

基于人工生态构筑物的海岸侵蚀防护研究

聂间间

(灌云县国家海域使用动态监管中心, 江苏 连云港 222200)

摘要 本文围绕人工生态构筑物在海岸侵蚀防护中的技术应用展开系统研究。通过分析海岸侵蚀机理、波浪动力学、沉积物运动规律及多源环境数据, 提出了一套涵盖材料选择、结构设计、功能化构件及智能监测的防护技术方案。研究重点包括高性能混凝土与复合材料耐久性设计、人工根系结构及孔隙材料增强沉积物固定的构件布局优化、波浪消能与流体动力模拟技术及基于传感器的实时监测与数据反馈机制, 以期为海岸防护工程的数字化、智能化提供可参考的技术路径。

关键词 人工生态构筑物; 海岸侵蚀; 高性能混凝土; 结构布局; 智能监测

中图分类号: TV8

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.037

0 引言

海岸侵蚀威胁生态安全与人类活动, 传统刚性防护破坏自然平衡。本研究聚焦人工生态构筑物, 通过模拟自然形态(如生态堤、人工礁), 探索其减缓波浪能、促进泥沙淤积的机制。结合材料力学与生态工程, 评估不同设计参数对防护效能及生物多样性的影响, 为可持续海岸管理提供科学依据。

1 海岸侵蚀机理与影响因素分析

海岸侵蚀是风浪作用、潮汐运动、潮流剪切应力和沉积物输运共同作用产生的结果, 1~3 m浪高情形下, 波浪冲击力可达到10~50 kPa/m², 对裸露岸坡产生明显剪切应力, 引发坡面泥沙位移及微结构破坏^[1]。潮汐涨落致使岸坡泥沙含水率周期性变动, 增加表层土体不稳定性, 特别是在砂质土层(厚度2~5 m)上体现得显著, 而下伏黏土层(厚0.5~1 m)可形成滑动面, 影响局部侵蚀模式, 流体动力模拟结果显示, 如果沿岸流速超出0.8~1.2 m/s, 细粒沙(粒径0.1~0.5 mm)容易被带走, 导致岸线往后退0.5~1.0 m/年。

在工程应用中, 影响侵蚀速度的因素要进行量化

解析, 凭借历史潮位记录、风速(平均8~12 m/s)、浪高及潮流观测数据, 可构建动力侵蚀模型, 针对波浪冲击压力、沿岸流速分布及沉积物输运路径开展数值模拟(网格尺寸0.05~0.1 m), 时间步长0.01 s。岸段地形、坡角还有地质结构信息(如砂质土层厚度、黏土层厚度及海床起伏情况)被放进模型边界条件中, 实现对局部侵蚀力学特性的精准核算, 为人工生态构筑物选类型、孔隙率设计及布置间距提供具体技术参数, 保证防护设计可量化、可操作。

2 人工生态构筑物类型与作用机制

2.1 类型分类

人工生态构筑物可依照功能和结构特性分成生态堤、人工礁、复合防护结构及孔隙构件四类, 见表1。生态堤用高性能混凝土或者混凝土复合材料, 截面宽度2~4 m, 高度1.5~3 m, 通过整体堤体吸纳与分散波浪能量, 同时可嵌入孔隙或者凹槽来增强沉积物固定能力; 人工礁由单个0.5~2 t的混凝土或者复合材料模块构成, 布置间隔2~5 m, 表面做粗糙化处理(摩擦系数≥0.6), 波浪冲击下形成局部能量耗散区; 复

表1 构件类型及主要参数

构件类型	材料	截面/单体尺寸	孔隙率	功能
生态堤	高性能混凝土	宽2~4 m, 高1.5~3 m	5~20 cm孔径, 可嵌孔	波浪能耗分散、沉积物固定
人工礁	混凝土/复合材料	单体0.5~2 t	表面粗糙化摩擦系数≥0.6	局部波浪消能、能量耗散区
复合防护结构	混凝土+孔隙构件	模块化组合	30%~40%	波浪消能+沉积物固定
孔隙构件	复合材料/混凝土	孔径5~20 cm	30%~40%	水流分散、涡流形成、沉积物稳定

合防护结构连混凝土护坡和嵌套孔隙构件，可实现波浪消能和沉积物固定的功能；孔隙构件孔径 5~20 cm，占总体积 30%~40%，通过把控孔隙率和布置密度，实现水流散开、局部漩涡生成及沙粒稳固，为沿岸防护提供模块化、可量化设计方案^[2]。

2.2 作用机理

人工生态构筑物主要凭借结构形态、孔隙设计及材料特性调节波浪动能与沉积物输运过程，波浪在构件表面反射和渗透可降低冲击能量 30%~60%，孔隙构件中形成涡流，局部耗能效率提高 20%~40%，大幅减慢沙粒移动速度大概 40%~50%；复合构件通过孔隙或者人工根系样子的机械固定点，把细粒沉积物限定在构件周边 1~2 m 范围内，增加局部岸坡稳定性；结构布局结合三维流体动力学模拟 (CFD，网格尺寸 0.05~0.1 m，时间步长 0.01 s)，可精准算出波峰压力分布、流速矢量及局部沉积物输运路径，为防护结构优化设计和构件间距调整提供科学依据，同时保证整体稳定性系数 ≥ 1.5，极端风暴潮状况下仍可维持防护作用。

3 人工生态构筑物设计原则

人工生态构筑物设计要兼顾结构力学性能、耐久性、波浪消能及沉积物控制能力，同时确保施工和维护具备可操作性。在材料选择方面，构件适合用高性能混凝土 (C50~C60) 或者复合材料，抗压强度 ≥ 50 MPa，抗折强度 ≥ 8 MPa，耐腐蚀性要确保在海水浸泡环境中 ≥ 10 年，同时针对潮汐和盐雾环境做加速老化实验验证；结构布局设计要依据 CFD 三维流体动力学模拟 (网格尺寸 0.05~0.1 m)，时间步长 0.01 s，剖析波浪冲击压力分布、局部涡流及沉积物输运路径，确保波浪能耗 ≥ 40%，沉积物移动速度下降 30%~50%，整体稳定性系数 ≥ 1.5；构件间距、堤高和坡度要结合极端风暴潮条件 (浪高 H_{max}=3.5 m，周期 T=8~10 s) 优化，与此同时采用模块化设计 (单体重量 0.5~2 t)，利于吊装布置和后期维护；构件表面可借粗糙化或者孔隙设计提高局部摩擦系数 ≥ 0.6，增沉积物固定和局部消能效率，实现工程化防护结构长期可靠运作及数字化管理支撑。

4 基于人工生态构建物的海岸侵蚀防护关键技术

4.1 材料选择与耐久性分析

材料挑选是人工生态构筑物防护性能的关键，高性能混凝土 (C50/C60) 适合用粉煤灰掺量 20%~30%、矿粉掺量 15%，水胶比把控在 0.35~0.40，添加聚羧酸减水剂把坍落度调至 180~220 mm，保证浇筑密实度；混凝土配合比要经过海水浸泡耐久性试验，涵盖氯离子

渗透 (30%~35% 盐度、温度 5~30 °C) 及冻融循环 (50 次)，保证抵抗氯离子侵蚀 10~15 年。在复合材料方面，玻纤增强聚合物和矿物填料混合制板材或模块体，抗拉强度 ≥ 200 MPa，密度 1.8~2.0 g/cm³，经拉伸和弯曲疲劳试验验证长期承载能力；孔隙率能调至 30%~40%，增强沉积物固定和水流渗透性^[3]。

耐蚀金属多用于关键受力地方，比如镍铬合金钢板厚度是 5~10 mm，经盐雾试验 (周期 500 h) 及电化学腐蚀测试，寿命设计 ≥ 20 年；所有金属构件表面要采用热喷涂或者阴极保护处理，保证长期耐海水侵蚀。生态功能复合材料在孔隙内部留出机械固定点，用钢筋或者复合杆件加固，孔径把控在 5~20 cm，保证沉积物能在构件中形成稳固锁定位置。

材料选型要结合施工和维护要求制订详细操作规范，包含浇筑温度控制在 5~35 °C 区间、复合材料层间固化时间 24~48 小时、金属构件安装前做表面粗糙化处理 (Ra ≥ 0.8 μm)，且配套运用模板或模块化安装方式确保精度 ± 5 mm。所有材料需形成数据库记录，涵盖批次号、抗压抗折强度、密度、孔隙率及耐腐蚀实验结果，为后期施工监控及数字化管理提供基础数据。

4.2 结构布局与波浪力学分析

人工生态构筑物结构布局要基于精准波浪力学及沉积物输运模拟来建立：

首先，运用 CFD 三维流体动力学软件搭建沿岸防护段数字模型，网格尺寸把控在 0.05~0.1 m，时间步长 0.01 s，输入历史潮位、波高 (H = 0.5~3.5 m)、波周期 (T=4~10 s)、沿岸流速及海床形态数据，算出不同堤段和构件布置情况下的波峰压力、流速矢量及局部涡流特性。模型中堤坡角度设成 1:2 至 1:3，堤顶宽度 2~4 m，孔隙构件间隔 2~5 m，且能调节孔隙率 30%~40% 及孔径 5~20 cm，满足水流散开与能量消耗的技术需求。

其次，在施工布置阶段，每个模块化构件 (重量 0.5~2 t) 要依照 CFD 模拟优化结果来编号与定位，堤段之间用插销或者预制互锁接口，保证整体稳定性系数 ≥ 1.5；布置精度把控在 ± 5 cm，坡度与间距偏差允许范围 ± 2 cm。在施工过程中，要详细记好吊装顺序、模块方向和间距，在关键堤段布设激光扫描标记或者辅助测量标尺，实现施工布置和模拟设计的一致性，为后续结构监测及维护提供数据根基。

再次，布局优化需要结合沉积物输运控制，通过模拟解析孔隙中流速和涡流路径，把局部流速控制在 0.3~0.5 m/s 区间，让沉积物在孔隙周围 1~2 m 范围内能够被机械固定住，依据模拟结果调节模块倾角、间距和孔隙排列方向，并创建施工操作手册，明确每

个模块的孔隙朝向、模块间锁定办法及堤段布置次序，实现结构和流体动力学协同设计。

最后，施工前能做小型物理模型实验或者数值敏感性分析，验证堤段布设对波浪冲击和沉积物流动的反应，能凭借可调节孔隙模块、各异堤坡角度及模块间距，对比波浪能耗和局部流速场分布，生成施工优化参数表，为大规模布设供应可靠技术参照。同时，施工操作手册要涵盖模块编号、布置精度、安装顺序及锁定方法的详细要求，保证施工和设计模拟高度相符。

4.3 功能化生态构件技术

功能化生态部件通过结构设计实现沉积物固定及波浪减能的复合功能。

首先，构件孔隙率设计处在30%~40%范围，孔径5~20 cm，孔隙中预留钢筋或者玻纤复合杆件嵌入点，间距0.2~0.5 m，用以机械固定沉积物。构件表面要做粗糙化处理（摩擦系数 ≥ 0.6 ），经三维CFD流体动力学模拟来验证孔隙内涡流形成及边界层流速分布，确定孔隙方向和排列方式，每个构件都要编号，施工按设计编号装，记孔隙率和杆件位置，保证构件内部结构一致。

其次，构件布置要依照岸段地形、波向及流速做三维优化，功能化构件布置可和人工鱼礁模块协同，利用孔隙方向和模块间距优化涡流路径，利用数字化管理平台监测鱼礁生态功能，实现防护与生态双重目标，通过CFD软件仿真不同模块组合方案，剖析波峰压力、局部涡流及沉积物输运路径，凭借调整孔隙方向、模块间距和倾斜角度实现涡流稳定^[4]。在施工中，每个模块通过吊装或者滑移来安装，孔隙孔径和间距偏差控制在 ± 2 cm以内，模块倾角偏差 ≤ 3 度，堤段交接处用互锁接口或者横向连接件，为确保整体稳定性，施工记录要归入数字化管理系统，包含模块编号、孔隙率、杆件位置及倾角信息。

再次，功能化构件施工要结合后期维护和监测要求，孔隙中机械固定点、人工根系构造及模块编号形成详细施工图纸和数据库，利于往后拆装或者替换，施工完成后，可借激光扫描或者三维摄影测量记下孔隙分布、杆件位置及表面粗糙度，数据放进管理平台，实现构件状态和流场参数的数字化对照。

最后，标准化施工手册包含模块吊装顺序、孔隙布置精度、杆件安装间距和倾角要求，施工操作联合CFD模拟成果与现场测量数据，可对模块间互锁成效、孔隙朝向及局部流速场做调整，手册中还要明确施工前后数字化验证流程，为智能监测系统安装、维护及后续构件替换提供技术根据，保证功能化构件结构及沉积物固定功能可操作、可重复去做。

4.4 智能监测与维护技术

智能监测系统通过多源传感器实时收集结构应力、位移、沉积物厚度和水位数据，光纤应变计布置在关键受力构件，精度 $\pm 5 \mu\epsilon$ ，可监测瞬间应变改变；水位计精度 ± 1 cm，流速传感器精度 ± 0.02 m/s，沉积物厚度探测仪精准度 ± 1 cm，经无线网络按1 Hz采样频率上传到中央监控系统，实现实时数据收集^[5]。传感器布置要依照网格化准则，关键堤段每隔5 m布置一组，保证局部波浪力和沉积物变化数据涵盖全面。

数据处理用自动化分析算法，包含波浪力计算、局部涡流识别及沉积物厚度变化量化，可在后台生成二维或者三维可视化流场模型，系统为异常数据设阈值（如应变超 $500 \mu\epsilon$ 、水位波动 > 0.5 m或者沉积物厚度变化 > 10 cm），通过预警模块引发报警，还会自动记下事件时间、地点及传感器状态。

维护操作要结合监测数据建标准化流程，构件如果出现应力超限或者孔隙堵塞，可依照编号顺序开展局部替换或者清理，吊装精准度 ± 5 cm；传感器出故障时可靠冗余传感器覆盖，保持数据连续性；全部监测数据、维护记录和构件状态要一同存进数字化管理平台，实现长期结构健康监测和维护计划的闭环管理。

5 结束语

本文围绕人工生态构筑物的海岸侵蚀防护技术进行系统剖析，提出材料挑选、结构安排、功能化部件及智能监测的技术实现途径，通过高性能混凝土、复合材料和耐腐蚀金属构件优化、波浪力学模拟指引的结构布局，以及孔隙构件和人工根系功能化设计，实现沉积物固定和能量消散协同效应，辅助传感器数据监测，为海岸防护工程提供可量化、可操作的技术方案。未来可结合数字孪生技术再优化防护布局，实现全生命周期管理。

参考文献：

- [1] 王庆,朱君,战超.海岸侵蚀与防护技术研究进展[J].海岸工程,2022,41(04):301-312.
- [2] 刘蓉.框架式人工鱼礁在海岸带生态保护修复中的应用[J].水利规划与设计,2025(05):156-160.
- [3] 李相逸,刘育辰,赵九州,等.深圳西部海岸带生态保护和修复策略研究[J].住区,2024(01):100-109.
- [4] 李杨帆,向枝远,杨奕,等.基于韧性理念的海岸带生态修复规划方法及应用[J].自然资源学报,2020,35(01):130-140.
- [5] 陈君,林祥.江苏海岸侵蚀及其防护工程研究进展[J].水利水电科技进展,2024,44(05):1-6,31.