

# 三亚新机场工程海岸侵蚀补沙措施效果研究

刘 针<sup>1,2,3</sup>, 程永舟<sup>1</sup>, 戈龙仔<sup>2,3\*</sup>, 夏 波<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 交通运输部 天津水运工程科学研究所, 天津 300456;  
3. 港口水工建筑技术国家工程实验室, 天津 300456)

**摘 要:**沙质海岸在自然状态和修建新工程后存在侵蚀风险时,主要采用近岸补沙和建设生态离岸潜堤的方式进行海滩修复。采用 1:100 的正态波浪-潮流-泥沙物理模型模拟的方法对三亚新机场建设后天涯海角附近人工补沙方案的防护效果开展研究,分别针对常海况和台风浪作用工况进行了模拟试验。结果表明:人工补沙的维护周期大致每 4.5 a 一次,个别部位为每 9 a 一次;受人工补沙的掩护作用,大风浪作用 25 h 后沙滩断面基本能维持在原高程,需定期对补沙断面进行监测。研究表明,采用人工补沙既不改变岸滩的自然属性,又能有效减小受侵蚀岸段的冲刷和淤积岸段的淤积,且无明显次生影响,可显著缓解人工岛建设引起的岸滩冲淤影响。

**关键词:**沙质海岸;海岸侵蚀;正态物理模型;人工补沙方案

**中图分类号:**P753

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-3682(2021)02-0121-10

**doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2021.02.004

**引用格式:**LIU Z, CHENG Y Z, GE L Z, et al. Study on the effect of sand compensation measures for coastal erosion of Sanya new airport project[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(2): 121-130. 刘针, 程永舟, 戈龙仔, 等. 三亚新机场人工岛工程海岸侵蚀人工补沙措施效果研究[J]. 海岸工程, 2021, 40(2): 121-130.

沙质海岸具有丰富的自然资源和优美的风光,是人类生活的聚居地,具有海岸防护、旅游休闲和生态服务等多种重要功能。在全球气候变化和人类活动背景下,我国半数以上的海滩遭受侵蚀破坏,我国主要海湾自然岸线的比例由 20 世纪 40 年代的 78.21% 降至 2014 年的 28.87%<sup>[1]</sup>,海岸带固有的生态活力和环境弹性逐渐降低,甚至丧失。海岸侵蚀会带来巨大的生命财产损失,对其功能和状态进行修复和保护迫在眉睫。

20 世纪,以建造丁坝、防波堤、海堤等硬式构筑物来应对海岸侵蚀,但“硬性”结构防护海岸往往暴露诸多弊端<sup>[2-3]</sup>。随着海岸工程学家和海岸地貌研究人员的不断探索,发现向海滩抛沙等海滩养护措施可以减缓海滩的侵蚀。海滩养护技术已经被认可为一种环境友好型且经济有效的海岸侵蚀应对措施,广泛应用于世界各地。

为了能够实现岸线演变的预测,通常采用理论分析、现场观测<sup>[4]</sup>、物理模型试验及数值模拟等方法来研究沙质海岸的形态变化规律。海岸岸滩演变模型主要可分为 3 种:海岸岸线模型(Coastline Model)、海岸剖面模型(Coastal Profile Model)和海岸区域模型(Coastal Area Model),区域模型主要有 MIKE, ADCIRC, XBeach, Delft3D, ROMS, Telemac 等,其中 XBeach 被广泛用于各种类型的海岸环境。

在海滩演变方面国内外进行了很多物理模型的研究,大部分以剖面演变为重点进行实验研究。Zwamborn 等<sup>[5]</sup>, Gunyakti<sup>[6]</sup>对人工沙坝的参数和护滩效果进行了研究。杨燕雄等<sup>[7]</sup>应用数值模拟和物模试验探讨了沙坝的养滩功效。邱若峰等<sup>[8]</sup>依据秦皇岛市各段海岸的功能、性质和现状,建议各段海岸采取内容不同的养滩方式。赵多苍<sup>[9]</sup>对波浪与人工沙坝相互作用的过程进行分析,建立了人工沙坝附近波浪变形和波能变化的公式,并分析了波浪对沙坝变形的影响,描述了人工沙坝剖面从冲蚀到达到动态平衡的过程。包敏

收稿日期:2020-10-16

资助项目:交通运输部天津水运工程科学研究所科研创新基金项目——海上风电护底失效机理及新型防冲刷措施研究(TKS190201)

作者简介:刘 针(1979—),女,副研究员,硕士,主要从事波浪与结构物相互作用方面研究. E-mail: wave\_2006@126.com

\* 通信作者:戈龙仔(1977—),男,副研究员,硕士,主要从事港口航道方面研究. E-mail: gelongzai@163.com

(陈 靖 编辑)

等<sup>[10]</sup>通过对北戴河西海滩养护前、养护初、3 个月和一年后表层沉积物样品粒度实验,获得沉积物粒度参数,对海滩养护后沉积物粒度变化特征及其对养护海滩的影响进行了研究。王广禄等<sup>[11]</sup>以厦门香山—长尾礁沙滩修复工程为例,研究了海滩的修复和改造技术,探讨了人造海滩修复的主要内容及修复后海滩的演变过程。孙连成<sup>[12]</sup>采用水平比尺 1:350、垂直比尺 1:70 和变率为 5 的整体潮流泥沙物理模型对天津港东疆港区人工海滩的冲淤特性进行了研究。

在以往的波浪潮流泥沙物理模型试验中,受试验场地的限制,一般采取小变率的变态模型,但近岸岸滩演变主要受波浪作用,宜采用正态模型,可满足波浪水质点运动速度相似、波浪折射相似以及波浪破碎相似等,可以全面地模拟沙滩上波浪的运动,从而保证沙滩冲淤变化相似。本文以三亚新机场项目为例,开展正态整体波浪潮流泥沙物理模型试验和分析,验证人工补沙的防护效果。

## 1 研究区概况

研究区位于三亚市红塘湾附近,通过离岸人工岛填海造地形成陆域,陆域面积约 15 km<sup>2</sup>,离岸最近距离 4 km 左右,所在海域水深为 18~25 m,见图 1。工程建成后,对研究区在水动力方面产生一定的影响<sup>①</sup>,在天涯海角风景区附近人工岛工程修建后引起的水流改变幅度小于 2 cm/s,基本对近岸段水流条件没有影响。人工岛工程修建后只有 SW 向及 WSW 向波浪对工程区近岸有一定影响,波高减小 15%~20%,其他方向波浪对近岸没有影响。该海域 SW 和 WSW 向波高大于 0.5 m 的频率在全年中仅占约 5%。人工岛建设减小了 SW 和 WSW 向波浪,造成偏 SE 方向的波浪作用频率相对增加,形成向西的沿岸净输沙。

工程实施后,天涯海角至南山角附近的沙滩岸线将因人工岛工程影响而发生一定的冲淤调整,天涯海角至担油港西侧岸段,以及南山景区附近沙滩岸线产生冲刷,人工岛掩护岸段产生局部淤积。人工岛工程建设对天涯海角风景区会产生冲刷,但影响程度较小。从柔性防护和减小次生影响,并考虑景区运营的可能影响,对天涯海角景区沙滩非核心景点区实施人工补沙的对策方案,海滩补充的沙源随沿岸净输沙向西侧岸段运移,为担油港西侧冲刷岸段提供沙源。

### 1.1 研究区水动力特性

研究区常风向为 NE 向和 E 向,一般风力不强,只有在台风和强东北风侵袭时,风力才超过 6 级,平均每年有 7 d 风力超过 6 级,占全年 2%。影响三亚湾的热带气旋年均 5 个,大部分发生于 6 月—10 月;强热带风暴级(包含)以上热带气旋年均 3.0 个,台风级以上(包含)热带气旋,年均 2 个<sup>①</sup>。

2016-04-30—2017-04-29,中国科学院南海海洋研究所在工程附近开展了为期 1 a 的波浪观测,观测位

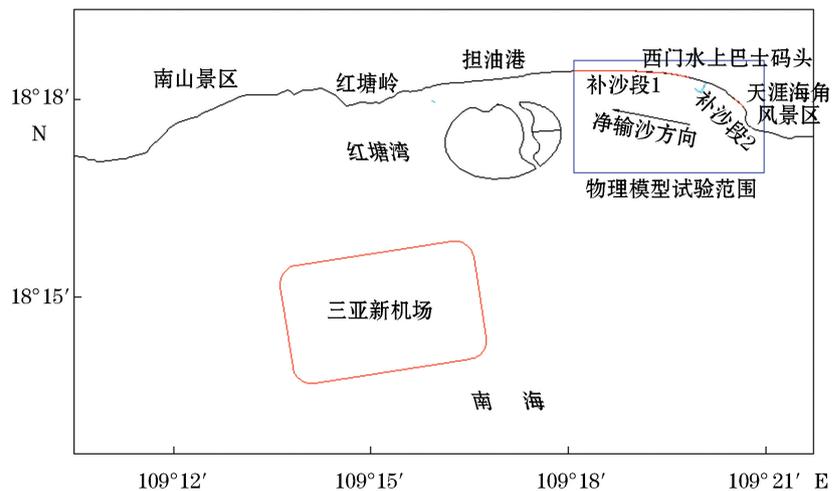


图 1 工程位置

Fig.1 Location of the project

① 南京水利科学研究院. 三亚新机场项目潮流泥沙数字模型, 2019.

置为  $109^{\circ}15'57.6''E, 18^{\circ}57'57.66''N$ , 该处海图水深约 15 m。根据工程海域波浪观测资料, 全年最大浪的浪向为 SW, 常浪向为 SSE, 出现率为 43.01%, 次常浪向为 S, 出现率为 29.21%。

研究区海域主要受南海前进潮波控制, 潮波从南海传至东南水域, 继续向西传播, 部分向西北偏西方向传入北部湾, 部分向北进入工程海域。三亚湾潮汐为不规则日潮混合潮, 以日潮为主。根据观测资料, 历史最高潮位 2.58 m, 历史最低潮位 0.49 m, 平均潮差 0.86 m, 最大潮差 2.14 m。

海南省海洋开发规划设计研究院 2016 年 3 月对工程区进行了大、小潮潮流观测, 从大范围流场分布结果(图 2)看, 该海域整体水流呈近岸流速较小、深水区流速较大的特点, 在 10 m 水深以浅区域, 实测大潮垂向平均最大流速一般不超过 65 cm/s。

根据工程地质勘察和底质取样资料分析, 10 m 水深以深区域钻孔近表层沉积物多为黏土夹砂, 即砂质海床主要分布于近岸区域, 在拟建人工岛东侧岸段, 除靠近东岬角(天涯海角)附近外, 5 m 水深以浅区域粒径也相对较粗, 且分布很不均匀, 中值粒径大多大于 0.3 mm, 局部大于 1.3 mm。但在 5 m 以深区域, 普遍分布细砂或粉砂质砂, 中值粒径大都小于 0.1 mm, 粉砂质量分数约为 20%~35%, 并含有少量粒径小于 0.004 mm 的黏性颗粒。

## 1.2 研究区沉积物特征

根据 2019 年 7 月 6 条垂线的大、中、小潮水体泥沙观测结果, 海域含沙量在时间和空间分布上均较为均一, 平均含沙量为  $0.005 \sim 0.018 \text{ kg/m}^3$ 。最大含沙量为  $0.025 \text{ kg/m}^3$ , 大致都在  $0.020 \text{ kg/m}^3$  以下, 海域整体含沙量较低。

工程区无大江大河入海, 河流输沙影响很小, 在边界条件未有明显变化的情况下, 海床整体较为稳定, 特别是波浪作用较小的深水区域, 海床长期冲淤变化很小。在近岸波浪作用明显的区域, 存在一定的冲淤波动。

### 1) 潮流作用下泥沙起动情况

水流作用下的泥沙起动是水流对泥沙运动影响的重要因素之一。根据张瑞瑾公式<sup>[13]</sup>对工程区不同粒径和不同水深组合下的起动流速  $V_c$  进行了计算:

$$V_c = (h/D)^{0.14} \sqrt{17.6D \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} + 0.000\ 000\ 605 \frac{10+h}{D^{0.72}}}, \quad (1)$$

式中:  $h$  为水深;  $D$  为泥沙粒径,  $\gamma_s$  为沙粒比重; 水体比重  $\gamma = 1$ 。中值粒径 0.015~0.020 mm, 水深 15~25 m 时, 起动流速约 1.3~1.9 m/s。根据现场实测水流资料, 实测最大流速仅 1.1 m/s, 不具备泥沙起动的基本条件。工程实施后, 局部流速增大 20%~30%, 仅有很少时段能够达到起动条件。

### 2) 波浪作用下泥沙起动情况

根据波浪观测资料分析工程岸段近岸代表波波条件, 运用忽略黏性影响的刘家驹天然沙起动公式<sup>[14]</sup>计算波浪作用下泥沙起动水深  $d$ :

$$d = \frac{L}{4\pi} \operatorname{arcsch} \left[ \frac{\pi g H^2}{M^2 L \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D + \beta \frac{\varepsilon_k}{D} \right)} \right] \quad (2)$$

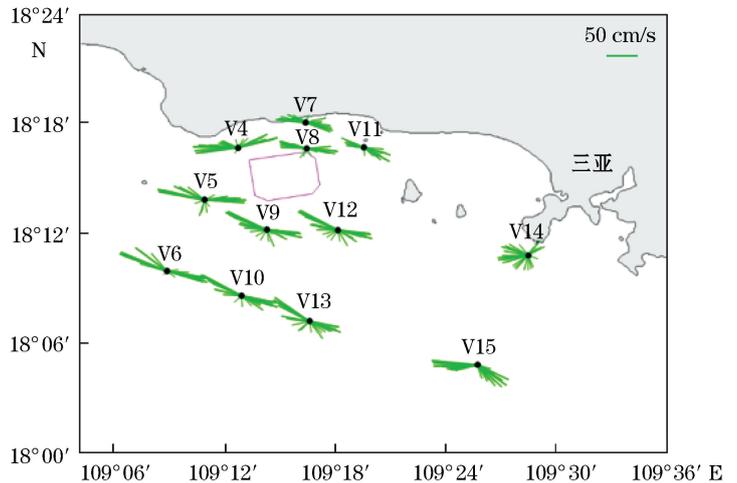


图 2 研究区附近海域大潮各测站实测垂向平均流场

Fig.2 Vertical average flow velocity during the spring tide at the stations in the study area

式中:  $L$  为波长;  $H$  为波高;  $D$  为泥沙粒径, 非黏性沙取中值粒径;  $\rho_s$  为泥沙密度;  $\epsilon_k$  为常数, 取值为  $2.56 \text{ cm}^3/\text{s}^2$ ,  $\epsilon$  为黏着力系数;  $\beta$  为常系数, 取值为  $0.039$ ;  $M$  为影响系数,  $M = 0.12 \left(\frac{L}{D}\right)^{1/3}$ 。

计算结果见表 1, 5 m 等深线以浅区域, 沉积物平均中值粒径为  $0.420 \text{ mm}$ , 1.0 m 波高作用下的泥沙起动水深约 6.5 m; 5 m 等深线以深的区域为粉砂质沉积物, 沉积物平均中值粒径为  $0.045 \text{ mm}$ , 1.0 m 波高作用下泥沙起动水深约 4 m。

工程海域全年中波高小于 1.0 m 的波浪出现频率超过 70%, 对于砂质沉积物来说, 6 m 等深线以浅区域的泥沙较活跃; 对于粉砂质沉积物, 4 m 以浅区域的泥沙较活跃, 但由于粉砂质沉积物主要分布在 5 m 以深区域, 因此该区域粉砂质沉积物总体而言是不活跃的, 这也是本海域水清沙少的主要原因, 因此本海域泥沙主要活动在 6 m 以浅的近岸范围内。造成泥沙起动、岸滩侵蚀的主要动力也是波浪影响。本海区含沙量很小, 所以模型考虑以波浪为主的推移质动床泥沙模型设计, 兼顾潮位变化的影响。

表 1 波浪作用下泥沙运动临界起动水深

Table 1 The water depth for critical starting of sediment movement under the wave action

中值粒径/mm	波高/m	周期/s	起动水深/m
0.420	0.5	4.0	3.17
	0.8	4.5	5.20
	1.0	4.9	6.64
	1.5	5.5	9.80
0.045	0.5	4.0	1.23
	0.8	4.5	2.64
	1.0	4.9	3.75
	1.5	5.5	6.63

## 2 物理模型与验证

### 2.1 模型相似原则及模型沙的选择

对于模型沙的选择, 同时考虑泥沙起动和沉降相似, 《波浪模型试验规程》<sup>[16]</sup> 中分别给出了泥沙起动和沉降相似的粒径比尺  $\lambda_D$  和沉降速度比尺  $\lambda_w$ , 两者联立可得波浪作用下满足沉降和起动相似的泥沙粒径及泥沙密度。另外, 通过量纲分析推导和物理模型试验验证得到了海岸泥沙运动相似条件综合比尺关系式, 兼顾了泥沙的起动和落淤相似:

$$\begin{cases} \lambda_{\rho_s-\rho} = \lambda_l^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda_h^{\frac{1}{2}} \\ \lambda_{D_{50}} = \frac{D_{m50}}{D_{p50}} = \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_l}\right)^{\frac{2}{3}}, \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_{D_{50}}$  为泥沙粒径比尺;  $\lambda_h$  为垂直比尺;  $\lambda_l$  为水平比尺;  $\lambda_{\rho_s-\rho}$  为相对密度比尺, 其中  $\rho_s$  为模型沙密度,  $\rho$  为原型沙密度。

港池宽 43 m, 长 75 m, 比尺选择为 1:100, 动床的模拟范围至 6 m 水深处, 模型范围见图 1。将  $\lambda_l = 100$ ,  $\lambda_h = 100$  和原型沙中值粒径  $D_{p50} = 0.42 \text{ mm}$  带入式(3), 可计算出满足泥沙起动和落淤相似的模型沙中值粒径和模型沙密度, 分别为: 模型沙  $D_{m50} = 0.42 \text{ mm}$ , 模型沙  $\rho_s = 1.165 \text{ g/cm}^3$ 。试验模型所采用的模型沙由聚苯乙烯塑料原料经改性、破碎制作而成。模型上最终选取的模型沙为  $D_{m50} = 0.42 \text{ mm}$  和  $\rho_s = 1.30 \text{ g/cm}^3$ 。

### 2.2 试验工况与地形验证

#### 2.2.1 试验工况

对 2016—2017 年波浪观测数据中大于 0.5 m 的波高进行统计分析, SSE 向为代表浪向, 代表波高为 0.76 m, 对应的有效周期是 5.52 s。模型试验时选用 SSE 向浪对地形进行验证, 确定冲淤时间比尺, 再进行

常浪和大风浪下人工补沙防护效果的试验。

试验波要素和潮流条件均考虑机场人工岛的建设,由波浪和潮流数学模型计算得到。试验潮型:大潮和小潮组合条件进行连续模拟。波高和潮位验证结果符合规范和规程的要求。试验组合见表 2。

表 2 试验工况

Table 2 Test operation conditions

工 况	试验内容	波 高	潮 期
2016 年地形(定床)	波浪和潮位的率定	年代表波高、重现期 50 a 波高	大潮和小潮
2016 年地形(动床)	地形验证	年代表波高	大潮和小潮
2019 年地形+人工补沙(动床)	补沙效果研究	年代表波高 重现期 50 a 波高	大潮和小潮

2.2.2 地形验证

在定床模型时先进行波浪和潮位的率定,模型的边界生潮系统采用水泵群变频调速闭环水位控制,用以模拟边界的涨落潮过程,采用高精度的自动水位仪实时采集水位。采用 Trimble CX 新型高速三维激光扫描仪进行试验前后地形的扫描,Trimble CX 能提供高精度的数据,可得到试验前后整个动床范围内的冲淤变化,也可得到任意断面的泥沙冲淤变化。

2016 年 3 月和 2019 年 6 月分别用多波束测深仪对工程区进行了水深地形测量,比例尺均为 1 : 5 000。利用物理模型试验对 2 次地形变化进行验证。

在模型验证试验中,经过多次调整试验,获得了冲刷岸线的相似,根据式(4)~式(6)计算输沙量,确定时间比尺为 642.5,现场 1 a 时间模型上需要 13.6 h,在实际试验中为偏于安全考虑,实际取值为 14 h。

$$Q_m = 2.08 \text{ kg/h} , \tag{4}$$

$$\lambda'_t = \frac{\lambda_{\gamma 0} \lambda_t^2 \lambda_d}{\lambda_{Qs}} = 642.5 , \tag{5}$$

$$\lambda_{Qs} = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{7.38 \times 1\ 000}{2.08} = 3\ 548.7 。 \tag{6}$$

在 2016 年和 2019 年 2 次实测了巴士码头东西两侧 2 个断面,并进行地形验证,对比结果见图 3,巴士码头东侧岸线原型与模型试验上的冲淤变化具体见图 4。模型与原型上岸线淤积部位基本吻合,断面变化趋势较为相似,地形的变化规律和量值与原型基本一致,这说明模型验证后的岸滩地形形态变化与原型变化是相似的,动床模型验证基本成功,模型沙和边界的选取也是合理的。

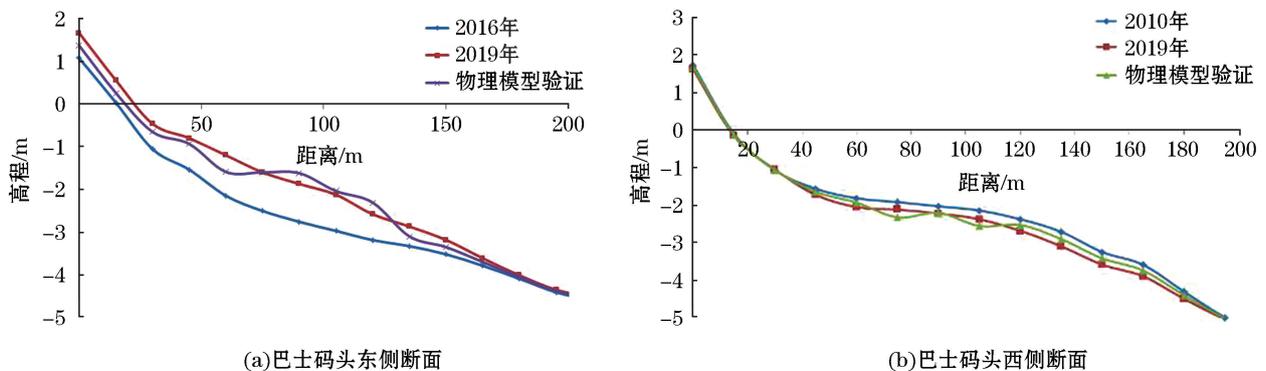


图 3 模型冲淤验证情况

Fig.3 Verification of erosion and deposition for the model

对比模型试验与原图上巴士码头东西侧岸线冲淤变形可知,在码头东侧,SSE 波浪作用下,经天涯海角绕射波作用对其掩护区域岸线产生冲刷,形成圆弧状,同时产生由东向西的沿岸输沙在码头附近堆积;而在码头西侧,位于码头的掩护区范围内,由于波浪的减弱,在其波影区内岸线存在一定的淤积,而波影区以外至西侧,受由东向西的沿岸输沙的影响,岸线存在一定的冲刷。



图4 模型与原型冲淤验证对比

Fig.4 Comparison of erosion and deposition verifications between the model and the prototype

### 3 试验结果与分析

补沙断面宽度主要在近岸 60 m 范围内,补沙接岸高程为 3.5 m,滩面设置 30 m 宽的肩滩,天然坡脚至水深 4.5 m 左右,人工补沙断面见图 5。为了测量人工补沙措施实施后岸线的变化情况,模型上布置了 54 个断面,每个断面之间的间距为 120 m(图 6),沿岸纵向方向分别在 14#~17# 断面范围内(补沙段 1),以及 28#~54# 断面(补沙段 2)范围内进行补沙。模型上补沙情况见图 7。

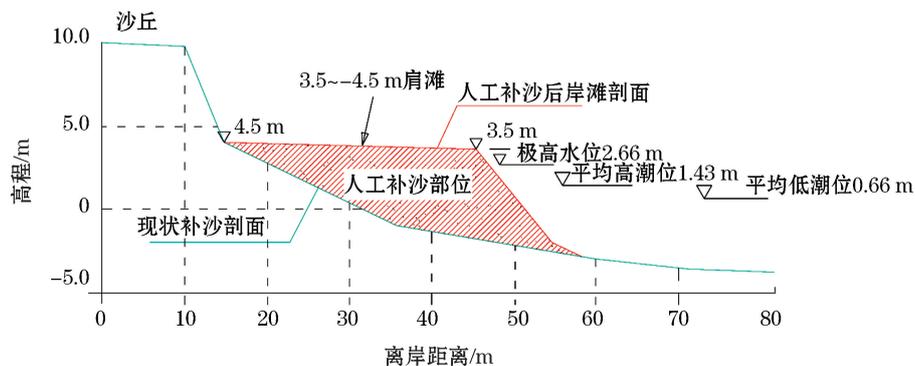


图5 人工补沙断面

Fig.5 Section of artificial sand filling

在波浪潮流动力条件下进行模型试验,观测整个动床范围内的冲淤变化。为了及时观测每个补沙断面泥沙的冲淤变化,试验每隔 1.5 a 测量泥沙断面的冲淤变化情况,并与沙滩的原断面高程进行对比,如果断面冲刷到达了原高程,则进行第二次人工补沙,补沙断面与第一次补沙断面相同,观测到大部分补沙断面均流失至原高程面时,试验则停止,得出整个岸滩补沙措施的维护周期。岸滩泥沙流失由纵向和横向两部分,由于补沙断面初期,斜坡表面松散泥沙大量坍塌堆至海侧方向的断面坡脚,表现为横向输沙。

未进行人工补沙的 25#~27# 断面,在试验进行到 4.5 a 后,地形有一定的冲刷,其中 26# 断面冲刷最大约为 60 cm,进行人工补沙的 28#、29#、34# 和 40# 断面,在波浪动力作用下岸滩冲刷至原地面高程。对 25#~27# 断面进行第一次人工补沙,对 28#、29#、34# 和 40# 断面进行第二次人工补沙,补沙后继续进行波浪作用下试验。断面冲淤变化见图 8。

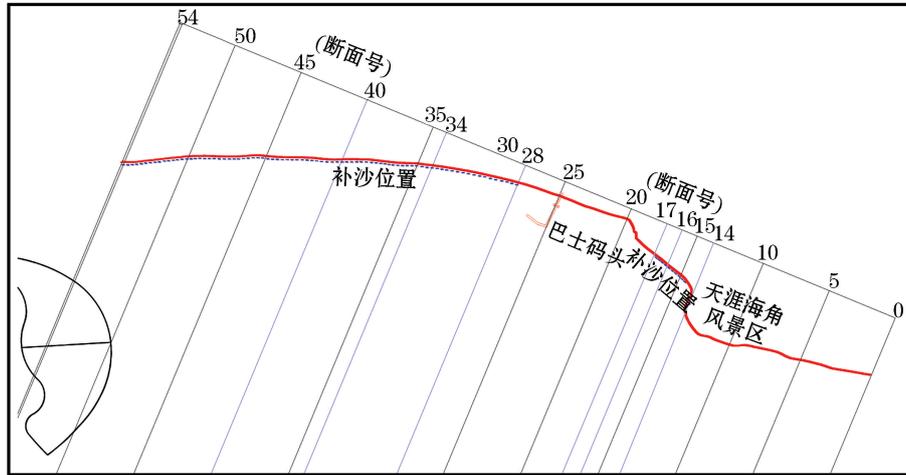
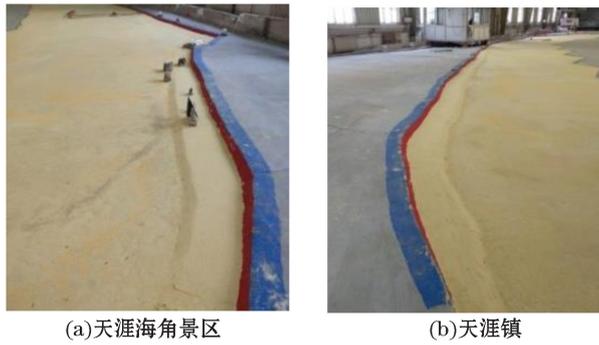


图 6 补沙位置和断面划分

Fig.6 Location and section division of the sand filling

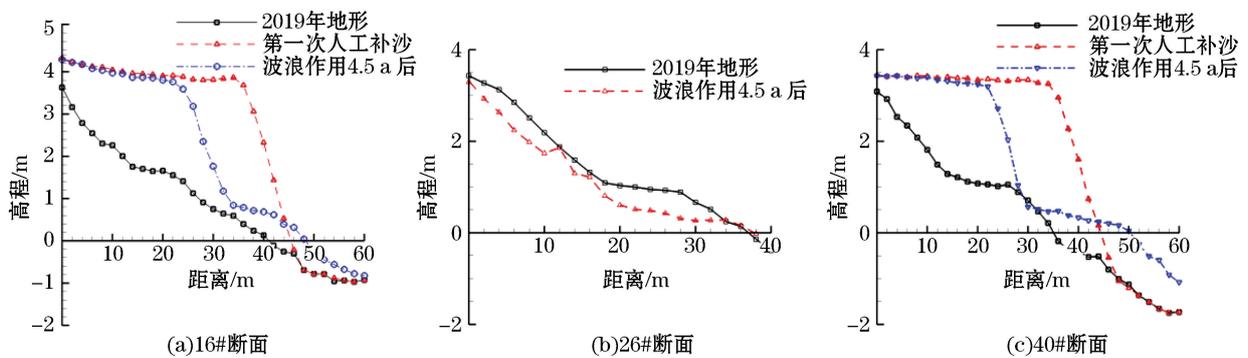


(a)天涯海角景区

(b)天涯镇

图 7 人工补沙完成后模型场景

Fig.7 Model scenario after finishing the artificial sand filling



(a)16#断面

(b)26#断面

(c)40#断面

图 8 试验 4.5 a 后断面冲淤变化

Fig.8 Experiment of the changes in the erosion and deposition of section after 4.5 years

试验进行到 6 a 后,未进行人工补沙的 24#断面局部冲刷最大为 60 cm 左右, 34#和 40#断面局部冲刷到原始地面高程,对 24#断面位置进行第一次人工补沙,对 34#断面进行第二次人工补沙,对 40#断面进行第三次人工补沙。断面冲淤变化见图 9。

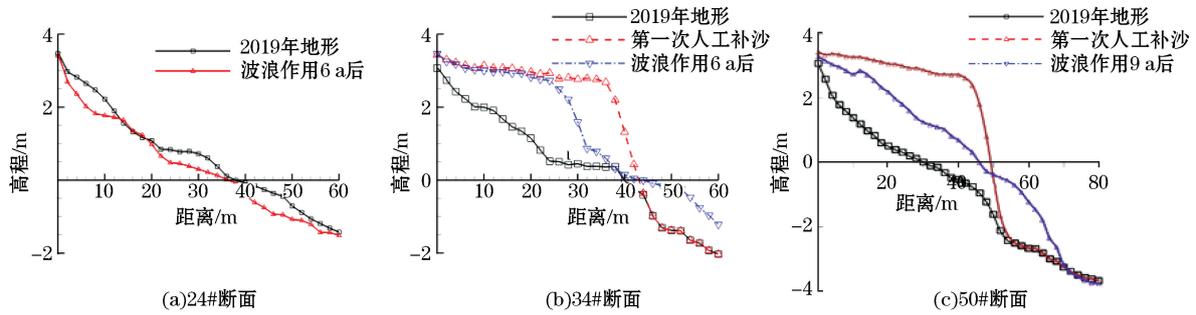


图9 断面冲淤变化

Fig.9 Experiment of the changes in the erosion and deposition of section after 6 years

继续波流联合作用试验 9 a 后,对于 16# 和 17# 断面补沙位置,在波浪动力作用下基本冲刷到了原地面高程,该补沙位置泥沙维护周期为 4.5 a。34# 断面再次被冲刷至原高程,40# 断面距离原地面高程局部最小的沙层厚度为 0.3 m,在 9 年期间,34# 断面补沙 2 次,40# 断面补沙 3 次,由此对 34# 和 40# 补沙断面在进行补沙措施后,泥沙维护周期分别为每 4.5 a 和 3 a 一次。对于 35#~39#,41#~50# 断面,波浪作用 9 a 后,补沙断面的冲淤变化见图 9。

根据初始补沙断面和试验后断面情况,对补沙量进行了统计,首次补沙量为 23 万  $m^3$ ,4.5 a 后补沙量为 5 万  $m^3$ ,9 a 后补沙量为 8.85 万  $m^3$ ,以后每隔 4.5 a 补沙量为 5 万  $m^3$  和 8.85 万  $m^3$  依次补充。

进行 50 a 一遇大浪作用下岸滩防护效果冲淤试验,有效波高为 6.2 m,平均周期为 12.2 s,波浪作用采用连续 25 h,除 39#、41#~43# 断面还存在 0.8 m 的沙层厚度外,其余断面均冲刷至原高程,此时需要及时补沙,避免泥沙进一步流失对岸线产生冲刷。50 a 一遇大浪作用下断面的冲淤变化见图 10,动床范围的冲淤变化见图 11 和图 12。

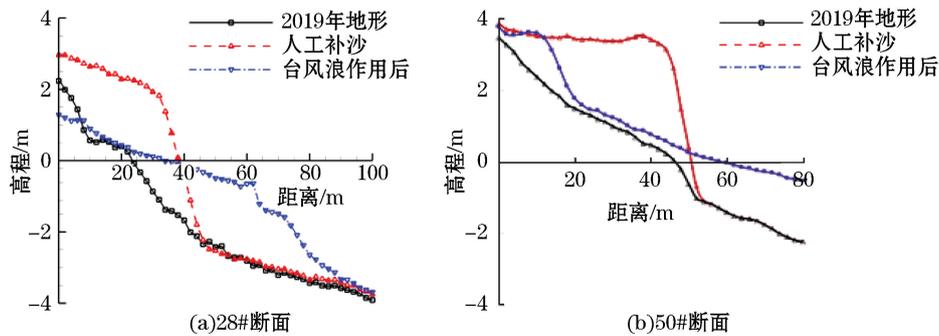


图 10 50 a 一遇大浪作用下断面随时间的冲淤变化

Fig.10 Changes of the section erosion and deposition with time under the storms occurring once in 50 years

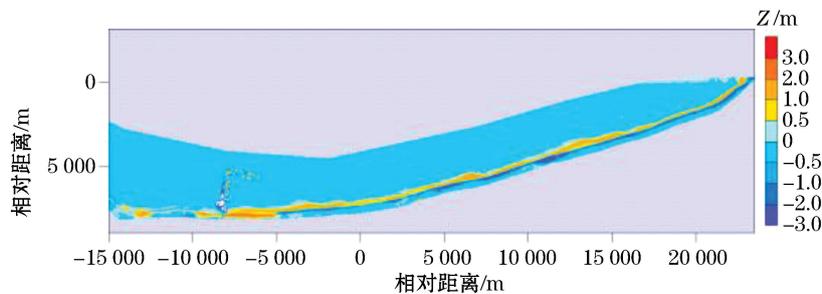


图 11 常海况作用 9 a 后冲淤变化

Fig.11 Change of erosion and deposition after 9 years under the normal sea condition

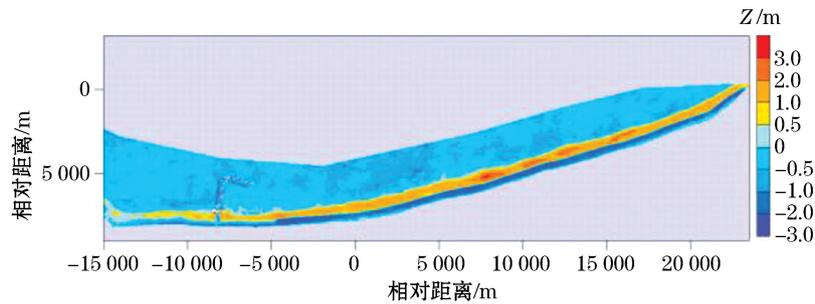


图 12 50 a 一遇波浪作用后冲淤变化

Fig.12 Change of erosion and deposition after the action of waves occurring once in 50 years

## 4 结 论

采用 1 : 100 的正态波浪-潮流-泥沙物理模型,对三亚机场人工岛建设后天涯海角风景区附近人工补沙方案的防护效果进行了研究,在常海况和大风浪作用下分别进行了试验,得到结论:

1)通过正态物理模型试验,计算受波浪和潮位共同影响下沙滩侵蚀的敏感部位和补沙频率,人工补沙的维护周期大致每 4.5 a 一次,个别部位为每 9 a 一次。受人工补沙的掩护作用,在重现期 50 a 大浪作用 25 h 后,沙滩基本能保持原高程。人工补沙可减小大风浪对沙滩的侵蚀破坏,大风浪过后应对冲刷敏感部位及时补沙。

2)为更好地实施补沙防护措施、实现对岸滩的保护效果,建议定期对补沙断面进行监测,掌握岸滩泥沙输移情况,及时对岸滩进行维护修复,避免泥沙冲淤对工程区岸滩产生不利的影响。

3)采用人工补沙不改变岸滩的自然属性,并能有效减小冲刷岸段的冲刷和淤积岸段的淤积,且无明显次生影响,可使人工岛建设引起的岸滩冲淤影响得到显著缓解。

## 参考文献 (References):

- [1] CAI F, LIU G. Beach nourishment development and technological innovations in China: an overview[J]. Journal of Applied Oceanography, 2019, 38(4): 452-463. 蔡锋, 刘根. 我国海滩养护修复的发展与技术创新[J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(4): 452-463.
- [2] AERTS JCJH, BOTZEN WJW, EMANUEL K, et al. Evaluating flood resilience strategies for coastal megacities[J]. Science, 2014, 344(6183): 473-475.
- [3] JIN D, HOAGLAND P, AU D K, et al. Shoreline change seawalls and coastal property values[J]. Ocean & Coastal Management, 2015, 114: 185-193.
- [4] GONG L X, YANG Y X, ZHANG J B, et al. Beach monitoring technology and application[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 30(3): 47-55. 官立新, 杨燕雄, 张甲波, 等. 海滩原位监测技术及应用[J]. 海洋地质前沿, 2013, 30(3): 47-55.
- [5] ZWAMBORM J A, FROMME G A W, FITZPATRICK J B. Underwater mound for the protection of Durban's beaches[C]// American Society of Civil Engineering. The Twelfth Coastal Engineering Conference Proceeding, 1970: 975-994.
- [6] GUNYAKTI A. Beach preservation by means of offshore submerged mound of dredged materials[C]// American Society of Civil Engineering. Coastal Zone, 1987: 2461-2471.
- [7] YANG Y X, YANG W, QIU R F, et al. Application of artificial submerged sandbars to beach nourishment[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(2): 23-30. 杨燕雄, 杨雯, 邱若峰, 等. 人工近岸沙坝在海滩养护中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(2): 23-30.
- [8] QIU R F, YANG Y X, ZHANG Z Y, et al. Coastal erosion disaster and countermeasures on sandy beach in Hebei Province[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2009(2): 162-167. 邱若峰, 杨燕雄, 庄振业, 等. 河北省沙质海岸侵蚀灾害和防治对策[J]. 海洋湖沼通报, 2009(2): 162-167.
- [9] ZHAO D C. Study on the sandy beach erosion and protection technology of the offshore artificial sand bar[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. 赵多苍. 沙质海滩侵蚀与近岸人工沙坝防护技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.

- [10] BAO M, WANG Y H, YANG Y X, et al. Changes in sediment grain-size before and after beach nourishment on the west beach of Beidaihe[J]. *Marine Geology Letters*, 2010, 26(9): 25-34. 包敏, 王永红, 杨燕雄, 等. 北戴河西海岸人工养护前后沉积物粒度变化特征[J]. *海洋地质动态*, 2010, 26(9): 25-34.
- [11] WANG G L, CAI F, CAO H M, et al. Study on the practice and theory of beach replenishment of Xiangshan-Changweijiao Beach in Xiamen[J]. *The Ocean Engineering*, 2009, 27(3): 66-75. 王广禄, 蔡锋, 曹惠美. 厦门香山至长尾礁沙滩修复实践及理论探讨[J]. *海洋工程*, 2009, 27(3): 66-75.
- [12] SUN L C. Experimental study on scouring and silting stability of the man-made beach in Dongjiang Harbor area of Tianjin Port[J]. *Port Waterway Engineering*, 2009(2): 7-12. 孙连成. 天津港东疆港区人工沙滩冲淤稳定性试验研究[J]. *水运工程*, 2009(2): 7-12.
- [13] ZHANG R J. River sediment dynamics[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1998: 74. 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 74.
- [14] LIU J J. Study and application of coastal sediment movement[M]. Beijing: Ocean Press, 2009: 61. 刘家驹. 海岸泥沙运动研究及应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 61.
- [15] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for wave model test: JTJ/T 234—2001[S]. Beijing: China Communication Press, 2001. 中华人民共和国交通部. 波浪模型试验规程: JTJ/T 234—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

## Study on the Effect of Sand Compensation Measures for Coastal Erosion of Sanya New Airport Project

LIU Zhen<sup>1,2,3</sup>, CHENG Yong-zhou<sup>1</sup>, GE Long-zai<sup>2,3</sup>, XIA Bo<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 4101141, China;

2. Tianjin Institute of Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;

3. National Engineering Laboratory of Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** When a sandy coast is at risk of erosion in a natural state and after the construction of new project, the restoration of beach is carried out mainly by means of nearshore compensation of sand and construction of ecological offshore submerged breakwater. The protective effect of artificial sand replenishment near Tianya Haijiao after the construction of Sanya new airport is studied by means of a normal wave-tide-sediment physical model with a scale of 1:100 and simulated respectively under the conditions of normal sea state and typhoon wave. The results show that the maintenance period of the artificial sand replenishment is roughly about once every 4.5 years, with once every 9 years at individual sites of the beach. Due the coerture by the artificial sand compensation, the section of the beach can be basically kept at the original elevation after 25 hour action of storm. Therefore, it is necessary to monitor regularly the section of sand-filling. The study indicates that by the artificial sand compensation, the natural properties of the beach can not be changed, both the scouring of the eroded coast segments and the silting of the deposited coast segments can be reduced effectively, no obvious secondary affection can be caused and the erosion and deposition of the beach caused by the construction of artificial islands can be alleviated obviously.

**Key words:** sandy coast; coastal erosion; normal physical model; artificial sand compensation plan

**Received:** February 26, 2021