



基于人工补沙的四位一体岸滩生态防护设计

王日旺^{1,2}, 李冠星^{1,2}, 冯海波^{1,2}, 吴佳苹^{1,2}

(1. 中交四航局港湾工程设计院有限公司, 广东 广州 510290;

2. 广东省海岸与岛礁工程技术研究中心, 广东 珠海 519080)

摘要: 人工补沙目前被认为是一种较为理想的砂质岸滩防护方式, 对生态环境影响小, 但存在补沙流失率高、重补周期短等问题。对亚龙湾西段砂质岸滩防护设计进行研究, 针对工程海域波流作用显著、岸滩侵蚀强度大、景观要求高、生态环保要求严的特点, 分析岸滩侵蚀原因, 归纳不同方法的流失量、流失率、重补周期等关键指标, 探讨不同方法对不同场景的适用性, 结合模型试验研究, 创造性地提出生态护岸、干滩补沙、近岸补沙、水下拦沙坝相结合的“四位一体”岸滩生态防护模式, 预期 5 a 流失率降低 20% 以上, 重补周期延长近 1 倍。

关键词: 人工补沙; 生态护岸; 干滩补沙; 近岸补沙; 水下拦沙坝

中图分类号: U652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0019-10

Integrated four-in-one beach ecological protection design based on artificial beach nourishment

WANG Ri wang^{1,2}, LI Guanxing^{1,2}, FENG Hai bo^{1,2}, WU Jia ping^{1,2}

(1. Engineering Design Institute Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;

2. Guangdong Provincial Engineering Research Center of Coasts, Islands and Reefs, Zhuhai 519080, China)

Abstract: At present, artificial beach nourishment is considered an ideal way to protect sandy beaches, which has little impact on the ecological environment. However, it faces problems such as a high nourishment loss rate and a short replenishment cycle. This paper studies the design of sandy beach protection in the western section of Yalong Bay. In view of the characteristics of significant wave-current action, high beach erosion intensity, high landscape requirements, and strict ecological and environmental protection requirements in the project area, this paper analyzes the causes of beach erosion, summarizes key indicators such as the loss amount, loss rate, and replenishment cycle of different methods, explores the suitability of different methods for different scenarios, and combines model test research to creatively propose an “integrated four-in-one” beach ecological protection design model, which integrates ecological revetments, dry beach nourishment, nearshore nourishment, and underwater sand retaining dams. It is expected that the loss rate will be reduced by more than 20% within 5 years, and the replenishment cycle will be nearly doubled.

Keywords: artificial beach nourishment; ecological revetment; dry beach nourishment; near-shore nourishment; underwater sand-retaining dam

砂质岸滩是我国现代滨海旅游发展的重要资源, 为海洋经济发展和生态文明建设提供不可或缺的重要助力。然而, 我国约有 49.5% 的砂质海岸发生了岸滩侵蚀现象^[1], 岸滩生态环境日益恶

化, 严重影响我国海洋旅游产业发展。为减缓岸滩侵蚀, 人工补沙作为一种较为理想的“软性”工程措施, 利用沙子补给受侵蚀岸滩, 具有施工简便、对环境干扰小等优点, 已在国内外得到广泛应用。

收稿日期: 2025-03-05

作者简介: 王日旺(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口、航道与海岸工程规划设计。

人工补沙最早于 20 世纪初在美国开始研究和实践,经过百余年的发展,欧美发达国家已积累了比较完善的补沙理论和丰富的实践经验^[2-3],早期主要研究人工补沙以及“硬性”工程(丁坝、拦沙堤、防波堤、海堤等)组合防护设计,但随着生态修复理念的兴起,对环境影响小的近岸补沙^[4]研究越来越受关注。比如,荷兰诺德维克地区于 1998—2006 年期间实施了 3 次水下抛沙^[5],能够有效减缓沙坝向海迁移的速度;荷兰代尔夫兰海岸于 2011 年开展了创新性的补沙引擎工程^[6],即在平均低潮位以下和沙丘线之间进行补沙,借助波浪作用向海滩缓慢输沙,其长期养滩效果好、对环境友好、节省投资,具有很好的应用前景。我国自 20 世纪 90 年代在香港浅水湾开始人工补沙以来,经过 30 多年的快速发展,积累了大量富有成效的试验研究成果,并形成较为成熟的海滩养护理论和技术体系。例如,孙连成^[7]利用物理模型及波浪水槽模型研究在有防波堤及丁坝掩护条件下的人工沙滩的冲淤情况;黄哲等^[8]采用物理模型试验探讨有挡沙坝和护岸限制下的人工沙滩的剖面形态变化规律;谭忠华等^[9]通过物理模型分析在防波堤掩护下的堤后次生波对人工沙滩的影响情况;解鸣晓等^[10]开发先进的人工沙滩数值、物理模拟技术,提出环抱式防波堤、勾头丁坝、坡脚潜堤相结合的岸滩防护措施;郑金海等^[11]从波浪动力与滩肩、沙坝的稳定性以及模拟预测的角度出发,系统总结我国岸滩防护理论和研究情况。这些研究为岸滩防护设计和工程实践提供了重要的理论基础和技术支撑。在工程实践方面,我国累计完成人工补沙量突破 2 500 万 m^3 ,人工补沙岸线长度突破 130 km^[12]。其中,很多工程采用干滩补沙与“硬性”工程相结合的防护措施^[13-14],均取得一定的防护效果。例如,三亚市三美湾和鹿回头湾人工沙滩^[15]均采用干滩补沙和丁坝以及潜堤相结合的防护措施;珠海市香炉湾岬湾海滩修复^[16]通过构建丁坝形成人工岬角,并与干滩补沙结合应用;厦门会展中心海滩修复^[17]

利用入海管涵构建丁坝群,并结合干滩补沙共同发挥作用;海南陵水土福湾赤岭岸线修复^[18]也采用干滩补沙和丁坝相结合的方案。

尽管我国在岸滩防护方面已取得了显著进展,但仍存在一些亟待解决的问题。一方面,当前国内工程实践广泛采用干滩补沙方式,但普遍存在沙子流失快、重补周期短、维护成本高等问题^[19]。相比而言,近岸补沙更具生态和成本优势,但其相关机理尚未完全成熟且在国内工程应用极少,因此,如何在岸滩防护设计中有效实施近岸补沙是一个亟待深入研究的问题。另一方面,国内工程大多采用丁坝、防波堤或者海堤等工程措施辅助人工补沙,虽然在一定程度上拦截沿岸输沙、削弱波浪作用以及减少岸滩泥沙流失,但存在造价高、占用海域面积大、景观较差以及对生态环境影响较大等问题,这些工程措施还可能引发上下游岸段、堤前或者堤后发生更显著的淤积或冲刷,进一步加剧岸滩生态破坏。在用海管控以及生态环保要求严格的背景下,这些传统“硬性”工程措施的适用性受到越来越多的限制^[20]。相比之下,生态护岸和水下拦沙坝采用更加环保的新型结构,能有效减少对岸滩生态环境的负面影响,是值得深入研究的岸滩防护措施。

本文依托亚龙湾西段人工补沙工程,基于“硬性”工程与“软性”工程协同理念,从岸滩防护的结构安全、防护效果、生态环境保护等角度,对岸滩生态防护的设计思路、设计方案以及模型试验效果展开综合分析。在常规干滩补沙的基础上,引入近岸补沙,并结合生态护岸以及水下拦沙坝,创新性地建立四位一体岸滩生态防护模式。该模式不仅能够更有效地减缓岸滩侵蚀,还能实现更好的生态修复效果,为类似岸滩修复和防护工程提供新的参考和借鉴。

1 工程概况

亚龙湾位于海南省三亚市,亚龙湾海域朝 SSE 向开敞,西侧为白虎角,东侧为野猪岛、西

洲岛、东洲岛和牙笼半岛, 工程岸段为亚龙湾西段砂质岸滩。近些年来亚龙湾砂质岸滩侵蚀较为严重, 尤其是长约 2 km 的西段砂质岸滩的侵蚀强度为严重侵蚀^[21], 据监测: 2010—2019 年西段砂质岸滩沙子总流失量约 23 万 m³, 年平均流失量约 2 万 m³, 年平均后退距离约 1.0 m。亚龙湾西段砂质岸滩侵蚀严重, 且存在继续侵蚀的趋势, 已明显影响到亚龙湾沿岸设施安全和旅游开发, 亟须实施岸滩防护。

2 侵蚀原因分析

溯源亚龙湾西段砂质海岸演变历史和环境条件分析, 大潮垂线平均流速最大值不超过 0.4 m/s, 潮流对沿岸输沙作用甚微。工程区附近 -5 m 水深附近 50 a 一遇有效波高约 2 m, 工程岸滩为波控岸段, 岸滩侵蚀的主要原因是: 1) 亚龙湾东南侧 2004 年新建连接东洲岛、西洲岛和野猪岛之间的防波堤, 严重压缩亚龙湾的水域空间, 亚龙湾原有的岸滩平衡状态被打破。自防波堤修建后, 阻挡了 SE 向波浪, S 和 SSW 向波浪作用频率相对增

多, 形成自西向东的沿岸净输沙, 从而导致西段砂质岸滩遭受侵蚀。2) 亚龙湾西段沿岸旅游开发, 青梅河口淤积在河口的游艇码头中, 导致西段砂质岸滩的沙源减少, 没有足够的沙源补充。3) 旅游开发压缩岸滩植被生长空间, 沿岸岸坡缺乏大量植被根系的固坡作用, 在高潮大浪作用下岸坡失稳坍塌, 出现岸线后退现象, 进一步加剧岸滩侵蚀。

岸滩侵蚀变化趋势见图 1。经分析认为: 亚龙湾西段砂质岸滩加剧侵蚀的主要原因是人类活动改变海区浪、流环境, 打破了岸滩原有的动态平衡; 主导动力是波浪与沿岸流共同作用; 主要因素是沙源补给不足无法达成新的冲淤平衡, 以及较陡的砂质岸坡极易被浪流淘刷而坍塌, 导致岸滩持续蚀退并呈现加剧的趋势。防护的关键在于采取与该海区现状相适宜的工程措施, 引入生态防护理念, 以人工干预的方式, 重点从减弱浪流动力、补给沙源和稳坡固滩等角度出发进行防护设计, 以达到重塑海岸生态稳坡能力、有效减缓岸滩侵蚀的目的。



图 1 亚龙湾西段砂质岸滩侵蚀变化趋势

Fig. 1 Erosion trend of sandy beach on western section of Yalong Bay

3 岸滩防护设计

3.1 设计思路

常规消浪拦沙的工程措施是潜堤和丁坝, 虽

然能够减小波浪作用和泥沙流失, 但潜堤会引起沙嘴淤积, 丁坝会改变沿岸输沙格局^[22], 均对生态环境、景观和海上旅游娱乐活动安全产生不可

逆的影响,因此亚龙湾西段砂质岸滩不宜采用这两种措施。

从稳坡固滩角度出发,采用生态护岸,能够防止岸线进一步蚀退,并种植植被优化生态功能和景观效果,但需要长期维护植被。从补给沙源的角度出发,干滩补沙造滩效果好,但剖面后续调整较大、流失快,需要频繁补沙^[23];近岸补沙具有消浪和补给海滩的作用,尽管技术尚未完全成熟,但更适合亚龙湾西段的实际情况,宜考虑与干滩补沙结合应用。从减弱浪流动力和拦沙角度出发,水下拦沙坝尽管施工较复杂、耐久性不如潜堤,但造价低、对生态和景观影响小,具有很好的应用前景。因此,防护设计综合考虑采用生态护岸、干滩补沙、近岸补沙、水下拦沙坝进行组合配置。

3.2 生态护岸设计

3.2.1 生态护岸结构

亚龙湾西段岸滩对生态和景观要求高,宜采用结构安全可靠又具有良好生态功能和景观的生态护岸。由于直墙式护岸与沙滩存在高差,堤前波浪反射大,护岸前沿容易淘刷,且对岸滩景观影响较大;而斜坡式护岸顺应自然边坡,可减少护岸前沿淘刷,与沙滩过渡连续性好,景观较佳,因此护岸主体采用斜坡式结构。

目前常见的生态护岸材料大多采用钢丝石笼、生态袋、三维土工网垫、生态混凝土、混凝土板桩、混凝土空心块体、生态砌块等,但三亚市的岸滩普遍波浪大,对护岸结构安全性和景观要求高,常见的生态护岸材料并不适用于三亚市海滩。为此,在三亚湾西段设置生态护岸试验段,该试验段采用聚氨酯生态护岸,利用聚氨酯优良的物理力学及黏结性能,凝固后与普通的碎石块形成坚固的整体结构,并且护岸的碎石之间留有空隙,可种植植被,具有施工简单、造价低、景观效果好的优点。工程护岸结构引用聚氨酯生态护岸思路,具体结构为:坡比 1:3,坡面由上至下依次为厚 200 mm 的聚氨酯碎石层、厚 100 mm 碎石垫层、

一层 400 g/m² 无纺布、10~100 kg 块石层。坡面铺设完成后在聚氨酯碎石体孔隙种植植被,以形成生态化护岸。

3.2.2 生态护岸顶高程

生态护岸为斜坡式结构,高潮大浪的波浪爬高为护岸顶高程的重点考虑因素。波浪爬高根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[24]第 10.2.3 条计算得出波浪最大爬高为 2.9 m(高程基准为当地理论最低潮面);护岸顶高程按不允许越浪的斜坡式结构考虑,根据 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[25]第 7.2.2 条计算得出生态护岸顶高程取 5.5 m。

3.3 人工补沙关键参数

3.3.1 滩面高程

干滩面高程需要综合考虑当地潮位、波浪爬高、现状高程、相邻海滩高程等多方面因素,干滩面高程计算公式为:

$$H_E = H_{DWL} + H_R \quad (1)$$

式中: H_E 为滩肩高程, m; H_{DWL} 为 20 a 重现期的设计水位, m; H_R 为波浪爬高, m。

波浪爬高经验公式^[26]为:

$$R_{2\%} = 1.1 \left\{ 0.35(H_0 L_0)^{1/2} \tan \beta + \frac{[H_0 L_0 (0.563 \tan^2 \beta + 0.004)]^{1/2}}{2} \right\} \quad (2)$$

式中: $R_{2\%}$ 为累积频率为 2% 的波浪爬高, m; H_0 为深水波的波高, m; L_0 为深水波的波长, m; β 为滩面坡度, (°)。

干滩面高程计算值为 3.2 m。由于当地相邻未受侵蚀岸滩自然高程在 4.0 m 左右,干滩面高程考虑与其保持一致,滩面坡度 1:60,取值 3.7~4.0 m。近岸补沙高程考虑景观要求不宜露出水面,同时考虑消浪效果也不宜过低,设计低水位为 0.2 m,因此近岸补沙面高程取值 0.0 m。岸滩 -2.5 m 水深线以外冲淤变化很小, -2.5 m 水深线以内冲淤变化较大,考虑近岸补沙外边界布置在 -2.5 m,因此近岸补沙高程为 -2.5~0.0 m。

3.3.2 滩面宽度

对于干滩面宽度, 推荐滩肩经济宽度为 30~60 m, 养护或修复海滩设计的施工坡度推荐使用 1:8~1:15, 但近岸补沙对沙滩有补给作用, 为降低补沙量、减少投资, 干滩面宽度适当缩窄至 20 m, 坡度 1:8。对于近岸补沙宽度, 由于 0 m 水深线至-2.5 m 水深线的平均距离约 55 m, 补沙坡度考虑 1:10, 边坡水平距离 25 m, 反推出近岸补沙面宽度为 30 m。

3.3.3 补沙粒径

对于干滩补沙区域, 现状海滩沙的泥沙中值粒径整体在 0.4~0.7 mm, 为给游客提供良好的沙滩体验, 补沙粒径应尽可能与当地沙滩粒径接近, 因此干滩补沙中值粒径控制在 0.4~0.7 mm。对于近岸补沙区域, 宜选择略粗于沙滩粒径的沙源, 适当加粗有利于增强抗冲刷能力。因此, 近岸补沙中值粒径控制在 0.5~1.0 mm。

3.4 水下拦沙坝设计

3.4.1 水下拦沙坝布设位置

由于海滩剖面的冲刷范围主要集中在-2.5 m 水深线以内区域, -2.5 m 水深线以外变化很小, 水下拦沙坝布置在近岸补沙区边界外-3.0 m 水深附近, 岸滩冲淤变化对水下拦沙坝的影响也较小。

3.4.2 水下拦沙坝顶高程

水下拦沙坝顶高程应考虑亚龙湾旅游景区对景观的要求, 拦沙坝不露出水面, 由于极端低水

位(50 a 一遇)为-0.54 m, 水下拦沙坝顶高程取-1.0 m。尽管消浪作用略差, 但水下拦沙坝顶高程较低, 对水上运动影响较小, 拦沙坝造价也较低。

3.4.3 水下拦沙坝结构

考虑到生态环保要求高, 水下拦沙坝不宜采用抛石或混凝土结构, 因此采用环保的生态砂管, 生态砂管是一种高强度织物表层复合耐久纤维并缝合而成的柔性管状充砂体, 其织物基布在生产过程中可加入抗光老化稳定剂和抗氧化稳定剂以达到相应的使用寿命。水下拦沙坝由 2 排抗浪生态砂管组成, 砂管长 20 m、高 2.0 m、断面周长 13 m。护底结构采用砂肋系结压载软体排, 软体排的排布宽 23 m, 砂肋直径 0.5 m, 共设 10 个砂肋, 砂肋间距 1.5 m。排布与砂肋布均采用 300 g/m² 的聚丙烯长丝机织布。

3.5 模型试验

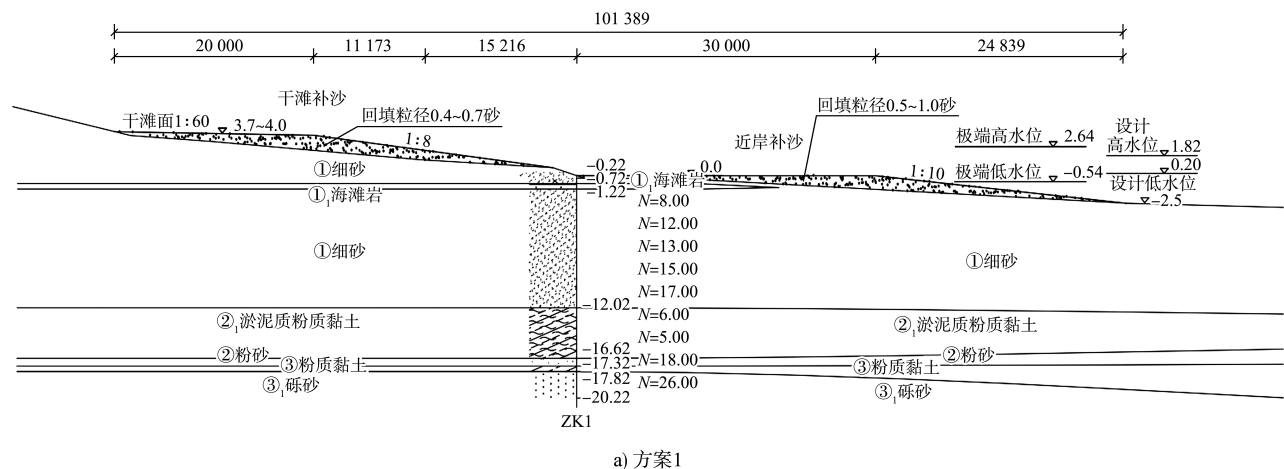
3.5.1 对比方案

为研究生态护岸、干滩补沙、近岸补沙以及水下拦沙坝的防护效果, 通过不同组合形成 3 组对比方案, 见表 1 和图 2。

表 1 对比方案

Tab. 1 Comparison schemes

方案	生态护岸	干滩补沙	近岸补沙	水下拦沙坝
1	-	采用	采用	-
2	采用	采用	采用	-
3	采用	采用	采用	采用



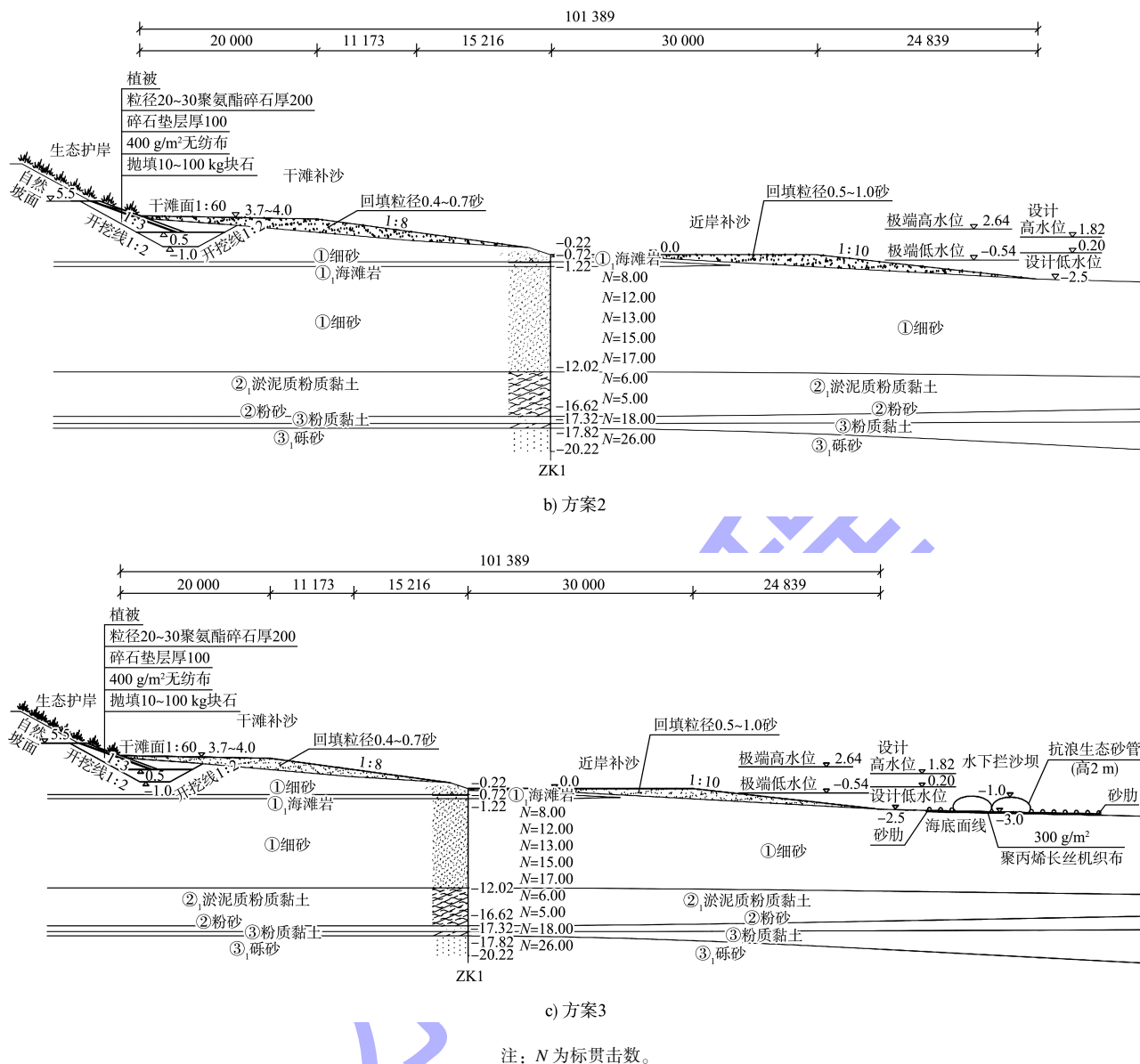


图 2 对比方案的断面 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 2 Section of comparison schemes (dimension: mm; elevation: m)

3.5.2 物理模型原理

为研究不同组合方案的岸滩防护效果,采用整体物理模型对岸滩冲淤变化进行试验^[27]。由于亚龙湾西段砂质岸滩侵蚀主要动力是波浪引起的沿岸输沙,因此采用整体波浪泥沙物理模型。根据波浪分析,泥沙起动水深在-6 m 左右,模型模拟范围为水深-8 m 至现状岸坡高程 10 m 之间的动床范围。模型相似性为波浪运动相似和泥沙运动相似。模型平面比尺为 1:120,采用推板式造波机模拟海域波浪。根据水深测量图采用横向和纵

向现状地形水深剖面制作模型地形近似模拟现状亚龙湾西段岸滩。模型沙的粒径根据现状沙的中值粒径按满足起动相似、冲淤部位相似和沉降相似原理计算确定。

3.5.3 试验效果分析

试验补沙量为 20 万 m³,其中,干滩补沙和近岸补沙量均为 10 万 m³。当海滩修复填沙流失量超过 50%时须进行再养护补沙,因此按 50%流失率计算重补周期。工程岸滩的整体冲淤模拟试验情况见表 2、3。

表 2 岸滩冲淤变化情况对比
Tab. 2 Comparson of sandy beach erosion and deposition dynamics

方案	实施 3 a 后			实施 5 a 后		
	单宽最大流失量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)	干滩宽度平均 缩短率/%	近岸补沙宽度 平均缩短率/%	单宽最大流失量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)	干滩宽度平均 缩短率/%	近岸补沙宽度 平均缩短率/%
方案 1	42	45	35	65	70	50
方案 2	42	45	35	65	70	50
方案 3	30	28	22	40	40	35
方案 3 对比方案 1、2 的增减	-12	-17	-13	-25	-30	-15

表 3 岸滩整体流失情况对比
Tab. 3 Comparison of sandy beach erosion situations

方案	试验补 沙量/ 万 m^3	3 a 流 失量/ 万 m^3	3 a 流失率/ %	5 a 流失量/ 万 m^3	5 a 流失率/%			按 50%流失率 计算重补周期/ a
					沿岸输沙 流失率/%	往外海 流失率/%	合计	
方案 1	20	8	40	12.0	36.0	24.0	60	4
方案 2	20	8	40	12.0	36.0	24.0	60	4
方案 3	20	5	25	7.3	29.5	7.5	37	8
方案 3 对比方案 1、2 的增减	0	-3	-15	-4.7	-6.5	-16.5	-23	4

根据模拟结果可得出: 1) 方案 1(干滩补沙+近岸补沙)补沙后, 在波流作用下发生自西向东沿岸净输沙, 前 2 a 西侧干滩发生较快流失, 东侧干滩流失较缓慢, 主要是得到西侧冲刷带来的沙子补充。第 3~5 年, 西侧干滩流失速度减缓, 原因是得到近岸补沙的补给, 而东侧岸滩因来沙不足导致干滩冲刷加快。3 a 后, 干滩面宽度缩短 30%~60%, 近岸补沙宽度缩短 20%~50%, 单宽最大流失量达 $42 \text{ m}^3/\text{m}$, 3 a 流失量约 8 万 m^3 , 3 a 流失率为 40%。5 a 后, 整段岸滩冲刷显著, 干滩面宽度缩短 50%~90%, 近岸补沙宽度缩短 35%~65%, 单宽最大流失量达 $65 \text{ m}^3/\text{m}$, 5 a 流失量达 12 万 m^3 , 5 a 流失率为 60%, 其中约 60%的沙子堆积在岸滩东侧, 约 40%的沙子向外海流失。在一次台风模拟 50 a 一遇大浪作用下, 后方沙坝发生塌落, 沙滩冲刷显著, 流失量达 4 万 m^3 , 其中约 50%的沙子沿岸输沙至东侧, 约 50%的沙子往外海流失, 可见缺乏护岸防护时, 岸滩侵蚀将会更严重。经计算, 平均年流失量 2.4 万 m^3 , 流失率达 50%时重补周期约 4 a。相比于现状岸滩年流失量 2 万 m^3

更多, 原因是补沙后可供冲刷的沙子数量增多, 不仅沿岸输沙增多, 而且往外海流失的沙子更多, 而流失的沙子又无法回到近岸补沙区域, 近岸补沙得不到沙子补充, 也无法持续补给干滩, 导致干滩和近岸补沙无法循环, 流失情况并未得到改善。

2) 方案 2(生态护岸+干滩补沙+近岸补沙)实施护岸后, 5 a 内岸滩形态变化以及流失规律与方案 1 几乎相同, 5 a 流失量 12 万 m^3 , 5 a 流失率为 60%, 重补周期约 4 a。在一次台风模拟 50 a 一遇大浪作用下, 后方沙坝并未发生塌落, 原因是护岸能够抵御了大浪侵蚀。5 a 内方案 2 与 1 的流失情况几乎一致, 原因是护岸仅对后方沙坝进行防护, 5 a 内还未侵蚀到后方沙坝位置, 岸滩流失的沙子基本是补沙的沙子。可以预见, 5 a 后若不及时补沙, 没有护岸防护的岸滩将因后方沙坝被淘刷而流失更多的沙子, 然后与现状岸滩流失情况趋于一致; 而有护岸防护的岸滩, 将会避免后方沙坝被淘刷, 阻止岸线持续蚀退。

3) 方案 3(生态护岸+干滩补沙+近岸补沙+水

下拦沙坝)增加水下拦沙坝后,在高潮时水下拦沙坝顶部过水较顺畅,削弱波浪作用较弱;在低潮时拦沙坝削弱波浪作用较强,明显减少沙子流失;总的沿岸输沙率有所降低,沙子流失量呈现逐年减少的规律。3 a 后,干滩面宽度缩短 20%~35%,近岸补沙宽度缩短 15%~30%,单宽最大流失量达 $30 \text{ m}^3/\text{m}$, 3 a 流失量 5 万 m^3 , 3 a 流失率为 25%; 5 a 后,干滩面宽度缩短 30%~50%,近岸补沙宽度缩短 25%~45%,单宽最大流失量达 $40 \text{ m}^3/\text{m}$, 5 a 流失量 7.3 万 m^3 , 5 a 流失率为 37%,其中约 80%的沙子堆积在岸滩东侧,约 20%的沙子向外海流失;预计 8 a 后流失量达 10 万 m^3 ,流失率 50%时重补周期约 8 a。在一次 10 a 一遇大浪作用下,沙子流失量约 1.5 万 m^3 ,大多数沙子在水下拦沙坝内侧堆积,仅有少量沙子越过拦沙坝往外海流失,足以说明水下拦沙坝具有很好的拦沙效果。相比于方案 1 和 2,方案 3 的 5 a 流失率降低了 23%,重补周期延长 1 倍,原因是水下拦沙坝减弱波浪作用,沿岸输沙速度有所降低,而且拦沙坝有效阻挡沙子往外海流失,使得更多的沙子堆积在近岸补沙区域内,使得近岸补沙的沙子更多,也能更好地补给干滩,形成干滩和近岸补沙的循环。

物理模型试验模拟了工程岸滩的整体冲淤变化情况,但试验并未很好模拟生态护岸和水下拦沙坝结构的单体情况,建议未来工程实施前对生态护岸及水下拦沙坝进行断面模型试验,尤其研究在台风大浪情况下的稳定性及响应。另外,工程实施后需要对护岸上植被和沙滩冲淤情况进行定期跟踪监测和维护。

4 结论

1) 干滩补沙前期流失速度快,但近岸补沙陆续补给干滩,延缓了干滩的流失速度,但流失的沙子并未补充近岸,无法形成干滩补沙-近岸补沙

的良性循环,从而无法改善岸滩整体流失。而增设水下拦沙坝后,不仅具有消浪作用,使得沿岸输沙速度降低,而且显著阻挡沙子往外海流失,使得近岸得到沙子补充,促成干滩补沙-近岸补沙的良性循环,从而降低流失率,延长重补周期。生态护岸能够稳固后方沙坝、抵御大浪淘刷、防止岸线蚀退,避免岸滩侵蚀程度扩大化,为干滩补沙提供坚实边界,间接促进干滩补沙-近岸补沙的良性循环,具有增强防灾韧性、优化生态功能、提升景观价值等多重效益。

2) 本文创新性地建立“生态护岸(固岸稳坡)-干滩补沙(改善面貌)-近岸补沙(补给沙滩)-水下拦沙坝(消浪拦沙)”四位一体的岸滩生态防护模式。该模式实现了岸滩形态稳定、5 a 流失率降低 23%以及重补周期延长近 1 倍的效果,为类似砂质岸滩的生态修复与防护工程提供了新的思路和方向。

3) 生态护岸采用新颖的聚氨酯碎石结构,水下拦沙坝采用新型的抗浪管袋结构。然而,整体物理模型试验尚未很好地模拟这两种结构在大浪条件下的稳定性和响应情况。未来将通过断面模型试验进一步探究其抗浪性能,以期优化结构设计,提升其在复杂海洋动力条件下的防护效能。

参考文献:

- [1] 国家海洋局第三海洋研究所. 我国近海海洋综合调查与评价专项成果: 海岸侵蚀现状评价与防治技术研究总报告[R]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2010.
Third Institute of Oceanography State Oceanic Administration. Summary report on current status assessment and prevention and control technology research of coastal erosion in the special project of comprehensive survey and assessment of China's offshore marine environment [R]. Xiamen: Third Institute of Oceanography State Oceanic Administration, 2010.
- [2] 季小梅, 张永战, 朱大奎. 人工海滩研究进展[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(7): 21-25.

- JI X M, ZHANG Y Z, ZHU D K. Research development of artificial beach[J]. Marine geology frontiers, 2006, 22(7): 21-25.
- [3] 戚洪帅, 刘根, 蔡锋, 等. 海滩修复养护技术发展趋势与前景[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(1): 111-125.
- QIH S, LIU G, CAI F, et al. Development trend and prospect of beach nourishment technology [J]. Journal of applied oceanography, 2021, 40(1): 111-125.
- [4] 孙波, 孙林云, 陈雄波, 等. 人工育滩的近岸补沙方法[C]//左其华. 第十二届中国海岸工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2005: 517-520.
- SUN B, SUN L Y, CHEN X B, et al. Nearshore sand replenishment method for artificial beach nourishment [C]//ZUO Q H. Proceedings of the 12th China Coastal Engineering Symposium. Beijing: China Ocean Press, 2005: 517-520.
- [5] 王海燕, 庄振业, 曹立华, 等. 荷兰诺德维克水下抛沙修复海滩及其意义[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(11): 66-73.
- WANG H Y, ZHUANG Z Y, CAO L H, et al. Significance of shoreface nourishment to coastal conservation in Noordwijk, The Netherlands[J]. Marine geology frontiers, 2019, 35(11): 66-73.
- [6] 刘大为, 王铭晗, 宫晓健, 等. 荷兰人工育滩工程 Sand Motor 的经验与启示[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(6): 61-65.
- LIU D W, WANG M H, GONG X J, et al. Experience and enlightenment of Sand Motor, an innovative beach nourishment in Netherlands [J]. Ocean development and management, 2017, 34(6): 61-65.
- [7] 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.
- 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.
- [8] 黄哲, 琚烈红, 冯卫兵. 波浪作用下人工沙滩剖面横向输沙试验研究[J]. 水运工程, 2018(3): 28-34.
- HUANG Z, JU L H, FENG W B. Experimental study on transverse sediment transport of artificial beach profile caused by waves [J]. Port & waterway engineering, 2018(3): 28-34.
- [9] 谭忠华, 刘海成, 陈汉宝, 等. 人工沙滩在堤后次生波作用下的稳定性试验[J]. 水运工程, 2019(1): 35-41.
- TAN Z H, LIU H C, CHEN H B, et al. Stability experiment under secondary wave over breakwater of artificial beach[J]. Port & waterway engineering, 2019(1): 35-41.
- [10] 解鸣晓, 杨华, 李孟国, 等. 港口岸线环境补偿人工沙滩工程理论与实践[J]. 水运工程, 2018(4): 26-32.
- XIE M X, YANG H, LI M G, et al. Theory and application of environmental compensation artificial beach constructed at coastal harbor shoreline[J]. Port & waterway engineering, 2018(4): 26-32.
- [11] 郑金海, 张弛. 海滩养护动力地貌基础理论与关键技术研究述评[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(4): 791-796.
- ZHENG J H, ZHANG C. Fundamental theory and key technologies of beach nourishment morphodynamics: an overview of recent research advances[J]. Oceanologia et limnologia Sinica, 2022, 53(4): 791-796.
- [12] 邵超, 唐迎迎, 孙伟, 等. 我国海滩养护效果评价的现状分析与应用展望[J]. 海岸工程, 2023, 42(1): 75-87.
- SHAO C, TANG Y Y, SUN W, et al. Current situation and application prospect of beach nourishment evaluation in China[J]. Coastal engineering, 2023, 42(1): 75-87.
- [13] 朱君, 蔡锋, 刘建辉, 等. 海滩养护修复过程中拦沙堤的应用[J]. 海洋工程, 2021, 39(6): 152-165.
- ZHU J, CAI F, LIU J H, et al. Application of groin system in beach nourishment[J]. The ocean engineering, 2021, 39(6): 152-165.
- [14] 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.
- CAI F, LIU G. Beach nourishment development and technological innovations in China: an overview [J]. Journal of applied oceanography, 2019, 38(4): 452-463.
- [15] 莫文渊, 纪桂红, 谢琳, 等. 三亚三美湾和鹿回头湾人工沙滩设计[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(3): 34-37.

- MO W Y, JI G H, XIE L, et al. Artificial sand beaches design in Sanmei Bay and Luhuitou Bay, Sanya [J]. *Marine geology frontiers*, 2014, 30(3): 34-37.
- [16] 魏伟, 张一康, 张忠起, 等. 借用自然力量应对极端风暴的韧性设计: 珠海香炉湾沙滩景观带 [J]. *风景园林*, 2020, 27(12): 80-84.
- WEI W, ZHANG Y K, ZHANG Z Q, et al. Resilient design by natural methods in response to extreme storms: the landscape belt of Xianglu Bay Beach in Zhuhai [J]. *Landscape architecture*, 2020, 27(12): 80-84.
- [17] 赵绍华, 戚洪帅, 蔡锋, 等. 厦门海滩生态保护修复工程实践回顾与展望 [J]. *应用海洋学学报*, 2024, 43(4): 677-689.
- ZHAO S H, QI H S, CAI F, et al. Reviews and prospects of beach ecological protection and nourishments in Xiamen [J]. *Journal of applied oceanography*, 2024, 43(4): 677-689.
- [18] 周剑, 李培良, 谭凤, 等. 土福湾赤岭岸线沙滩修复技术探讨 [J]. *水运工程*, 2022(S1): 1-7.
- ZHOU J, LI P L, TAN F, et al. Discussion on restoration technology of Chiling Beach of Tufu Bay [J]. *Port & waterway engineering*, 2022(S1): 1-7.
- [19] 庄振业, 曹立华, 李兵, 等. 我国海滩养护现状 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(3): 133-139.
- ZHUANG Z Y, CAO L H, LI B, et al. Current status of beach nourishment in China [J]. *Marine geology & quaternary geology*, 2011, 31(3): 133-139.
- [20] 戚洪帅, 曾舒婷, 陈敏, 等. 海滩养护对海滩生态系统的多尺度影响述评 [J]. *海洋学报*, 2024, 46(1): 12-26.
- QI H S, ZENG S T, CHEN M, et al. Multi-scale impacts on beach ecosystem of beach nourishment: a review [J]. *Acta oceanologica Sinica*, 2024, 46(1): 12-26.
- [21] 石海莹, 陈周, 吕宇波. 亚龙湾砂质海岸侵蚀监测和评价 [J]. *海洋开发与管理*, 2021, 38(12): 80-84.
- SHI H Y, CHEN Z, LYU Y B. Monitoring and evaluation of coastal erosion of sandy beach in Yalong Bay [J]. *Marine development and management*, 2021, 38(12): 80-84.
- [22] 李泽龙, 孙林云, 唐磊, 等. 河口海岸保滩促淤方式及水沙机理研究综述 [J]. *中国港湾建设*, 2018, 38(11): 1-8.
- LI Z L, SUN L Y, TANG L, et al. Review on beach protection and deposition promotion and water and sediment transport mechanism in estuaries and coastal area [J]. *China harbour engineering*, 2018, 38(11): 1-8.
- [23] 海滩养护与修复技术指南: HY/T 255—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Technical guide for beach nourishment and restoration: HY/T 255-2018 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2018.
- [24] 港口与航道水文规范: JTS 145—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2015.
- Code of hydrology for harbour and waterway: JTS145-2015 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [25] 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2018.
- Code of design for breakwaters and revetments: JTS 154-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [26] DIDIER D, BERNATCHEZ B, BOUCHER-BROSSARD G, et al. Coastal flood assessment based on field debris measurements and wave runup empirical model [J]. *Journal of marine science and engineering*, 2015, 3(3): 560-590.
- [27] 王艳红. 亚龙湾西段人工补沙工程项目动力泥沙分析与工程方案物理模型试验研究 [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2019.
- WANG Y H. Dynamic sediment analysis and physical model test research on engineering scheme of artificial sand nourishment project in the western section of Yalong Bay [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2019.

(本文编辑 王璁)