

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.04.010

生态海堤多级平台消浪特性及越浪量计算

刘晓建^{1,2}, 侯 棚^{1,2}, 陈文龙^{1,2}, 朱小伟^{1,2}, 陶爱峰³, 郭辉群^{1,2}, 王 强^{1,2}

(1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 2. 水利部珠江河口海岸工程技术研究中心, 广东 广州 510611;
3. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对生态海堤多级平台消浪设计依据缺乏、人工经验设计效率低且难以最大限度发挥消浪效能的问题, 通过构建耦合高精度水气界面捕捉算法的三维数学模型, 开展了生态海堤多级平台消浪特性及越浪量计算研究, 并基于多级堤身结构(平台宽度、平台高度、堤防高度)不同组合下的越浪规律, 提出了生态海堤越浪量计算公式。结果表明: 受多级平台逐级抬高影响, 堤身上覆水厚度变小造成波浪逐层浅化发生连续破碎耗能, 同时多级平台迎水面分级阻挡浅化波传播, 造成波浪逐级反射衰减; 多级平台宽度和高度共同控制着堤顶越浪, 越浪量相同情况下迎水面横向堤身宽度与纵向堤身高度变化值存在定量互换关系。

关键词: 生态海堤; 多级平台; 波浪运动; 消浪特性; 越浪量; 三维数学模型

中图分类号: TV139.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)04-0070-08

Wave dissipation characteristics and wave overtopping calculation of multi-stage platforms of ecological seawall

LIU Xiaojian^{1,2}, HOU Peng^{1,2}, CHEN Wenlong^{1,2}, ZHU Xiaowei^{1,2}, TAO Aifeng³, GUO Huiqun^{1,2}, WANG Qiang^{1,2}

(1. Pearl River Water Resources Research Institute, Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China;

2. Research Center of Engineering Technology of the Pearl River Coast and Estuary of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China;

3. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to solve the problems of the lack of design basis, low efficiency of artificial experience design and difficulty to maximize the wave dissipation of new multi-stage platform of ecological seawall, a three-dimensional mathematical model coupled with the high-precision capture algorithm of water-gas interface was built. Then, this model was used to study the wave dissipation characteristics and wave overtopping calculation of multi-stage platform of ecological seawall. Considering the overtopping laws of wave under different combinations of dike structure (step width, step height and dike height), a formula for calculating the wave overtopping of multi-stage platform of ecological seawall is put forward. The results show that with the gradual elevation of multi-stage platforms, the thickness of overlying water on the breakwater becomes smaller, resulting in the energy dissipation of continuous breaking of waves. At the same time, the multi-stage platforms block the propagation of shallow waves by stages, forcing the waves to reflect step by step and attenuate. The width and height of the multi-stage platform jointly control the overtopping of the breakwater. It is found that the longitudinal height and transverse width of the multi-stage platform have a quantitative exchange relationship under the same overtopping situation.

Key words: ecological seawall; multi-stage platform; wave propagation; wave dissipation characteristics; wave overtopping; three-dimensional mathematical model

传统海堤、海墙等“灰色”工程在保障沿海城市防洪(潮)安全的同时, 存在影响景观和破坏生态等问题。相对而言, 生态海堤以其兼具防潮挡浪、生态和景观等多功能逐渐被国内外学者重视, 生态海堤突破了传统垂向一体式海堤设计思路, 在迎水侧以台阶形式设置宽度为 100~300 m 的横向多级平台。空间拓宽不仅为

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001000); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2021A1515110428); 广东省级促进经济高质量发展海洋专项项目(GDNRC[2021]41); 广州市基础与应用基础研究项目(202102021286); 水利部重大科技项目(SK-2022036); 海岸灾害及防护教育部重点实验室(河海大学)开放基金项目(202209); 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室开放课题项目(SKLEC-KF202110); 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室开放基金项目(2020SS02)

作者简介: 刘晓建(1990—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事河口海岸水动力学研究。E-mail: lxiaojian2010@163.com

通信作者: 侯棚(1983—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事洪潮灾害防御、海岸带保护修复研究。E-mail: 59879674@qq.com

引用本文: 刘晓建, 侯棚, 陈文龙, 等. 生态海堤多级平台消浪特性及越浪量计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 70-77.

LIU Xiaojian, HOU Peng, CHEN Wenlong, et al. Wave dissipation characteristics and wave overtopping calculation of multi-stage platforms of ecological seawall[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(4): 70-77.

生境或景观营造创造了基础条件,也提高了堤身抵御风暴潮灾害的能力^[14],如广州南沙灵山岛尖生态海堤建成后有效抵御了“天鸽”“山竹”等超 200 年一遇风暴潮侵袭^[5],有效保障了海堤后方城市安全。

越浪量是海堤设计考虑的重要因素,决定着堤顶高程、堤身宽度和坡度等结构设计参数。波浪由外海传播至海堤堤身,若海堤堤顶高程超过波浪爬高则不会发生越浪,但过高的堤顶可能造成堤防“围城”,难以满足景观游憩和亲水需求;若海堤堤顶高程低于波浪爬高即会发生越浪,对堤顶和堤后坡造成冲刷破坏,危及海堤整体安全^[6-7]。生态海堤多级平台是相对较新颖的堤身结构,然而现行 GB/T 51015—2014《海堤工程设计规范》主要以直立堤、斜坡堤及复合堤为主,尚无适用于生态海堤多级平台复杂断面形式的海堤越浪量计算依据,若采用人工经验设计方法易出现消浪效果不佳、堤顶高程不易确定等问题。为了降低风暴潮灾害对海堤防潮安全带来的不利影响,合理预测生态海堤多级平台消浪特性及越浪量至关重要,也具有重要的学术价值和工程意义。

近年来,国内外学者针对海堤越浪问题开展了大量研究工作,例如 Hughes 等^[8]研究了风暴潮高水位下越浪流在堤顶和后坡的速度及厚度;van der Meer 等^[9]对单坡和复坡斜坡等不同堤形越浪研究进行了系统分析,形成了 EurOtop 越浪计算手册;van Gent 等^[10]研究了防浪墙以及复式堤平台宽度对堤顶越浪量的影响;Koosheh 等^[11]指出波陡是影响抛石防波堤越浪的重要动力参数;Pepi 等^[12]研究发现,在迎水侧结合布置抛石和人工块石有利于降低堤顶越浪。国内学者赵泓任^[13]试验发现双层消浪平台具有良好的消浪效果;夏运强等^[14]发现消浪平台高程在高水位附近时消浪效果较好;周益人等^[15]研究了港珠澳大桥人工岛护岸护面块体形式、消浪平台尺度、挡浪墙前护肩宽度等结构参数对越浪量的影响,给出了考虑坡肩折减系数的越浪量计算方法。但上述研究多局限于传统海堤形式,生态海堤多级平台消浪研究尚处于起步阶段,仅王盟等^[6]分析了生态海堤平台级数、宽度对越浪量的影响,给出了相同波要素在直立堤上纵向波浪高度与横向消浪平台合理尺度的定量关系,并分析了波浪运动过程中海堤多级平台表面压力的分布情况。综上可知,由于研究侧重点不同,现有研究成果主要集中于传统海堤结构,较少涉及生态海堤多级平台消浪问题。

为探明生态海堤多级平台影响下的波浪传播过程及其消浪规律,本文基于三维不可压缩黏性 N-S 方程,利用 OpenFOAM 开源代码中的两相流求解器 IHFOAM^[16]建立了生态海堤多级堤身三维数值波浪水槽模型,拟采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型,并运用修正的流体体积函数输运方程捕捉自由液面,分析生态海堤不同平台附近的自由液面、流速场以及堤顶越浪量变化特征,提出考虑生态海堤多级平台影响的越浪量计算公式,以为生态海堤堤身多级平台工程设计及优化提供参考。

1 数值模型建立

1.1 控制方程

OpenFOAM 作为 CFD 开源程序包,以其易扩展性、并行计算稳定高效和求解方法先进等特点被广泛应用于波浪与结构物的相互作用问题^[17-18]。本文模型基于三维雷诺时均 RANS 方程求解连续不可压缩流体,其连续性方程和动量方程分别为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}^T) = -\nabla p^* - g \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \times (\mu \nabla \times \mathbf{u} + \rho \boldsymbol{\tau}) + \sigma_T \kappa_\gamma \nabla \gamma \tag{2}$$

其中 $\boldsymbol{\tau} = \frac{2}{\rho} \mu_t \mathbf{S} - \frac{2}{3} k \mathbf{I} \quad \mathbf{S} = [\nabla \times \mathbf{u} + (\nabla \times \mathbf{u})^T]/2 \quad \kappa_\gamma = \nabla \cdot (\nabla \gamma / |\nabla \gamma|)$

式中: $\mathbf{u}$ 为笛卡尔坐标系下流速; ρ 为密度,其大小与计算网格内气液所占体积有关; p^* 为动水压强; g 为重力加速度; $\mathbf{x}$ 为笛卡尔坐标; μ 为流体的动力黏度; $\boldsymbol{\tau}$ 为雷诺应力; μ_t 为湍流黏度; $\mathbf{S}$ 为应变速率; k 为紊动动能; $\mathbf{I}$ 为 Kronecker 符号; σ_T 为表面张力系数,取为 0.074 kg/s^2 ; κ_γ 为界面曲率; γ 为流体体积分,其大小代表液体体积在计算网格中所占的比例。

为了闭合 RANS 方程,采用 $k-\varepsilon$ 二阶湍流模型:

$$k = \overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}^T} / 2 \tag{3}$$

$$\varepsilon = C_\mu^{0.75} k^{1.5} / l \tag{4}$$

式中: ε 为湍流动能耗散率; C_μ 为标准 $k-\varepsilon$ 模型中的无量纲系数,取 0.09; l 为湍流长度尺度。

k 和 ε 的输运方程分别为

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (k \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + 2 \frac{\nu_t}{\rho} |\nabla \cdot \mathbf{u}|^2 - \varepsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + 2C_{1\varepsilon} \nu_t |\nabla \cdot \mathbf{u}|^2 \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

(6)

式中: ν_t 为湍流运动黏性系数; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 σ_k 、 σ_ε 均为经验系数,分别取 1.44、1.92、1 和 1.3。

1.2 自由液面模拟方法

自由液面捕捉采用修正的 VOF 方法,引入 γ 模拟波浪运动, $\gamma=1$ 表示液体,0 表示气体,介于 0 和 1 之间表示该网格为气液交界面,其输运方程为

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \gamma) + \nabla \cdot [\mathbf{u}_r \gamma (1 - \gamma)] = 0$$

(7)

式中 $\mathbf{u}_r$ 为相对速度。

修正的 VOF 方法与经典 VOF 方法中的体积分数输运方程相比多了等式左边的最后一项,称为人工压缩项,其作用是使修正 VOF 方法对自由液面的捕捉更加精确。

1.3 求解方法

采用有限体积法对三维 N-S 方程进行离散,采用 PIMPLE 算法进行压力和速度方程求解,该方法结合了 PISO (pressure implicit split operator) 算法和 SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) 算法特点,即在任意时间步内采用 SIMPLE 算法进行低松弛稳定计算以获得最大的时间步,而迭代步内使用 PISO 算法进行多次压力修正对压力速度的耦合问题进行充分求解,有效避免了传统方法流场变化过大引起的数值耗散问题。时间离散采用 Euler 格式,压力梯度离散采用高斯线性离散格式,拉普拉斯项离散采用修正后高斯线性离散格式,式(7)中的对流项采用 MUSCL (multidimensional universal limiter for explicit solution) 格式,人工压缩项采用高斯界面压缩格式。

1.4 造波和消波边界

数值造波采用 Higuera 等^[16]提出的 IHFOAM 方法,其中入口边界采用 Dean 等^[19]提出的 Stokes I 波理论造波,出口边界采用主动式消波法消波^[16],该方法克服了被动消波法(如松弛区消波法^[20])延长计算域的缺点。

2 模型验证及计算工况

2.1 模型验证

为了研究模型造波及波浪沿平台的运动传播能力,采用 Yao 等^[21]的试验数据对模型的可靠性进行分析,模型布置如图 1(a)所示(图中 h_r 为漫顶水深),坡脚距离造波机 16.35 m,斜坡水平长度为 2.0 m,垂直高度为 0.35 m,坡率为 1 : 6,水平平台长 7.0 m,后方连接一个 1 : 8 的斜坡。沿水槽方向布置了 12 个波高仪对波面运动过程进行测量,选择 W1、W3、W5、W7、W9 和 W11 波高仪进行模型验证,其中 W1 用于验证模型

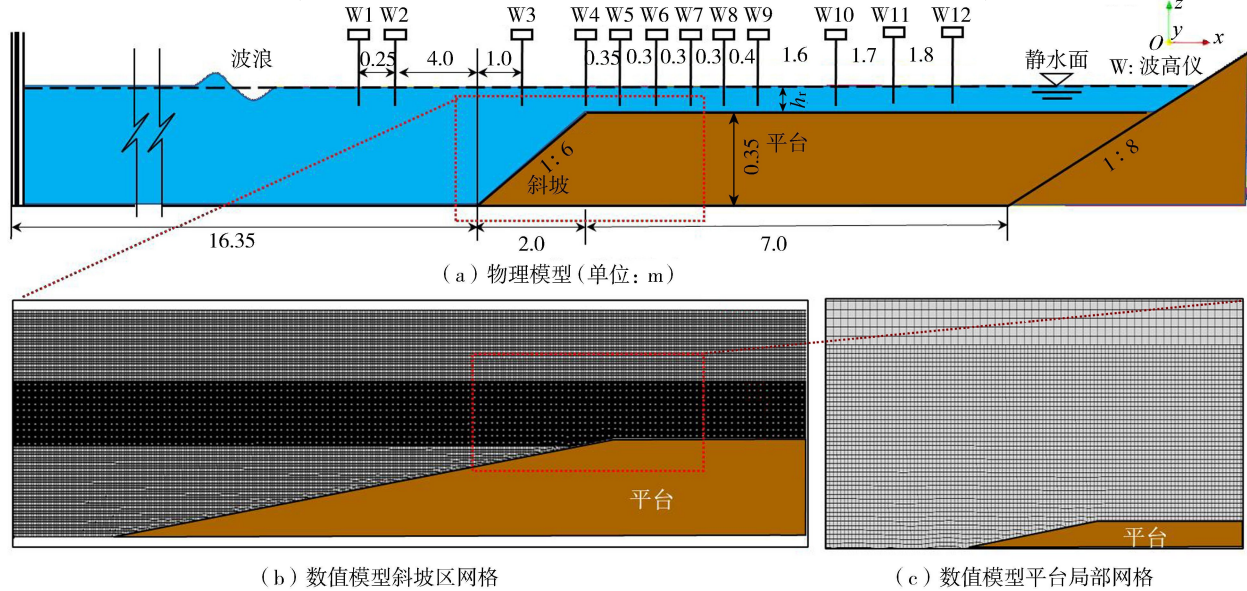


图1 物理模型和数值模型网格设置

Fig.1 Layout of physical model and numerical model grid

的造波能力,W3 用于验证模型波浪浅水变形模拟能力,W5、W7、W9 和 W11 用于验证模型对波浪破碎和波浪传播的模拟能力。工况参数:波高 $H=0.087\text{ m}$,周期 $T=1.25\text{ s}$,局部水深 $h=0.45\text{ m}$, $h_r=0.1\text{ m}$ 。

本文数值模型网格如图 1(b)(c)所示,模型网格剖分采用矩形网格和三角形网格结合的方式,其中液面处和平台位置为矩形网格,斜坡位置为三角网格,主要目的是消除斜坡处因网格倾斜引起的液面齿峰波动问题。模型背景网格设置为 4 mm ,即 $dx=dy=dz=4\text{ mm}$,为了精确捕捉自由波面运动情况,在液面和波高变化区域进行了网格加密,即 $dx=dz=2\text{ mm}$ 。

由图 2 可知,数值模型和物理试验结果具有良好的一致性,其中平台区验证结果略有差异,主要原因是 W5 和 W7 位于波浪破碎带,波浪破碎夹杂着大量气体卷入水体,气泡对实验仪器测量存在影响。整体而言,本文模型可满足造波要求,并能够较好地捕捉波浪传播变形和破碎过程,可应用于后续工况计算。

2.2 计算工况

根据生态海堤形式和王盟等^[6]的研究成果,本文将堤身多级平台概化为三级,结构形式如图 3 所示,图中海堤一级平台宽度 b_1 和二级平台宽度 b_2 均分别取 10、30、50、70 m,三级平台宽度 b_3 取 10 m,海堤一级平台高度 z_1 、二级平台高度 z_2 、三级平台高度 z_3 均取 3、2、1.75、1.5、1.25 m 进行组合,水深 h 取 6.0 m, d_1 、 d_2 、 d_3 分别为一级平台水深、二级平台水深、三级平台水深, R_c 为堤顶超高, Z 为海堤高度, B 为平台总宽度, H 取 2.05 m, T 取 5.7 s,波长(L)取 38.28 m。计算模型影响参数较多,计算工况共计 350 组。

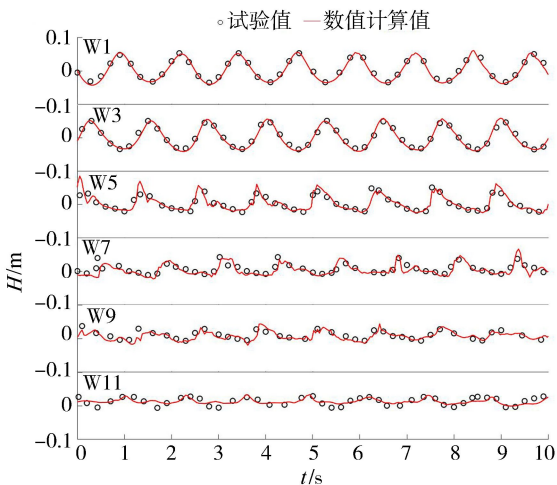


图 2 数值模型和物理试验波浪波高对比
Fig.2 Comparison of wave height between numerical model and physical model test

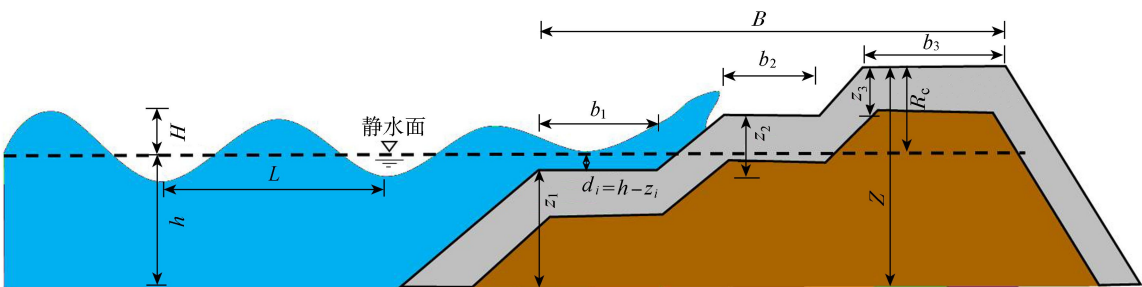


图 3 数值模型示意图
Fig.3 Numerical model diagram

3 结果与分析

3.1 波浪运动过程

相较于传统直立式等海堤形式,生态海堤迎水侧采用多级平台结构,其影响下的波浪运动传播过程较为复杂,以某一工况为例($b_1=30\text{ m}$, $b_2=10\text{ m}$, $z_1=1.25\text{ m}$, $z_2=3\text{ m}$, $z_3=2\text{ m}$, $R_c=0.25\text{ m}$,简称工况 1),给出了堤身上部波浪传播运动特征,如图 4 所示。波浪由外海传播至第一级平台后,受地形抬高影响,波浪发生浅化变形,波能向波峰聚集,例如在 $t=35.05\text{ s}$ 时,相较于堤脚前波峰波速明显增大,同时平台折角位置水体出现明显紊动,消耗部分波能;当波浪传播至第二级平台后($t=38.05\text{ s}$),平台上部波峰能量进一步增大,波浪濒临破碎,但由于平台宽度空间不足,波浪未充分破碎;随后($t=39.05\text{ s}$)波浪撞击堤顶迎水面,并越过堤顶产生水舌,出现越浪。

生态海堤多级平台尺寸改变会对波浪运动产生影响。相对于工况 1,图 5 工况($b_1=30\text{ m}$, $b_2=50\text{ m}$, $z_1=1.25\text{ m}$, $z_2=3\text{ m}$, $z_3=2\text{ m}$, $R_c=0.25\text{ m}$,简称工况 2)将二级平台宽度由 10 m 增大至 50 m,可以看出平台宽度增大后波浪破碎充分发展,破碎点约发生在 $x=135\sim140\text{ m}$ 之间位置,波能消耗较大,波浪破碎后形成小

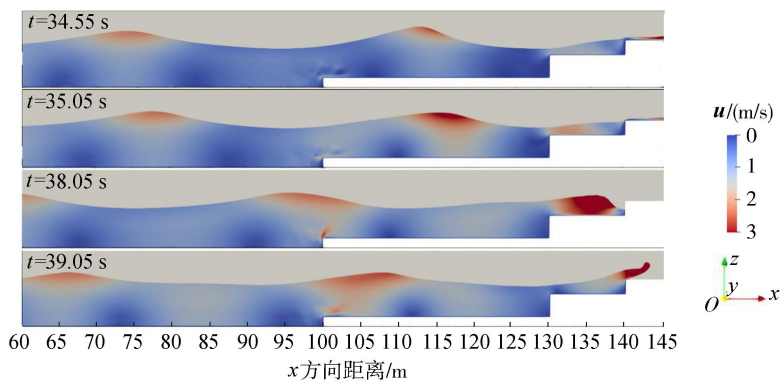


图4 波浪沿多级堤身传播过程(工况1)

Fig.4 Wave propagation process along multi-stage platform of ecological seawall(Case 1)

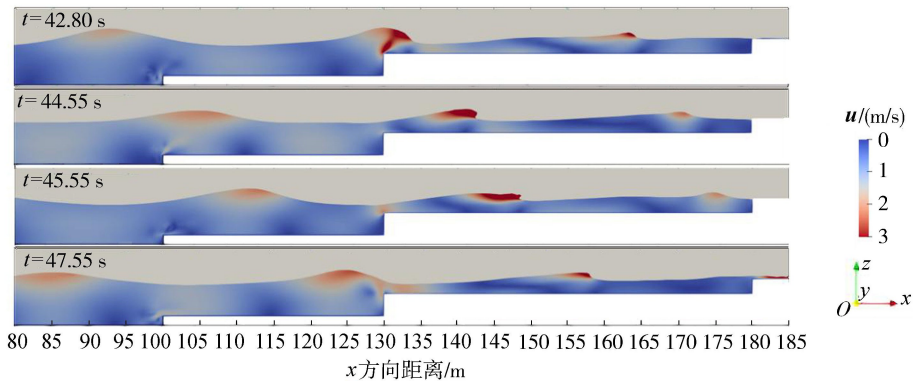


图5 波浪沿多级堤身传播过程(工况2)

Fig.5 Wave propagation process along multi-stage platform of ecological seawall(Case 2)

幅行进波继续向陆运动,在堤顶发生轻微越浪;相较于工况2,图6 工况 ($b_1=30\text{ m}$, $b_2=50\text{ m}$, $z_1=2\text{ m}$, $z_2=3\text{ m}$, $z_3=2\text{ m}$, $R_c=1\text{ m}$, 简称工况3) 将一级平台高度由 1.25 m 增大至 2 m , 此时 $R_c=1.0\text{ m}$ 。受一级平台抬高影响,波浪浅化作用增强,并在 $x=115\text{ m}$ 处发生破碎,相较于工况2 波浪破碎点前移。破碎波越过一级平台后,在二级平台再次发生破碎,主要归因于平台抬高造成波浪非线性增强,波浪发生连续性破碎,波能耗散较大,堤顶未出现越浪现象。

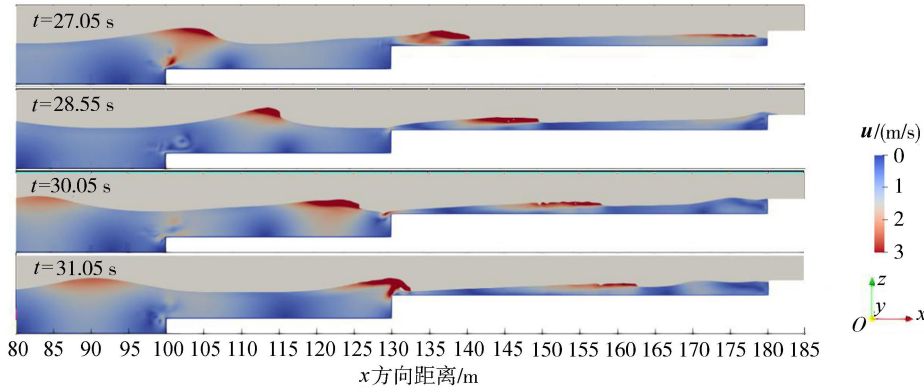


图6 波浪沿多级堤身传播过程(工况3)

Fig.6 Wave propagation process along multi-stage platform of ecological seawall(Case 3)

3.2 单宽越浪量变化规律

越浪量控制是海堤设计中的关键问题,生态海堤多级平台宽度和高度不同会对堤顶越浪量产生影响,堤顶单宽越浪量 q 为

$$q = \int_0^{T_w} u_d(t) h_d(t) dt \tag{8}$$

式中: $u_d(t)$ 和 $h_d(t)$ 分别为堤顶流速和堤顶淹没水深时间序列; T_w 为堤顶周期越浪时间。

图 7 为海堤二级和三级平台高度不变情况下,一级平台高度、一级平台宽度和二级平台宽度变化下的堤顶单宽越浪量。由图 7 可知, b_1 和 b_2 增大, q 呈减小趋势,但在部分工况下随堤身宽度增大(图 7(d)), b_1 由 50 m 增大至 70 m),堤顶单宽越浪量基本保持不变,表明波浪破碎后,受平台宽度的影响紊动能趋于饱和,进一步增大堤身宽度消浪效能不显著。随海堤一级平台抬高(图 7(a)至图 7(d)),堤顶单宽越浪量减小,主要归因于:①平台抬高迫使波浪非线性增强,加速波浪破碎,波能显著衰减;②受海堤迎水侧阻挡产生反射波,反射波与入射波相互叠加造成波能耗散,二级和三级平台抬高同样呈现类似规律。

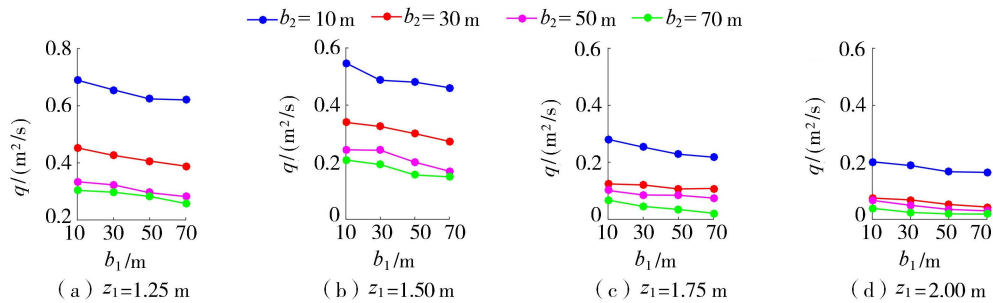


图 7 海堤单宽越浪量随多级平台结构变化关系 ($z_2=3\text{ m}, z_3=2\text{ m}$)

Fig. 7 Variation of wave overtopping per unit width of seawall with multi-stage platform ($z_2=3\text{ m}, z_3=2\text{ m}$)

图 8 为 b_1 和 z_2 不同情况下反射系数的变化规律,可以看出随着 b_1 的增大,反射系数减小,随着 z_2 的增大,反射系数减小,但是当 b_1 为 70 m 时,反射系数基本相当,其主要原因是当堤防长度足够长时,波浪能够充分破碎,消耗大部分能量。整体而言,生态海堤多级平台消浪能力主要体现在横向尺度上多级平台上覆水深减小,造成波浪逐层浅化发生“连续破碎”耗能,竖向尺度上多级平台迎水面分级阻挡波浪传播,迫使波浪“逐级反射”衰减。

生态海堤多级平台宽度和高度共同影响着堤顶越浪量大小。为了揭示多级平台越浪量与海堤宽度和高度的相互关系,基于本文计算成果绘制了无量纲越浪量 q/TgH 与海堤相对宽度 ($\Delta B/L$) 和相对高度 ($\Delta Z/H$) 关系(图 9)。由图 9 可知,随着海堤宽度和高度的增大,堤顶越浪量逐渐减小,且在较大的堤身宽度和高度区越浪量变化梯度较小,而在较小区越浪量变化梯度增大,约为前者的 2 倍,表明在海堤堤身结构尺度较小时改变结构对越浪量影响较大,而当其达到一定规模时改变堤身结构对越浪量影响较小。同时,发现越浪量相同情况下,海堤多级平台 $\Delta Z/H$ 与 $\Delta B/L$ 间存在定量互换关系:

$$\Delta Z/H = 0.1 \Delta B/L \tag{9}$$

式中: ΔZ 为海堤堤顶高度变化; ΔB 为海堤堤身宽度变化。

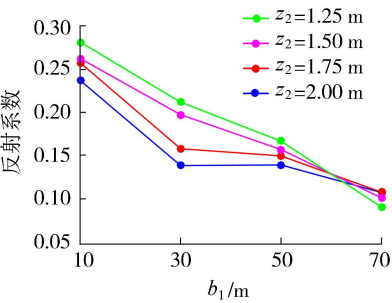


图 8 反射系数随多级平台结构变化关系 ($z_1=2\text{ m}, z_3=3\text{ m}$)

Fig. 8 Variation of wave reflection coefficient of seawall with multi-stage platform ($z_1=2\text{ m}, z_3=3\text{ m}$)

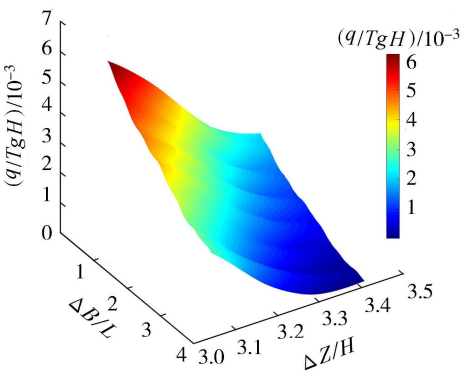


图 9 生态海堤堤顶越浪量随多级平台高度和宽度变化

Fig. 9 Variation of wave overtopping of seawall with height and width of multi-stage platform

为了控制堤顶满足某一越浪要求,根据岸带空间资源和景观需求,可通过增大海堤平台宽度(降低高程)或抬高海堤平台高程(减小平台宽度)实现。

3.3 越浪量计算

对于海堤越浪量计算,国外较常用的有 Owen 公式^[22],van der Meer 公式^[23]、EurOtop 公式^[9],国内有 GB/T 51015—2014《海堤工程设计规范》公式。相较于其他公式,Owen^[22]针对复坡海堤越浪量进行了较为系统的研究,通过对试验结果进行量纲分析,总结得到如下公式:

$$\frac{q}{TgH} = a \exp\left(-b \frac{R_c}{T\sqrt{gH}}\right) \tag{10}$$

式中 a, b 为经验系数。

式(10)在处理迎浪侧堤身结构对越浪量的影响时,并未将平台结构参数以某一影响因子代入公式进行考虑。实际上,海堤多级平台宽度(b_1, b_2, b_3)和高度(z_1, z_2, z_3)影响着堤身波浪传播及堤顶越浪量变化,且这种影响不可忽略,即越浪量受波浪和海堤结构参数共同制约:

$$q = f(h, H, T, b_1, b_2, b_3, z_1, z_2, z_3) \tag{11}$$

为了探究堤身多级平台宽度和高度对堤顶越浪量的影响,对堤身结构参数进行归一化 $B/\gamma_b L$,其中 γ_b 为海堤结构修正系数:

$$\gamma_b = \frac{d_1}{H} \frac{b_1}{B} + \frac{d_2}{H} \frac{b_2}{B} + \frac{d_3}{H} \frac{b_3}{B} \tag{12}$$

图 10 为越浪量 q/TgH 随堤身结构参数 $B/\gamma_b L$ 的变化关系,可以看出 q/TgH 随 $B/\gamma_b L$ 的增大而减小,整体上呈幂指数衰减关系: $q/TgH \propto \exp(B/\gamma_b L)$ 。

对式(10)右侧的堤身结构参数项进行改进,提出考虑多级平台影响的生态海堤越浪量无量纲计算公式:

$$\frac{q}{TgH} = a \exp\left(-b \frac{R_c}{T\sqrt{gH}}\right)^c \exp\left(-d \frac{B}{\gamma_b L}\right)^e \tag{13}$$

式中 c, d, e 为经验系数。

对于海堤而言,设计重现期潮位堤顶淹水应小余 0,此时 $d_3=0$ 。通过多元参数非线性回归分析,得到以下越浪量计算公式:

$$\frac{q}{TgH} = 0.014 \exp\left(-\frac{6.928 R_c}{T\sqrt{gH}}\right)^{6.126} \exp\left(-\frac{0.801 B}{\gamma_b L}\right)^{0.615} \tag{14}$$

图 11 给出了采用式(14)计算出的越浪量与数值计算(式(8))结果对比,决定系数 R^2 达到 0.87,进一步考虑无量纲越浪量上下范围浮动 $q/TgH \pm 0.001$,基本囊括了所有情景, R^2 超过 0.95。表明本文提出的多级海堤越浪量计算公式可以较好地反映生态海堤不同平台宽高参数影响下的堤顶越浪情况,可用于生态海堤多级堤身的越浪预测和评估。

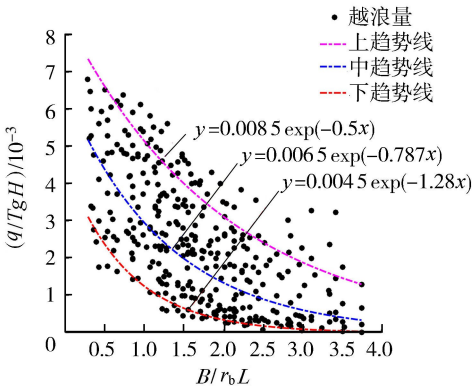


图 10 越浪量随多级堤平台宽度变化
Fig.10 Variations of wave over topping with width of multi-stage platform

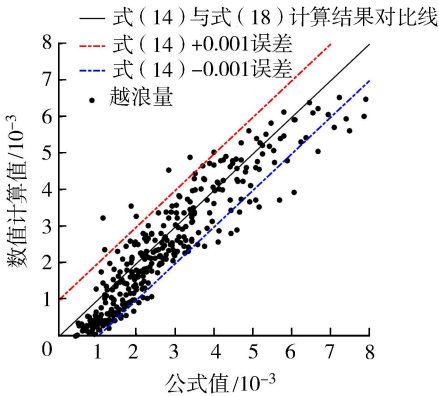


图 11 q/TgH 公式值(式(14))和数值计算值(式(18))对比
Fig.11 Comparison of q/TgH between formula results (formula (14)) and numerical results (formula (18))

4 结 论

- a. 生态海堤多级平台通过逐级抬高平台高程,增大了波浪与海堤的非线性作用。在横向尺度上,受多级堤身上覆水深变小,造成波浪逐层浅化发生“连续破碎”耗能;在纵向尺度上,多级堤迎水面分级阻挡浅化波向陆传播,迫使波浪“逐级反射”衰减。
- b. 生态海堤多级平台宽度和高度共同控制着堤顶越浪量,随堤身宽度增加和堤顶高程抬高越浪量呈减小趋势,同时发现堤顶越浪量相同情况下,海堤多级平台纵向相对高度 $\Delta Z/H$ 与平台横向相对宽度 $\Delta B/L$ 间存在定量互换关系; $\Delta Z/H=0.1\Delta B/L$ 。
- c. 基于非线性回归方法,提出了融合波浪(波高、波长、波周期)、潮位及堤身结构(平台宽度、平台高度、堤顶超高)等多元参数影响的越浪量计算公式,准确反映了生态海堤多级堤身影响下的堤顶越浪情况。

参考文献:

[1] 周悦,董增川,徐伟,等. 基于 SWAN 模型的风生波河道防浪林消浪模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):323-328. (ZHOU Yue,DONG Zengchuan,XU Wei,et al. Wave attenuation simulation of vegetation based on the SWAN model in rivers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(4):323-328. (in Chinese))

[2] 王建婷,董增川,徐伟,等. 嫩江干流防浪林消浪影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):30-36. (WANG Jianting,DONG Zengchuan,XU Wei,et al. Influencing factors analysis of wave dissipation of the wavebreak forest in mainstream of Nenjiang River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(1):30-36. (in Chinese))

[3] 陈君,林祥,孙典红. 江苏海堤工程建设研究综述[J]. 水利水电科技进展,2022,42(4):103-108. (CHEN Jun,LIN Xiang,SUN Dianhong. Research review on seawall project construction in Jiangsu Province[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(4):103-108. (in Chinese))

[4] 李洪庆,程飞飞,宋红艳,等. 基于土地利用变化的中国东部沿海城市景观生态风险评估[J]. 水利经济,2023,41(5):29-37. (LI Hongqing,CHENG Feifei,SONG Hongyan,et al. Landscape ecological risk assessment of coastal cities in Eastern China based on land use change[J]. Journal of Economics of Water Resources,2023,41(5):29-37. (in Chinese))

[5] 陈俊昂,王帅,钟兴,等. “多功能生态海堤构架体系”技术应用实践[J]. 广东水利水电,2021(4):56-59. (CHEN Junang,WANG Shuai,ZHONG Xing,et al. The practice of technical application of “multifunctional ecological seawall framework system” [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower,2021(4):56-59. (in Chinese))

[6] 王盟,曹春顶,贾东远. 海堤多级平台消浪效果研究[J]. 水电能源科学,2021,39(11):136-139. (WANG Meng,CAO Chunding,JIA Dongyuan. Study on wave dissipation effect of seawall multi-stage platform[J]. Water Resources and Power,2021,39(11):136-139. (in Chinese))

[7] 潘毅,屈小开,周子骏,等. 海堤波浪溢流量的分布特征及估算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):260-267. (PAN Yi,QU Xiaokai,ZHOU Zijun,et al. Distribution characteristics and estimation method of discharge of combined wave and surge overtopping in sea levees[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(3):260-267. (in Chinese))

[8] HUGHES S A,NADAL N C. Laboratory study of combined wave overtopping and storm surge overflow of a levee[J]. Coastal Engineering,2009,56(3):244-259.

[9] VAN DER MEER J W, VERHAEGHE H, STEENDAM G J. The new wave overtopping database for coastal structures[J]. Coastal Engineering, 2009, 56(2):108-120.

[10] VAN GENT M R A,WOLTERS G,CAPEL A. Wave overtopping discharges at rubble mound breakwaters including effects of a crest wall and a berm[J]. Coastal Engineering,2022,176:104151.

[11] KOOSHEH A,ETEMAD-SHAHIDI A,CARTWRIGHT N,et al. Experimental study of wave overtopping at rubble mound seawalls [J]. Coastal Engineering,2022,172:104062.

[12] PEPI Y,CECIONI C,FRANCO L. Role of armor roughness in overtopping response of upgraded multilayer rubble mound breakwaters[J]. Journal of Waterway,Port,Coastal,and Ocean Engineering,2022,148(5):04022017.

[13] 赵泓任. 双层平台斜坡式护岸波浪作用的试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.

[14] 夏运强,柳玉良. 平台式消浪结构试验研究及工程应用[J]. 港工技术,2019,56(6):47-49. (XIA Yunqiang,LIU Yuliang. Experimental study and application of wave-breaking platform structure[J]. Port Engineering Technology,2019,56(6):47-49. (in Chinese))

in Benin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):123-129. (in Chinese))

[8] GEORGE D A,HILL P S. Wave climate,sediment supply and the depth of the sand-mud transition:a global survey[J]. Marine Geology,2008,254(3/4):121-128.

[9] DUNBAR G B,BARRETT P J. Estimating palaeobathymetry of wave-graded continental shelves from sediment texture[J]. Sedimentology,2005,52(2):253-269.

[10] 黄世昌,李新文,娄海峰,等. 台风季节典型岬湾沙滩的变化分析:以浙江省2019年台风季为例[J]. 泥沙研究,2023,48(2):74-80. (HUANG Shichang LI Xinwen LOU Haifeng,et al. Variations in typical embayed beaches during typhoon season--using the 2019 typhoon season in Zhejiang Province as an example[J]. Journal of Sediment Research,2023,48(2):74-80. (in Chinese))

[11] 孙志林,龚玉萌,许丹,等. 新鹤海湾的演变特征及水沙模拟分析[J]. 海洋工程,2019,37(1):64-74. (SUN Zhilin,GONG Yumeng,XU Dan,et al. Evolution characteristics and flow-sediment simulation of the Xinhe Bay[J]. The Ocean Engineering,2019,37(1):64-74. (in Chinese))

[12] 周湘,蔡锋,戚洪帅,等. 台湾海峡西岸两个典型复合型海滩砂泥转换带对比研究[J]. 海洋工程,2019,37(5):133-140. (ZHOU Xiang,CAI Feng,QI Hongshuai,et al. Comparative study of sand-mud transition on two sandy-muddy transitional beaches along west coast of the Taiwan Straits[J]. The Ocean Engineering,2019,37(5):133-140. (in Chinese))

[13] 黄君宝,倪博,刘旭,等. 浙江省玉环市鲜叠沙滩人工修复研究[J]. 浙江水利科技,2022,50(5):30-35. (HUANG Junbao,NI Bo,LIU Xu,et al. Study on artificial nourishment of Xiandie beach in Yuhuan County of Zhejiang Province[J]. Zhejiang Hydrotechnics,2022,50(5):30-35. (in Chinese))

[14] 徐啸,余小建,毛宁,等. 人工沙滩研究[M]. 北京:海洋出版社,2012.

[15] 徐啸,沈莹,毛宁,等. 沙泥混合型岸滩及沙泥分界点初探:厦门湾岸滩类型调查[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):183-188. (XU Xiao,SHEN Ying,MAO Ning,et al. Study on the sandy-muddy hybrid beach and sand-silt demarcation point:survey on the type of Xiamen Bay beach[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(2):183-188. (in Chinese))

[16] GUO Junli,SHI Lianqiang,CHEN Shenliang,et al. Sand-mud transition dynamics at embayed beaches during a typhoon season in Eastern China[J]. Marine Geology,2021,441:106633.

[17] 蔡锋. 华南沙质海滩动力地貌过程[D]. 青岛:中国海洋大学,2005.

(收稿日期:2023-09-10 编辑:刘晓艳)

(上接第77页)

[15] 周益人,潘军宁,左其华. 港珠澳大桥人工岛越浪量试验[J]. 水科学进展,2019,30(6):908-914. (ZHOU Yiren,PAN Junning,ZUO Qihua. Experimental study on the overtopping of the artificial island of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Advances in Water Science,2019,30(6):908-914. (in Chinese))

[16] HIGUERA P,LARA J L,LOSADA I J. Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM®[J]. Coastal Engineering,2013,71:102-118.

[17] LIU X,HOU P,DUAN Z,et al. Numerical investigation on the effectiveness of pile row in local sand trapping and beach protection[J]. Ocean Dynamics,2022,72(7):539-555.

[18] 王国玉,顾新红,秦世杰,等. 基于 OpenFOAM 的挡板透空式防波堤水动力特性数值分析[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):63-69. (WANG Guoyu,GU Xinhong,QIN Shijie,et al. Numerical simulation on hydrodynamic performance of baffle type breakwater based on OpenFOAM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(2):63-69. (in Chinese))

[19] DEAN R G,DALRYMPLE R A. Water wave mechanics for engineers and scientists[M]. Singapore:World Scientific Publishing Company,1991.

[20] JACOBSEN N G,FUHRMAN D R,FREDSØE J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library:OpenFoam®[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids,2012,70(9):1073-1088.

[21] YAO Y,LIU Y,CHEN L,et al. Study on the wave-driven current around the surf zone over fringing reefs[J]. Ocean Engineering,2020,198:106968.

[22] OWEN M W. Design of sea walls allowing for wave overtopping[R]. Wallingford:Hydraulics Research Station,1980.

[23] VAN DER MEER J W,STAM C J M. Wave runup on smooth and rock slopes of coastal structures[J]. Journal of Waterway,Port, Coastal, and Ocean Engineering,1992,118(5):534-550.

(收稿日期:2023-05-20 编辑:刘晓艳)