型弧形沙滩冲淤过程研究[J]. 泥沙研究, 2019, 4: 73-80.
- [6] FENG X, ZHOU Y T, LU Y, et al. Characteristics of beach erosion in headland bays due to storm-waves[C]. Proceedings of the 29th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2019, 3821-3829.
- [7] FENG X, OLABARRIETA M, VALLE-LEVINSONA A. Storm-induced semidiurnal perturbations to surges on the US eastern seaboard [J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 114: 54-71.
- [8] FENG X, YI F, CAO H J, et al. Study on wave characteristics of nearshore area in the radial sand ridges in the South Yellow Sea. *The Ocean Engineering*, 2018, 36(1): 62-73. 冯曦, 易风, 曹海锦, 等. 南黄海辐射沙洲近岸海域波浪特性研究[J]. 海洋工程, 2018, 36(1): 62-73.
- [9] YUAN J J, FENG X, FENG W B. Effects of radial sand ridges on tidal process in the South Yellow Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63:2904-2918.
- [10] ZHENG J, ZHANG C, DEMIRBILEK Z, et al. Numerical study of sandbar migration under wave-undertow interaction[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2013, 140(2): 146-159.
- [11] ZHANG C, ZHANG Q, ZHANG J, et al. Parameterization of nearshore wave front slope[J]. *Coastal Engineering*, 2017, 127: 80-87.
- [12] JIANG C H, CAO H J, FENG W B, et al. Quasi-static balance profile test of rigid vegetation coast under regular wave action[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2019(4): 7-14, 30. 江晨辉, 曹海锦, 冯卫兵, 等. 规则波作用下刚性植被海岸准静态平衡剖面试验[J]. 水运工程, 2019(4): 7-14, 30.
- [13] KUANG C P, SHAN Y C, GU J, et al. Maintenance engineering scheme of Longfengtou beach in Haitan Bay[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2014, 42(5): 689-694. 匡翠萍, 单云驰, 顾杰, 等. 海坛湾龙凤头海滩养护工程方案[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2014, 42(5): 689-694.
- [14] CAO C L, XIONG C B, LI X, et al. Study on coastal design and stability of artificial headland bay in Shijiugang, Rizhao[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 35(1): 24-32. 曹成林, 熊丛博, 李霞, 等. 日照石臼港人工岬湾海岸设计及稳定性研究[J]. 海岸工程, 2016, 35(1): 24-32.
- [15] WANG Y G, HUANG H M, LIN X. Study on influence of Jinping Xiaojinji breakwater and reclamation project on Jihu beach in caiyuan Town, Shengsi County[C]// Proceedings of the 12th China Coastal Engineering Symposium. 2005. 王义刚, 黄惠明, 林祥. 嵊泗县菜园镇金平小金鸡防波堤及围海造地工程对基湖沙滩影响研究[C]// 第十二届中国海岸工程学术讨论会论文集, 2005.
- [16] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Hydrological code for ports and waterways: JTS 145—2015[S]. Beijing: China Construction Press, 2015: 125-126. 中华人民共和国交通运输部. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015:125-126.
- [17] ROELVINK D, RENIERS A, DONGEREN A V, et al. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(11/12): 1133-1152.
- [18] DUO E, SANUY M, JIMENEZ J A, et al. How good are symmetric triangular synthetic storms to represent real events for coastal hazard modelling[J]. *Coastal Engineering*, 2020, 159: 103728.
- [19] ORMONDT M V, NELSON T R, HAPKE C J, et al. Morphodynamic modelling of the wilderness breach, Fire Island, New York. Part I: Model set-up and validation[J]. *Coastal Engineering*, 2020, 157: 103621.
- [20] BENNETT W G, KARUNARATHNA H, REEVE D E, et al. Computational modelling of morphodynamic response of a macro-tidal beach to future climate variabilities[J]. *Marine Geology*, 2019, 415: 105960.
- [21] DIDIER D, BAUDRY J, BERNATCHEZ P, et al. Multihazard simulation for coastal flood mapping: bathtub versus numerical modeling in an open estuary, Eastern Canada[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2019, 12(Suppl.1): e12505.
- [22] ONNON P K, RIJNL, WALSTRA D. The morphodynamic modelling of tidal sand waves on the shoreface[J]. *Coastal Engineering*, 2007, 54(4): 279-296.
- [23] HSU J R C, EVANS C. Parabolic bay shapes and applications[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1989, 87(4): 557-570.
- [24] KLEIN A H F, VARGAS A, RAABE A L A, et al. Visual assessment of bayed beach stability with computer software[J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29(10): 1249-1257.
- [25] RAABE A L A, KLEIN A H F, GONZALEZ M, et al. MEPBAY and SMC: software tools to support different operational levels of headland bay beach in coastal engineering projects[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(2): 213-226.
- [26] YAN K. *Coastal engineering*[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2003. 严恺. 海岸工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

Application of Anti-Wave Sediment Barrier in the Design of Artificial Beach

ZHOU Ying-tao¹, WANG Wei-qun¹, ZHANG Chen-hao², LU Yang³

(1. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The sandy beach in the core area of a coastal city is beautiful scenery to attract people to travel and go vacationing. No matter the natural or the artificial sandy beach, it can form a headland-bay arc shoreline after its evolution and stability. The construction of anti-wave sediment barrier plays a good role for the protection and fixation of sand. It can not only serve as a hard-mass boundary of the beach and shape the shoreline into a headland-bay terrain suitable for beach maintenance, but also shield the wind and waves coming from the outer sea and form waters with stable wave high and flow velocity at the nearshore part of the artificial beach. By taking the construction project of artificial beach in the Haikou Bay as the study object, the layout of the breakwater line is comprehensively analyzed, the appropriate section form is designed and the shielding effect on the nearshore waters after the construction of anti-wave sediment barrier is analyzed by building the XBeach numerical model for waves and sediments in the beach waters. It is found out that the design of the anti-wave sediment barrier at east and west sides can further reduce the wave height and flow velocity in the front of the barrier, thus forming stable waters suitable for paving and filling of the artificial beach. By combining the characteristics of two-dimensional wave-sand movement and the one-dimensional shoreline model, the influences of the design of the anti-wave sediment barrier on the evolution of the artificial beach are predicted. It has been revealed that in the case of the present design, the shielding effect of the anti-wave sediment barrier on the beach is better and the beach will be in a dynamic balance under the action of normal waves.

Key words: artificial beach; anti-wave sediment barrier; numerical simulation; beach evolution

Received: September 3, 2020