

· 西部陆海新通道——平陆运河工程建设专栏(14) ·



平陆运河生态航道新型消波 结构消浪特性分析*

陆远文¹, 刘晓慧², 葛洪丽^{2,3}, 梁丙臣^{2,4}, 尤再进³

- (1. 广西交通设计集团有限公司, 广西南宁 530029; 2. 中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266100;
3. 大连海事大学, 港口与航运安全协同创新中心, 辽宁大连 116026;
4. 海岸与近海工程国家重点实验室, 山东青岛 266100)

摘要: 针对平陆运河项目运营期间船行波对周边红树林湿地的影响, 设计了一种兼具优良消波效果和强环境适应性的新型消波浮式结构。为探究其消浪特性, 采用 FLOW-3D 三维数值模拟与物理模型现场试验相结合的方法, 量化了新型消波结构对典型船行波的波高衰减效果, 同时探究了水深、相对入水深度和结构与红树林间的最小缓冲距离对消浪效果的影响。研究表明: 在多种相对入水深度和水深变化下, 新型消波结构波高衰减率稳定维持在 55%~75%; 且该结构在距离红树林的不同位置上均能保持 55% 以上的波高衰减率; 经数值模拟与物理模型试验验证, 新型消波结构在内陆运河中兼具优良消浪能力与高稳定性, 为缓解船行波对平陆运河沿岸红树林湿地的侵蚀提供了有效工程解决方案, 对保障运河可持续运营与两岸生态安全具有重要意义。

关键词: 平陆运河; 浮式防波堤; 船行波; 消波结构; 波高衰减率; 数值模拟; 物理模型试验

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0016-07

Wave attenuation analysis of a novel wave-dissipating structure for ecological waterway in Pinglu Canal

LU Yuanwen¹, LIU Xiaohui², GE Hongli^{2,3}, LIANG Bingchen^{2,4}, YOU Zaijin³

(1. Guangxi Traffic Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, China;

2. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3. Collaborative Innovation Center for Port and Shipping Safety, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

4. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Qingdao 266100, China)

Abstract: To address the impact of ship-induced waves on surrounding mangrove wetlands during the operation of the Pinglu Canal project, a novel wave-attenuating floating structure is designed, which combines excellent wave dissipation performance with strong environmental adaptability. To investigate its wave attenuation characteristics, a combined method of three-dimensional numerical simulation using FLOW-3D and in-situ physical model tests is employed. This method quantifies the structure's effectiveness in attenuating wave height for typical ship waves and explores the influences of water depth, relative submerged depth, and the minimum buffer distance between the structure and mangroves on the wave dissipation effect. The research results indicate that under various relative submerged depths and water depth variations, the novel wave attenuation structure maintains a stable wave height attenuation rate of 55%–75%. The structure consistently achieves a wave height

收稿日期: 2025-06-17 录用日期: 2025-07-31

*基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52401315); 广西科技重大专项(桂科 AA23062045); 中央高校基本科研业务费项目(3132023504)

作者简介: 陆远文(1978—), 男, 高级工程师, 从事水工结构设计工作。

通信作者: 葛洪丽(1994—), 女, 博士, 从事新型波导式海岸防护结构研发。E-mail:ouc_lxh0303@163.com

attenuation rate exceeding 55% at various positions relative to the mangrove fringe. Validated by both numerical simulations and physical model experiments, the designed novel wave attenuation structure demonstrates excellent wave dissipation capability and high stability within inland canals. It provides an effective engineering solution for mitigating the erosion of ship-induced waves on the mangrove wetlands along the Pinglu Canal banks, holding significant importance for ensuring the sustainable operation of the canal and the ecological security of its banks.

Keywords: Pinglu Canal; floating breakwater; ship-induced waves; wave attenuation structure; wave height attenuation rate; numerical simulation; physical model experiment

平陆运河作为西部陆海新通道的关键工程,其运营期船舶航行产生的船行波对沿岸红树林湿地生态系统造成严重影响。船行波的持续冲刷引发滩涂淤泥流失及红树林根部裸露,进而导致红树林倒伏死亡,解决运营期船行波对红树林湿地的这一破坏性影响成为亟待解决的关键问题^[1]。由于平陆运河入海口潮差大(平均潮差2~4 m,最大潮差超过6 m)^[2],固定式防波堤可能因水位剧烈变化导致防护效果不稳定,而浮式防波堤能随水位升降自动调整,始终维持对红树林的有效保护。因此,研发新型消波浮式结构对红树林保护具有重要工程价值。

现有浮式防波堤按结构形式与消波机理的差异,主要可分为箱式、水平板式、浮筒式、框架式及创新组合式五大类型。箱式防波堤通过浮箱反射与底部涡流耗散波能^[3],只有在 B/L (B 为结构宽度、 L 为波长) >0.35 时才能保证波高衰减率大于50%^[4]。Koutandos等^[5]研究并对比分析了矩形浮式防波堤在固定与可升降状态下的水动力特性,发现可升降结构的波浪消减效果显著优于固定式结构。然而,这类防波堤存在明显局限性:对长波($B/L < 0.15$)几乎无效,极端波浪下锚泊系统易受损,且大型浮箱可能阻碍水体交换。水平板式防波堤通过水平布置的板状结构实现波浪消减^[6],对规则波的波高衰减率可达50%~70%($B/L=0.4$ 时),对不规则波的有效波高消减率为40%~60%,且在 $0.8 < \omega/\omega_n < 1.2$ (ω 为波的频率, ω_n 为结构的固有频率)频带内效果最优^[7]。浮筒式防波堤通过多浮筒间隙湍流耗能,与箱式结构相比在相同材料用量下可获得更大的惯性矩,具有更好的稳定性^[8],但浮筒间距需要精确优化(过小会减弱湍流效应,过大则降低整体性),且该类

型防波堤在 $B/L < 0.2$ 的情况下,波高衰减率几乎为零^[9]。框架式防波堤利用孔隙涡流耗散与结构振动实现宽频消波^[10],在 $B/L=0.10\sim 0.25$ 时可实现35%~65%的波高衰减率,但连接节点易疲劳损坏、维护成本较高^[11]。

鉴于平陆运河航道宽度有限,宜采用宽度较小的防波堤进行布设。同时,考虑到船行波是影响沿岸红树林生态系统的主要扰动因素,所设计防波堤应具备靶向性强的消能机制,以实现对该类波动的高效削弱。近年创新组合式设计取得进展,如通过刚性平板与柔性网衣协同作用实现消浪的板-网复合结构^[12],结合振荡水柱的能量转换系统^[13]等。对平陆运河的通航环境特征分析可知,运营期内主要船型(以5 000 DWT散货船为代表)所产生的船行波波长稳定,约为7.48 m。经对现有各类浮式防波堤消波性能进行系统梳理发现,在应对此类典型船行波时,若要达到50%以上的波高衰减率,通常要求防波堤具备较大的结构宽度,难以满足平陆运河运营期对船行波防护的实际需求。因此,为了更有效地消减此类典型船行波,本文提出一种新型浮式消波结构,该结构集成了针对主频船行波的靶向消能机制与潮位自适应调节系统,并对其消浪性能进行深入研究。

1 数值模型建立

1.1 数值模型基本原理

FLOW-3D模型将波浪运动视为黏性不可压缩流体运动,为描述流体的质量守恒、动量守恒,控制方程采用连续性方程和黏性不可压缩流体运动的Navier-Stokes方程。对控制体的连续性方程和动量方程采用FAVOR(fraction area/volume obstacle representation,面积分数/面积分数占比表

示法)方法。计算表达式如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial(uA_x)}{\partial x} + \frac{\partial(vA_y)}{\partial y} + \frac{\partial(wA_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x & \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y & \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z & \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: u 、 v 、 w 分别对应 x 、 y 、 z 方向的运动速度分量; V_F 为流体体积分; A_x 、 A_y 、 A_z 分别为与 FLOW-3D 中 FAVOR 网格技术相关的 x 、 y 、 z 方向可流动的面积分数; ρ 为流体密度; G_x 、 G_y 、 G_z 为 x 、 y 、 z 方向的重力加速度; f_x 、 f_y 、 f_z 为 x 、 y 、 z 方向的黏滞力加速度。

湍流模型选用 RNG(renormalization group, 重整化群)模型, 紊动能与紊动能耗散率的计算表达式如下:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) = P_T + G_T + D_{k_T} - \varepsilon_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) = \frac{C_1 \varepsilon_T}{k_T} (P_T + C_3 G_T) + D_\varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (4)$$

式中: k_T 为紊动能; P_T 为紊动能产生项; G_T 为浮力产生项; D_{k_T} 为紊流扩散项; ε_T 为紊动能耗散项; C_1 、 C_2 、 C_3 为无量纲参数。

1.2 数值模型建立

本文采用 FLOW-3D 三维水动力模型, 数值水槽总长为 $8L$, 宽为 $2L+a$ (a 为新型消波结构的长度), 高为 $1.5h$ (h 为水深)。左、右两端分别设

有 $2L$ 的造波段和消波段, 工作段设置在水槽中央, 并将新型消波结构放置在工作段中心, 以尽量避免水槽两端波浪反射造成的影响。

新型消波浮式组合结构由长方体消波腔和弧形开孔板组组成。其中, 长方体消波腔是由开孔板构成的长方形箱体, 其上下和前后 4 个面均为矩形开孔板, 左右两个侧面为正方形开孔板; 弧形开孔板组由多个相同的弧形开孔板依次连接构成, 均匀设置在长方体消波腔外侧面(前面、后面、上面和下面), 每一面上的弧形开孔板紧密相接, 形成拱形凸起。新型消波浮式组合结构尺寸见图 1。多个组合结构通过正方形开孔板和弧形开孔板依次紧密连接形成新型消波浮式结构。

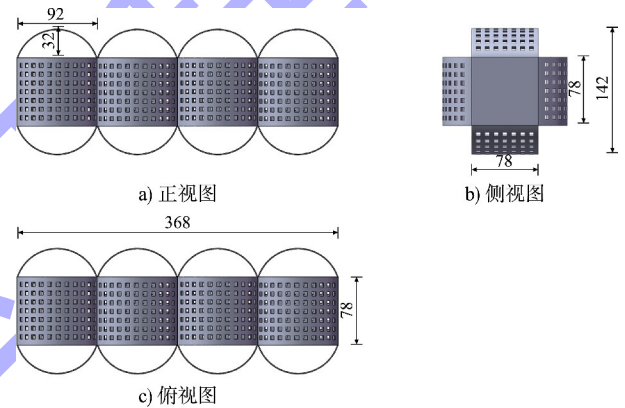


图 1 新型消波浮式组合结构尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of the novel composite wave-attenuating floating structure(unit:mm)

1.3 边界条件

数值水槽的网格边界条件设置: 起始端(入射边界)定义为波浪边界(wave), 采用垂向入射的规则波模拟船行波^[14], 设定线性波波高 H 为 0.011 2 m, 波周期 T 为 0.65 s; 出流端采用自由流出边界(outflow); 上部边界与底部边界分别设置为压力边界(specified pressure)和墙壁边界(wall); 侧壁边界采用对称边界(symmetry)。局部加密网格的所有边界均采用对称边界条件。模型初始时刻流速为 0 m/s, 初始压强场采用静水压力分布, 水面静止。

2 新型消波结构物理模型试验

2.1 试验模型及布置

物理模型试验在中国海洋大学山东省海洋工

程重点实验室波流水池中进行,新型消波结构模型的缩放比尺为 1:10,模型材料为 PVC。选取平陆运河入海口段石江墩下游顺直河段(桩号 K117+241—K117+441,长 200 m)作为研究对象,模型比尺为 1:10,在试验场地内精确还原了该航段的实际地形特征和结构布置,试验布置现场见图 2。试验采用经国家海事部门认证的 BG-8 型波浪传感器,配合 DS-30 型高精度数字采集系统及专用分析软件,实现水面波动参数的实时监测。数据记录时间步长设定为 0.01 s,每组试验重复 3 次取平均值。

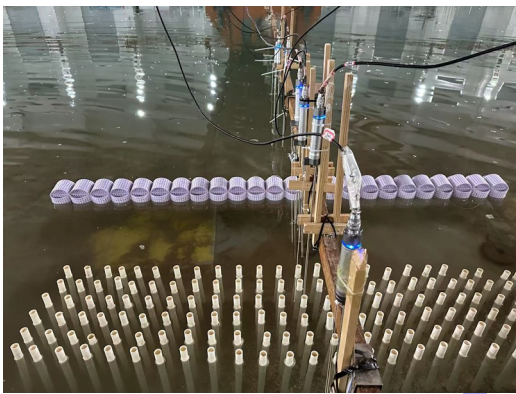


图 2 试验现场布置

Fig. 2 Layout of the test site

2.2 工况设计

为探究新型消波结构的消浪特性,在保证结构尺寸不变的前提下,试验采用了多种入水深度 d 、水深 h 以及布置位置来量化其对波高衰减率 $\Delta H/H$ 的影响。试验工况设计为: d 分别取 0.093、0.083、0.068、0.058 m; h 分别取 1.12、1.09、1.06、1.03 m; 位置为 1~3 号位,分别位于距红树林离岸侧 0.6、0.5、0.4 m 处。入水深度的改变通过在浮式结构上悬挂砝码实现,结构的入水深度从 0.093 m 降低至 0.058 m,分别对应 3 对 500 g 砝码(g3)、2 对 500 g 砝码(g2)、1 对 500 g 砝码(g1)、无砝码(g0)的情况。

3 结果与分析

3.1 相对入水深度对消浪性能的影响

相对入水深度(d/D)定义为新型消波结构入水深度 d 与结构高度 D 的比值,波高衰减率($\Delta H/H$)为结构前后波高差值与入射波高的比值。新型消

波结构在 3 号位不同水深条件下,波高衰减率随 d/D 的变化情况见图 3。

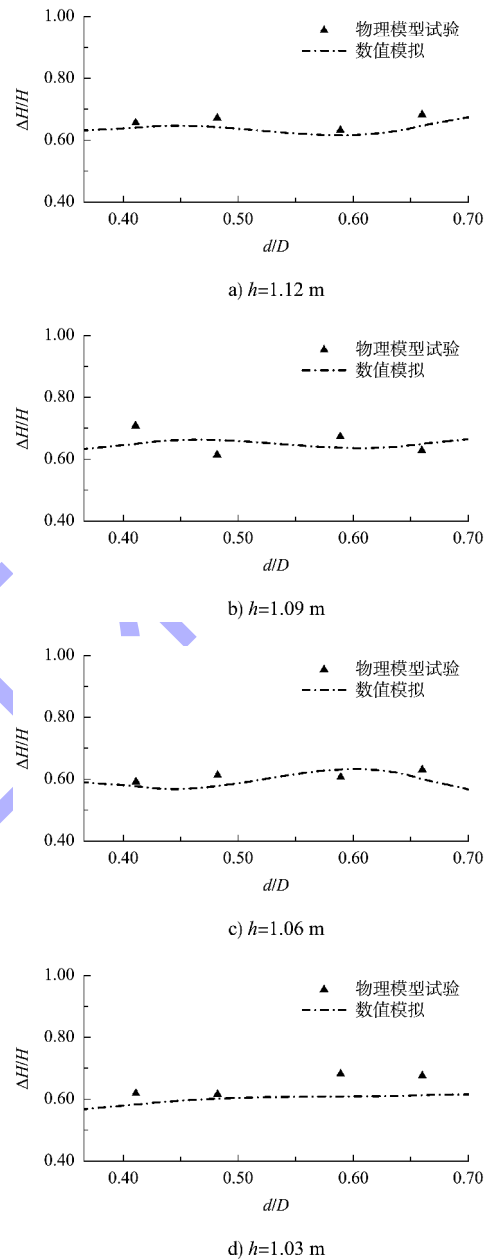


图 3 波高衰减率随 d/D 的变化(3 号位)

Fig. 3 Variation of wave height attenuation rate with d/D (Position 3)

水深为 1.12 m 时,波高衰减率在 0.63 上下浮动,且随着 d/D 从 0.35 增加至 0.70,波高衰减率没有明显的整体的上升和下降趋势,见图 3a)。整体曲线波动较小,表明该入水深度下消波结构的消浪性能稳定,同时物理试验与数值模拟结果吻合良好,使数据更具可靠性。水深为 1.09 m 时,波高衰减率稳定在 0.60~0.70,变化幅度依

然较小, 见图 3b)。整体变化趋势较为平缓, 波高衰减率依旧呈现稳定趋势, 数值模拟与试验数据一致, 进一步验证了该结构的消浪效果。水深为 1.06 m 时, 波高衰减率维持在 0.56~0.63, 整体波动较小, 虽然在 $d/D = 0.60$ 时有轻微波动, 但消浪性能依然稳定, 见图 3c)。水深为 1.03 m 时, 波高衰减率的变化范围为 0.55~0.65, 且变化幅度较小, 整体趋势平稳, 见图 3d)。数值模拟数据与试验数据的平均误差控制在 0.1 以内, 表明消波结构在较小水深条件下的消浪性能也能保持稳定。

3.2 红树林与新型消波结构的最小缓冲距离

红树林与新型消波结构的最小缓冲距离 X 为新型消波结构与红树林离岸侧之间的距离, 1~3 号位 X 分别为 60、50、40 cm, 对应实际尺度 6、5、4 m。其间距选取综合考虑以下因素: 一方面, 在试验尺度下, 岸坡坡顶面宽度为 1.5 m, 其中红树林区域的分布宽度为 90 cm, 红树林离岸侧与坡肩的直线距离为 60 cm, 鉴于浮式防波堤在船行波作用下会产生摆动, 若布置过于靠近红树林, 其最大位移可能对红树林根系造成机械性冲击; 另一方面, 受限于运河航道宽度, 若与红树林保持过大距离, 则会显著削减有效通航宽度, 进而影响船舶的安全通行。基于上述约束, 最小缓冲距离选取 40~60 cm。新型消波结构在水深为 1.12 m 时, 不同配重条件下, 波高衰减率随 X 的变化情况见图 4。

当结构上配备 3 对 500 g 砝码(g_3)时, 波高衰减率在距离红树林 30~70 cm 的范围内变化较小, 波动幅度较小, 波高衰减率保持在 0.60~0.70, 见图 4a)。无论是物理模型试验还是数值模拟, 波高衰减率的变化趋势较为一致, 表明当消波结构与红树林的距离较远时, 消浪效果稳定。在配备 2 对 500 g 砝码(g_2)时, 随着最小缓冲距离 X 增大波高衰减率的波动程度显著下降, 维持在 0.62 上下, 物理试验的波高衰减率结果在 X 超过 50 cm 后与模拟数据相比略有上升趋势, 见图 4b)。这表明在中等配重条件下, 消波结构的消浪性能对距离的变化并不敏感。配备 1 对 500 g 砝码(g_1)

的消波结构在相同的距离范围内, 波高衰减率的变化趋势与图 4a) 类似, 波高衰减率的变化略有增加, 为 0.55~0.70, 波高衰减率依然保持在较为稳定的范围内, 见图 4c)。当结构上无砝码(g_0)时, 波高衰减率在不同距离下保持相对稳定, 大致维持在 0.55~0.65, 波动幅度较小, 见图 4d)。模拟数据与物理试验数据符合良好, 这说明即使在没有额外配重的情况下, 消波结构依然能够提供稳定的消浪性能。

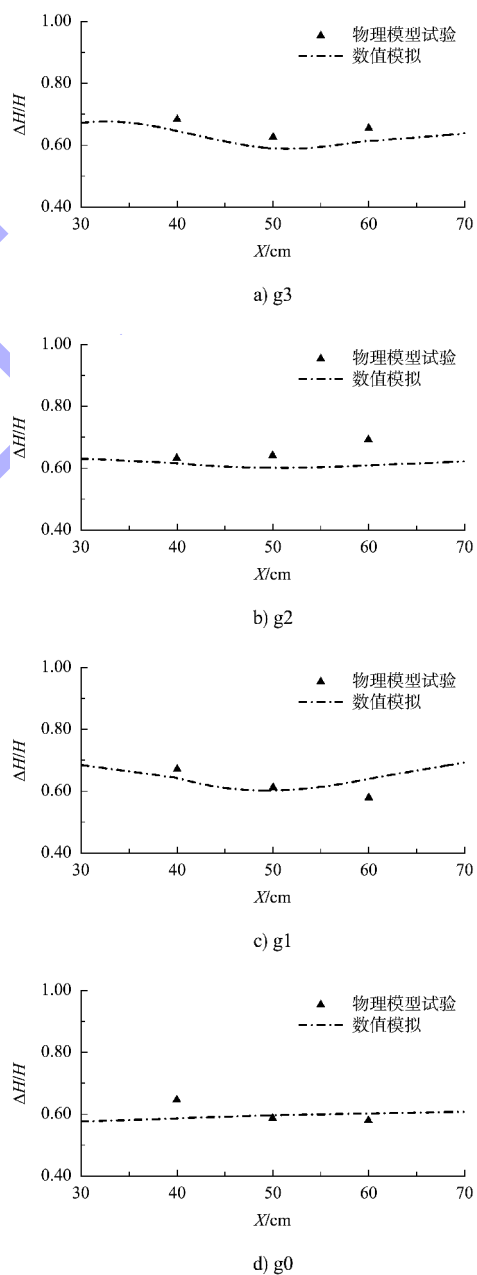


图 4 波高衰减率随 X 的变化 ($h = 1.12$ m)
 Fig. 4 Variation of wave height attenuation rate with X ($h = 1.12$ m)

3.3 水深对消浪性能的影响

新型消波结构在3号位不同配重条件下,波高衰减率随 h 的变化情况见图5。当结构配备3对500 g砝码(g3)时,波高衰减率在 h 从1.00 m到1.15 m变化过程中,波高衰减率大致维持在0.60~0.70,见图5a)。尽管波高衰减率略有波动,但整体保持稳定,表明配重较大的情况下,水深变化对消浪效果的影响较小,消波结构能够在该水深范围内稳定工作。在配备2对500 g砝码(g2)时,波高衰减率同样保持在0.60~0.70, h 的变化对波高衰减率的影响较小,见图5b)。尽管在某些水深条件下有轻微波动,但整体趋势较为平稳,显示出在此配重条件下, h 的变化对消波效果没有显著影响。配备1对500 g砝码(g1)时,波高衰减率的变化范围为0.55~0.70,虽然图5c)中波高衰减率的变化幅度与图5a)、b)相比略有增加,但整体波动仍在正常范围内,表明即使在较轻配重的条件下,消波结构依旧能够提供较为稳定的消浪效果。当没有配重(g0)时,波高衰减率大致维持在0.55~0.70,变化趋势与图5c)类似,随着水深的变化波动幅度较小,见图5d)。尽管没有配重,但整体仍保持平稳,表明即使在没有砝码的情况下,消波结构依然能维持一定的消浪效果。

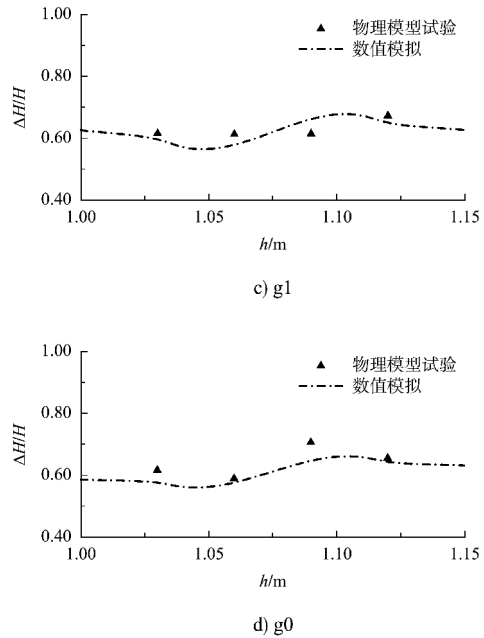
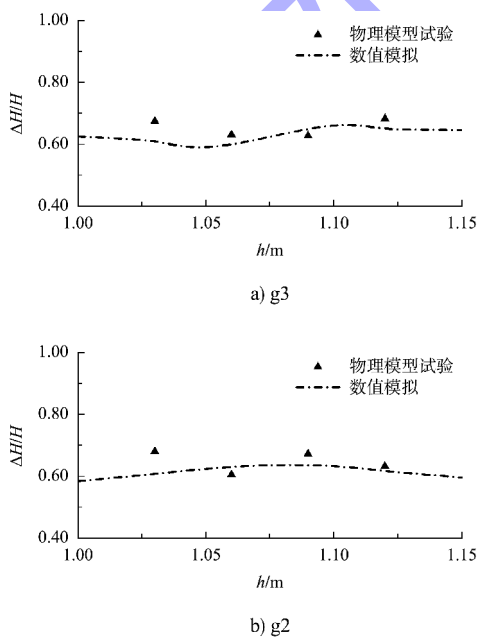


图5 波高衰减率随 h 的变化(3号位)
Fig. 5 Variation wave height attenuation rate with h
(Position 3)

4 结论

1) 在4种水深条件下,随着相对入水深度的改变,波高衰减率稳定于0.55~0.75,未出现明显下降或异常波动,表明设计的新型消波结构消浪效能对入水深度变化不敏感。

2) 在4种配重条件下,随着新型消波结构与红树林之间距离的增大,波高衰减率基本保持稳定,表明新型消波结构在距离红树林的不同位置上均能保持较高的消浪性能。

3) 新型消波结构对水深变化适应性较好,在4种配重条件下,水深从1.00 m升至1.15 m时,波高衰减率的整体变化趋势均较为平稳,表明该结构在不同水深条件下均表现出较强的消浪能力,适用于平陆运河潮位动态变化环境。

4) 为了保证研究的完整性,当前研究主要关注于新型消波结构前后波高变化(即红树林区入射波高的削减量),尚未分析其消波效果,在未来的研究中应该从波浪反射、透射与耗散等角度,全面阐释新型消波结构的消波机制。

参考文献:

- [1] 陈逸航. 平陆运河建设引起的悬浮泥沙和船行波扩散对红树林的影响探究[D]. 南宁: 南宁师范大学, 2023.
CHEN Y H. Study on the influence of suspended sediment and ship traveling wave diffusion caused by Pinglu Canal construction on mangroves [D]. Nanning: Nanning Normal University, 2023.
- [2] 潘海涛, 吴澎, 袁和平, 等. 西部陆海新通道(平陆)运河工程规划设计方案综述[J]. 水运工程, 2024(11): 1-7.
PAN H T, WU P, YUAN H P, et al. Overview of planning and design scheme for western land-sea new corridor (Pinglu) canal project [J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 1-7.
- [3] NIKPOUR A H, MOGHIM M N, BADRI M A. Experimental study of wave attenuation in trapezoidal floating breakwaters[J]. China ocean engineering, 2019, 33(1): 103-113.
- [4] WANG C M, TAY Z Y, TAKAGI K, et al. Literature review of methods for mitigating hydroelastic response of VLFS under wave action [J]. Applied mechanics reviews, 2010, 63(3): 030802.
- [5] KOUTANDOS E, PRINOS P, GIRONELLA X. Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics[J]. Journal of hydraulic research, 2005, 43(2): 174-188.
- [6] 何子豪, 孙宏月, 丁伟业, 等. 海啸波作用下浮式水平板防波堤消浪性能试验研究[J]. 水运工程, 2024(12): 11-19.
HE Z H, SUN H Y, DING W Y, et al. Test of wave attenuation performance of floating flat-plate breakwater under tsunami waves [J]. Port & waterway engineering, 2024(12): 11-19.
- [7] SHUGAN I V, HWUNG H H, YANG R Y, et al. Elastic plate as floating wave breaker in a beach zone [J]. Physics of wave phenomena, 2012, 20(3): 199-203.
- [8] WILLIAMS A N, ABUL-AZM A G. Dual pontoon floating breakwater[J]. Ocean engineering, 1997, 24(5): 465-478.
- [9] JI C Y, CHEN X, CUI J, et al. Experimental study of a new type of floating breakwater[J]. Ocean engineering, 2015, 105: 295-303.
- [10] 谭彬政, 李少斌, 丁建军. 新型密排桩双层框架防波堤结构受力特性研究[J]. 水道港口, 2025, 46(1): 96-103.
TAN B Z, LI S B, DING J J. Research on the mechanical characteristics of a new type of double layered frame breakwater structure with closely packed piles[J]. Journal of waterway and harbor, 2025, 46(1): 96-103.
- [11] DAI J, WANG C M, UTSUNOMIYA T, et al. Review of recent research and developments on floating breakwaters[J]. Ocean engineering, 2018, 158: 132-151.
- [12] 董国海, 郑艳娜, 李玉成, 等. 板-网结构浮式防波堤消浪性能的试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 142-146, 135.
DONG G H, ZHENG Y N, LI Y C, et al. Experimental study on wave dissipation coefficient for board-net floating breakwater [J]. Engineering mechanics, 2006, 23(7): 142-146, 135.
- [13] CHENG Y, DU W M, DAI S S, et al. Wave energy conversion by an array of oscillating water columns deployed along a long-flexible floating breakwater[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2024, 192: 114206.
- [14] 侯利军, 蔡源达, 王辉, 等. 内河生态航道孔洞型消波结构的消波特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 54-62.
HOU L J, CAI Y D, WANG H, et al. Experimental study on the wave dissipation characteristics of hole-type wave dissipation structures in inland water ecological channels [J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2025, 53(2): 54-62.

(本文编辑 王传瑜)