

越浪预测研究综述及展望

李静^{1,2}, 张则飞^{3,4*}, 丁雪霖^{3,4}, 朱永^{3,4}, 夏冬冬^{1,2}

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081;
3. 浙江省海洋科学院, 浙江 杭州 310012; 4. 自然资源部海洋空间资源管理技术重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 回顾总结了现有的越浪预测方法和目前开展的越浪风险预警研究工作。结果表明: 越浪预测工具应用最广泛的是基于物理模型试验建立的各种经验计算公式; 近年来, 数值模拟和人工神经网络等机器学习算法也得到越来越多的发展和应用; 此外, 越浪风险量化分析和评估也逐渐成为越浪研究的重点。最后展望提出了加强越浪预报和建立风险预警系统对沿海风险管理的重要性。

关键词: 越浪量; 越浪预测; 风险分析; 预警系统

中图分类号: P731.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)05-0098-09

0 引言

我国海岸线绵长, 海洋资源丰富, 随着经济发展和科学技术的进步, 沿海经济产业得到迅猛发展。为了保护人民生命财产安全和满足发展的需求, 沿海地区修建了大量的海堤等防护工程。越浪是指由于水体爬升、波浪冲击飞溅或风的作用导致部分水体越过礁石或海堤等结构顶部的一种复杂的危险现象, 是造成堤防结构破坏的重要因素之一, 常常会对建筑本身及其后方的设施、人员和车辆等构成威胁, 是堤防工程设计中需要考虑的一个关键过程。此外, 在气候变化大背景下, 由于海平面上升和风暴增强等因素的影响, 现有的海防工程的防御作用降低, 越浪会导致沿海地区的洪水风险增加, 但这一影响却常常被忽视^[1]。因此, 加强对越浪过程的认识及研究对沿海防灾减灾具有重要意义。

越浪通常是以平均越浪量来进行度量, 因其易于测量和分类而被广泛使用, 是海堤工程设计的重要指标。平均越浪量(q) 定义为一个足够长的波列在单位时间内越过堤顶单位宽度上的平均越浪体积(单位: $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$)。实际上, 越浪过程是一个复

杂的随机过程, 水体在时空分布上极不均匀, 在风暴发生期间, 单波的最大越浪量可能达到平均越浪量的100倍以上^[2-4]。因此, 除了平均越浪量, 还有其他相关的参数衡量越浪的大小及影响, 如单波越浪峰值体积、越顶速度和厚度等。本文主要从平均越浪量预测、允许越浪标准以及越浪风险研究方面回顾越浪研究的发展, 为未来可能开展的越浪预警提供参考信息。

1 越浪量预测方法研究

越浪量与波浪参数(波高、周期、波向角等)和结构参数(堤顶超高、坡度、堤顶宽度、护面条件等)密切相关。目前使用最广泛的平均越浪量预测工具是基于物理试验而获得的经验公式, 随着计算机技术的发展, 数值模拟和基于机器学习算法的越浪预测研究也在不断发展。

1.1 越浪量估算经验公式

经验公式是通过物理试验数据等推导, 将平均越浪量与主要波浪、结构参数等关联起来从而确定

收稿日期: 2022-11-07。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3105100); 浙江省财政预算项目(浙江海平面上升影响分析)。

作者简介: 李静(1983-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事海洋环境决策服务、海洋防灾减灾研究工作。E-mail: ffryjing@163.com

*通信作者: 张则飞(1983-), 男, 高级工程师, 硕士, 长期从事海洋观测与调查、海洋防灾减灾等领域研究工作。E-mail: 729119852@qq.com

的估算公式。主要基础公式如下:

$$q_* = a \exp(-bR_*) \quad (1)$$

$$q_* = aR_*^{-b} \quad (2)$$

式中: q_* 为无量纲平均越浪量,常被定义为 $\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}}$,

其中 g 为重力加速度, H_s 为有效波高; R_* 是无量纲相对超高,常被定义为 $\frac{R_c}{H_s}$,其中 R_c 为堤顶到静水面的

距离; a 、 b 为经验系数。

SAVILLE^[5]基于规则波开展了物理模型试验研究,测量了在各类斜坡堤的波浪爬高和越浪,积累了大量数据;OWEN^[6]基于光滑不透水简单斜坡堤越浪研究提出了无量纲平均越浪量公式,并推导了随坡度变化的经验系数,被广泛应用于工程中;VAN DER MEER^[7-8]更全面地分析了不同结构参数和波浪要素对越浪量的影响,如坡面糙率、有无护坡平台、是否发生浅水变形和是否为斜坡等,他提出的平均越浪量公式被整理编入2018年欧洲越浪手册(EurOtop-2018)和美国海岸工程手册(Coastal Engineering Manual, CEM)中;虞克等^[9]进行了斜坡堤越浪试验研究,讨论了相对超高和波浪陡度对越浪量的影响,给出了胸墙对单坡堤越浪量的折减系数及计算方法;王红等^[10]分别给出了斜坡堤坡比为1.5~3.0的经验系数,讨论了各类护面结构的影响系数,提出了相应的计算方法并整理编入国家《海堤工程设计规范》;陈国平等^[11]针对不规则波作用下斜坡堤越浪进行了大量的物理模型试验,综合试验数据,重点强调了波浪爬高和堤顶超高两个主要因子对越浪量的影响,并提出了较为简化的计算公式(该公式需先计算波浪爬高)。合田良实^[12]根据直立堤和水平混合式直立堤越浪量的试验研究绘制了越浪计算图表,并推算得到直立式海堤越浪量;俞聿修等^[13]在国内首次通过物理试验研究了直立堤上

不规则波的越浪量,研究结果表明长波的越浪量较大;BESLEY^[14]总结了以堤前水深系数区分破碎波影响的分段估算公式,分析了基床对直立堤越浪量的影响并给出了经验公式;ALLSOP等^[15]持续对直立堤前波浪破碎进行了详细研究,并重新讨论了区分破碎波的条件,认为破碎过程不仅对越浪量有影响,也会带来不同的灾害风险。国内外部分常用的越浪量计算公式如下:

①《海堤工程设计规范》对有无胸墙的单坡斜坡堤(见图1)给出了计算公式:

$$q = AK_A \frac{H_{1/3}^2}{T_p} \left(\frac{H_c}{H_{1/3}} \right)^{-1.7} \left[\frac{1.5}{\sqrt{m}} + \text{th} \left(\frac{d}{H_{1/3}} - 2.8 \right) \right] \ln \sqrt{\frac{gT_p^2 m}{2\pi H_{1/3}}} \quad (3)$$

$$q = 0.07 \frac{H'_c}{H_{1/3}} \exp \left(0.5 - \frac{b_1}{2H_{1/3}} \right) BK_A \frac{H_{1/3}^2}{T_p} \left[\frac{0.3}{\sqrt{m}} + \text{th} \left(\frac{d}{H_{1/3}} - 2.8 \right) \right] \ln \sqrt{\frac{gT_p^2 m}{2\pi H_{1/3}}} \quad (4)$$

式中: q 为平均越浪量(单位: $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$); A 、 B 为经验系数; K_A 为护面结构影响系数; $H_{1/3}$ 为有效波高; T_p 为谱峰周期; H_c 为无胸墙时堤顶与静水面的距离, H'_c 为有胸墙时顶部与静水面的距离; m 为坡度; b_1 为有胸墙时堤肩宽度; d 为堤前水深。

②陈国平公式主要适用单坡和复式斜坡堤。公式如下:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.08 \frac{R_s}{H_s} \exp \left(-3.5 \frac{R_c}{R_s} - 0.9 \frac{p}{R_c} \right) \quad (5)$$

式中: R_s 为累积率13%的波浪爬高; p 为胸墙高度; H_s 为有效波高; R_c 为堤顶与静水面的距离; g 为重力加速度。

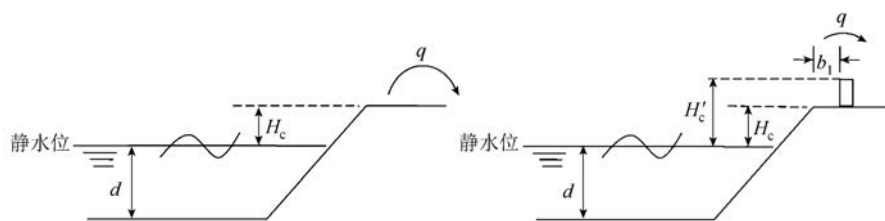


图1 堤顶无胸墙和有胸墙斜坡式海堤示意图

Fig.1 Schematic diagram of inclined seawalls with and without wave wall

③EurOtop-2018适用于多种斜坡式和直墙式海堤,越浪量计算公式按影响因素的不同划分比较详细,研究和设计人员可根据不同前置条件进行选择。主要基础公式为:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = a \exp \left[- \left(\frac{bR_c}{H_{m0}} \right)^c \right] \quad (6)$$

式中: R_c 为堤顶与静水面的距离, $R_c \geq 0$; H_{m0} 为波谱有效波高; a 、 b 、 c 为拟合系数。

研究人员对比分析了国内外斜坡堤越浪量的计算方法,并通过物理模型试验进行比较。杨克勤等^[16]认为 EurOtop 公式有较强的适用性;舒叶华等^[17]建议进行复式海堤计算时可综合比较 EurOtop II 公式和陈国平公式后进行选用;李社生等^[18]通过试验比较认为,相比于美国 CEM 方法、日本港口技术规范 (Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities, OCDF) 方法, EurOtop 方法能较准确地估计斜坡堤的越浪量,因此在国标适用条件外,推荐使用 EurOtop II 公式。针对直立堤的越浪量计算,俞聿修^[19]比较了多种方法,各公式计算得到的平均越浪量总体随波向角的增大而减小、随相对超高 R_c/H_s 的增大而减小;许荔等^[20]通过试验对比,认为可选用陈国平公式将坡度取为接近零的值来计算直立堤越浪量,效果良好;李晓亮^[21]对破碎波条件下的直立堤上越浪量进行试验对比,结果表明对周期和底坡坡度等因素的不同处理方式是导致估算出现差异的重要原因,合田良实公式比 EurOtop 方法更接近试验结果。

总体来说,因海堤等防护结构种类较多、波浪条件不同等原因,在运用经验公式进行越浪预测时,需要根据不同的断面形状、护面条件及其他影响因素,选取适合的平均越浪量计算公式用于堤防设计或风险评估等。

1.2 越浪数值模拟研究

由于越浪物理模型试验存在成本高、耗时、受场地和工况制约、比尺效应等问题,因此科学家也在不断探索新的越浪研究方法。随着计算机技术和数值方法的不断发展,数值模拟越来越多地应用于越浪研究,成为试验研究重要的补充工具。常用模型包括浅水方程模型、雷诺时均 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) 方程模型等,应用流

体体积 (Volume Of Fluid, VOF) 方法或光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 方法,基于 Fluent、OpenFOAM 等软件开展模拟研究。

基于非线性浅水方程, HU 等^[22]建立的 AMAZON 模型模拟了各类海岸结构工程的越浪过程,计算的越浪量结果与试验结果非常吻合,该模型比经验公式更灵活,比三维模型计算效率更高。SUZUKI 等^[23]研究了非静压时域波浪模拟 (Simulating Waves Till Shore, SWASH) 模型在浅滩不透水海岸结构越浪量估算方面的适用性,为了获得精确的平均越浪量,针对堤脚的入射波特性提出了一种修正方法,与物理试验数据相比, SWASH 模型能够对浅滩原型尺度下大于 $10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 的越浪量进行准确估计,同时还能预测瞬时越浪量。张杰等^[24]基于 SWASH 模型对长江口围垦工程的越浪进行模拟研究,模拟结果与实测值随时间变化的趋势一致,大小接近,与《海堤工程设计规范》计算相比,模拟结果更精确。在基于 Navier-Stokes (N-S) 方程的数值模型中, VOF 和 SPH 是两种主要的自由表面追踪法。SPH 方法是一种无网格拉格朗日方法,能够很好地处理自由表面形变的流动问题, SHAO 等^[25]提出一个不可压缩的 SPH 模型模拟规则波和不规则波在斜坡堤的越浪过程,敏感性分析显示了湍流模拟和空间分辨率的重要性; AKBARI^[26]对边界处表面颗粒的粘度进行了改进处理,能够更准确地模拟自由表面边界,模拟结果更可靠,越浪率更接近测量值。但是, SPH 方法存在计算量大、效率低的问题,相较而言基于 VOF 方法的模型计算成本更低,且能够准确捕捉自由表面的大变形运动,因此许多学者对 VOF 方法进行了大量研究。基于 RANS 方程和 VOF 法, LOSADA 等^[27]模拟了规则波和不规则波在斜坡堤上的越浪过程,与试验值相比,模型模拟得到的平均越浪量平均误差和均方根误差均小于经验公式计算值,且更适用于预测瞬时越浪量;周勤俊等^[28]在 Fluent 平台上实现了数值造波与消波,建立了二维数值波浪水槽并对规则波在海堤上的越浪过程进行了模拟,模拟值与试验值的偏差随模型比尺的增大和堤前波浪破碎强度的增强而增大;张九山等^[29]在此基础上,将多孔介质模型作为耗散源项加入动量方程中,发展了带异形块体

海堤的越浪过程数值模拟技术,确定了等效阻力系数,越浪量计算值与试验值相对误差在10%以内;刘亚男等^[30]对规则波在不可透性简单斜坡堤上的越浪过程进行了数值模拟,结果与HU等^[22]非线性浅水方程的数值结果相比,能更有效地模拟含有卷吸、射流和破碎的海堤越浪问题;董志等^[31]针对复式海堤开展了规则波和不规则波越浪研究,模拟结果与物理试验值都比较吻合,规则波模拟值较HU等^[22]的模拟值更接近物理模型结果,不规则波的模拟结果总体偏小;董志等还研究并分析了波浪与海堤相互作用的3个阶段,发现海堤除受到波浪的正面冲击力外,迎水面特别是堤脚附近还会受到退浪和上浪过程形成漩涡的淘刷作用;李东洋等^[32]基于OpenFOAM建立了三维数值波浪水槽,研究了正向入射不规则波与扭王块体护面斜坡堤的相互作用,模拟结果表明全尺度的数值波浪水槽可以较合理地描述复杂护面块体斜坡堤的越浪过程;CHEN等^[33]基于OpenFOAM建立了二维数值模型用于预测具有复杂结构和粗糙度的堤坝越浪,预测准确度与EurOtop手册中的经验公式准确度相当甚至更好,研究还分析了堤坝结构因素对减少越浪的影响,验证了模型良好的适用性。

1.3 基于机器学习算法的越浪量估算

随着神经网络等机器学习算法的兴起,研究人员也开展了相应研究,其中影响最为广泛的是欧洲CLASH项目。该项目通过许多独立项目和试验收集了大量数据并形成数据库,在此基础上,重点建立了人工神经网络模型。VAN GENT等^[34]基于CLASH项目数据库进行训练,开发了基于神经网络的预测方法,可用于多种类型的海岸结构的平均越浪量预测,而且还提供预测可靠性分析,预测结果准确,尤其是对于较大的越浪量表现更好,均方根误差约为0.29。ZANUTTIGH等^[35]建立的人工神经网络模型可用于预测沿海防护堤的波反射系数,具有良好的稳定性,平均均方根误差低于0.04。EurOtop-2018的神经网络计算工具基于上述及更多研究,包含超过17 000组试验数据,在预测能力和精度方面都得到改进,可预测平均越浪量、波浪透射系数及波浪反射系数。LEE等^[36-37]采用数据处理组合算法(Group Method of Data Handling, GMDH)

提出一个新的斜坡堤和直立堤越浪估算公式,测试结果显示该公式和EurOtop人工神经网络模型的准确度相似,比EurOtop经验公式更为准确。刘诗学等^[38]基于人工神经网络建立了单坡堤越浪量预测模型,该模型与试验结果有很强的相关性。胡原野等^[39]建立了以随机森林算法为基础的复坡堤越浪量预测模型,预测能力优于集成神经网络模型,该模型可以分析特征参数对预测精度的影响大小,为进一步筛选特征参数提供依据。郑健等^[40]建立了开孔沉箱防波堤反射系数的神经网络计算模型,计算结果与训练样本和检验样本总体符合良好,平均均方根误差小于0.1,相关系数超过0.86,相比已有经验公式,该模型不仅提高了计算精度,且扩大了适用范围。

3类越浪预测方法对比见表1。总体而言,在上述3种方法中,平均越浪量经验公式经过长期的研究,应用更普遍,最常用于结构设计,但经验系数的确定需经过反复试验,且难以分析形状复杂的防护结构;数值模拟和机器学习作为重要的补充工具,也是越浪预测的发展方向,尤其可用于风险评估和预警方面。机器学习模型可以对不同坡度、不同护面类型、混合堤等复杂断面进行计算,方便快捷,预报准确度更高,给出的置信区间可以对越浪量可能出现的范围进行初步估计,弥补了经验公式的不足,在海堤等前期设计阶段可以作为方案优化选择的辅助工具。数值建模可以高精度模拟特殊或复杂结构的越浪过程,能够详细分析各类要素对越浪过程的影响,适用于对结构设计细节要求更多的工程;但由于其物理环境和动力过程设置复杂,计算效率低,目前各类数值模型都有自身的局限性,不足以成为预测越浪的标准工具,但数值模拟仍有很大的发展前景。

2 允许越浪量标准

允许越浪量标准是防护结构工程设计和使用中需要考虑的重要因素之一,需要综合分析越浪量、海堤结构、后方人员设施等情况。在实际发生越浪的过程中,平均越浪量不能反应越浪的短期效应甚至瞬时效应,因此研究单个波浪产生的越浪量是必要的。单波越浪峰值体积(V_{\max} ,单位: m^3/m)可

表 1 3类越浪预测方法对比

Tab.1 Comparison of three types of methods for wave overtopping prediction

| 方法 | 途径 | 优点 | 缺点 |
|------|--------|-----------------------------|-------------------------|
| 经验公式 | 物理试验分析 | 使用广泛、可靠稳定、参数明确、易对比分析 | 成本高、耗时、具有比尺效应、结构类型和设置有限 |
| 数值模拟 | 计算机建模 | 可实现高精度模拟复杂结构,适用范围广,提供数据信息详细 | 计算资源需求高,参数设置复杂 |
| 机器学习 | 数据集训练 | 计算快捷、时效性强、操作方便 | 对数据库训练样本质量要求高,计算过程不透明 |

能对过往行人和车辆安全等造成更大的威胁,在设定允许越浪量标准时也作为重要衡量因素之一。某些情况下还需要考虑越顶流速和越顶厚度等因素^[41]。目前很多国内外规范中都规定了允许越浪量标准。

俞聿修^[42]对日本、荷兰、美国等相关规范中的允许越浪量标准进行综合对比,发现各标准主要基于堤防结构特点、堤上车辆速度、人员是否经过训练等差异可能造成的不同危害程度来对平均越浪量和单波越浪峰值体积进行可允许的标准划分,这对堤坝设计和越浪预警具有重要参考意义。夏运强等^[43]综合了国内外允许越浪量标准的规定,收集整理了工程实例和研究成果,根据防波堤和护岸的不同功能和不同使用时长要求,提出了适用于港口工程的允许越浪量标准建议值。耿宝磊等^[44]对中外港口相关规范中的海堤越浪量标准进行对比,认为考虑结构安全的允许越浪量最大,后方区域重要程度次之,考虑交通安全的允许越浪量最小;但他也强调“单波越浪可达平均越浪的百倍”,其破坏性不容忽视。

3 越浪风险预警研究

越浪风险主要来自两方面,一个是对堤防结构的冲击或渗透破坏,另一个是越过堤后对后方人员、设施等带来的破坏,以及由此造成的生命财产损失。因此,开展越浪风险评估研究并制定相应的标准或防御指南,对减轻越浪风险有重要意义。由于开展越浪预报、预警需要高分辨率的近海水位和波浪要素信息、海岸防护结构工程的最新参数,以

及考虑适合的模型或经验公式等,限制条件较多,因此很少针对越浪开展业务预报工作。但近年来,欧洲多地根据自身需求也逐步开展越浪风险预警。

DOS REIS^[45]和 SABINO 等^[46]开展了葡萄牙海岸越浪风险评估和预警研究,分别进行了近岸海浪要素获取、越浪计算、风险评估以及预警发布;越浪计算分为两种方式,即在港口内运用人工神经网络计算,在沿海则运用经验公式进行计算。ALVARELLOS 等^[47]建立了针对西班牙海岸的越浪监测系统,在获取历史数据和观测数据的基础上,利用人工神经网络进行训练,根据计算结果预测越浪的发生。STOKES 等^[48]设计了 SWEEP-OWWL 系统来开展越浪风险预警业务:首先通过数值模式(Delft3D/SWAN)预测水位和波浪参数,基于波浪参数和沿岸自然或防护工程参数,并利用 EurOtop-2018 选择适合的经验公式计算越浪量,最后根据预测值与允许越浪量计算得到越浪风险。该系统为英国西南部 1 000 km 海岸线提供 3 d 的越浪风险预警,准确率达到 97%,并能够区分低风险事件和高风险事件。ALISES 等^[49]提出了一种越浪风险评估方法,该方法综合考虑了危险事件发生概率、衡量受影响港口的脆弱性及经济成本,可将其整合到越浪风险管理框架中以应对港口安全问题。CAO 等^[50]针对沿海不透水斜坡堤和垂直堤,提出了一个风险评估框架来评估越浪对行人的风险,该风险框架考虑了海况、工程结构以及行人信息等,将风险量化为可能性和严重性的总和。另外,CHINI 等^[51]研究了在气候变化和海平面上升的背景下,越浪的发生频率及越浪量的变化。CHEN 等^[52]对水力和结构条件改变情况下可能增加的越浪风险进行了分

析研究,并提供了一种确定风险成本优化维护策略的工具。

4 结语和展望

本文系统性地分析了国内外现有的越浪预测方法、越浪风险评估和预警等研究工作。总体来说,越浪预测趋向更便捷、更准确的方法,针对不同的结构,可采用灵活的组合方式来提升预测的适用性和准确度。为了进一步减轻越浪可能造成的危害,有必要加强越浪风险评估,并推动越浪预警报业务的发展。具体总结及展望如下:

①无论是用于工程设计还是越浪预警,平均越浪量公式是目前应用最为广泛的工具,由于海堤等结构形式复杂,不同类型的公式涉及因素不尽相同,需要根据实际情况选择合适的工具。公式的更新完善以及各类相关参数的设置受物理试验数据质量等因素的制约和影响,因此仍需对其不断深入研究;多数越浪量计算公式没有考虑风的作用,未来需要通过有风条件和无风条件下进一步的数据来验证和量化风作用的影响。

②机器学习算法能够免于复杂的选择、计算快捷、操作方便,欧洲多地已经开始使用人工神经网络作为越浪预测工具。该方法需要大量的数据来支撑训练和验证,预测准确度在很大程度上取决于筛选的数据集的质量,目前国内这方面的研究和应用仍然开展较少。

③数值模拟是越浪研究的一个重要发展方向,已经有很多学者通过各类软件成功模拟了越浪过程,但在数值方法适用选择、边界条件等设置上还需进一步研究和探讨。目前数值模型的计算效率相对较低,且经验参数的设置需要经过充分的验证,因此可结合物理模型试验或机器学习算法进行优化选择,模拟一旦经过验证,能够成为更经济便捷的方案用于因自身局限性无法进行越浪试验和海防工程设计的研究中。

④我国应加强堤防结构形式和越浪试验资料的收集分类,并建立相应的数据库。由于我国海岸线长,地形地势存在较大差异,因此要调查分析不同地区、不同类型的沿海堤防结构,并与相似的越浪量试验进行对比分析,获取相适应的平均越浪量

计算公式;同时也可以为基于机器学习算法开展越浪预测提供数据基础。

⑤加强越浪风险研究,建立允许越浪标准。由于越浪造成的破坏可能取决于单波最大的越浪量,不能与平均越浪量完全对应,因此,在平均越浪量的研究基础上,加强对其他越浪因素的研究,例如考虑越浪率、单波越浪峰值体积、越顶速度和厚度等,并结合承灾体等信息进行风险评估,建立更为适用的允许越浪标准。

⑥开展越浪风险预警。越浪研究已经不局限于海堤等防护工程设计,开展越浪预警对保护堤后生命财产安全、加强沿海防灾减灾管理具有重要意义。欧洲多地都已建立越浪预警系统,主要利用海浪数值模式获取波浪参数,通过不同的越浪计算工具得到越浪量并进行风险评估来提供越浪风险预警,而我国在这方面还处于空白。随着气候变化等带来的威胁,越浪风险也在增加,因此有必要加强越浪预测技术研究,建立越浪预警系统。

参考文献:

- [1] QIANG Y J, HE J, XIAO T, et al. Coastal town flooding upon compound rainfall-wave overtopping-storm surge during extreme tropical cyclones in Hong Kong[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2001, 37: 100890.
- [2] VAN DER MEER J W, ALLSOP N W H, BRUCE T, et al. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures[EB/OL]. 2018. <http://www.overtopping-manual.com>.
- [3] US Army Corps of Engineers, Coastal engineering manual, Eng. Man (2002), 1110-2-1100.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 51015-2014 海堤工程设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 51015-2014 Code for design of sea dike project[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [5] SAVILLE T. Laboratory data on wave run-up and overtopping on shore structures[M]. Washington: U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 1955.
- [6] OWEN M W. Design of seawalls allowing for wave overtopping [R]. Wallingford: Hydraulics Research Station, 1980.
- [7] VAN DER MEER J W, JANSSEN J P F M. Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments[M]. Delft: Delft Hydraulics, 1994.
- [8] VAN DER MEER J W, JENTSJE. Wave run-up and overtopping [M]//PILARCZYK K W. Dikes and Revetments: Design, Maintenance and Safety Assessment. The Netherlands, 1998: 145-

- 160.
- [9] 虞克, 余广明. 斜坡堤越浪试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1992(3): 211-219.
- YU K, YU G M. Experimental study of overtopping volume on sloping breakwater[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1992(3): 211-219.
- [10] 王红, 周家宝, 章家昌. 单坡堤上不规则波越浪量的估算[J]. 水利水运科学研究, 1996(1): 58-63.
- WANG H, ZHOU J B, ZHANG J C. Estimating of irregular wave overtopping quantities on single sloping[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1996(1): 58-63.
- [11] 陈国平, 周益人, 严士常. 不规则波作用下海堤越浪量试验研究[J]. 水运工程, 2010(3): 1-6.
- CHEN G P, ZHOU Y R, YAN S C. Test study on wave overtopping under irregular wave action[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(3): 1-6.
- [12] 合田良实. 港工建筑物的防浪设计[M]. 刘大中, 孙巨才, 译. 北京: 海洋出版社, 1984.
- GODA. Wave-proof design of port structures[M]. LIU D Z, SUN J C, translation. Beijing: China Ocean Press, 1984.
- [13] 俞聿修, 魏德彬. 不规则波越浪量的实验研究[J]. 海岸工程, 1992, 11(1): 1-12.
- YU Y X, WEI D B. Experimental study on irregular wave overtopping quantities[J]. Coastal Engineering, 1992, 11(1): 1-12.
- [14] BESLEY P. Wave overtopping of seawalls, design and assessment manual[R]. Wallingford: HR Wallingford Ltd, 1998.
- [15] ALLSOP W, BRUCE T, PEARSON J, et al. Wave overtopping at vertical and steep seawalls[J]. Maritime Engineering, 2005, 158(3): 103-114.
- [16] 杨克勤, 路卫卫. 国内外斜坡式海堤平均越浪量计算方法的对比分析[J]. 水运工程, 2014(6): 17-20.
- YANG K Q, LU W W. Comparative analysis of calculation methods for mean overtopping on sloping dike[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(6): 17-20.
- [17] 舒叶华, 徐宇航, 谢先坤. 复式海堤结构越浪量计算方法比较[J]. 水运工程, 2019(5): 27-31, 36.
- SHU Y H, XU Y H, XIE X K. Comparison of calculation methods for overtopping discharge of composite seawall structure[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(5): 27-31, 36.
- [18] 李社生, 陈家渺. 国内外斜坡式防波堤越浪量计算方法比较[J]. 水运工程, 2019(8): 34-40.
- LI S S, CHEN J M. Comparison of calculation methods for overtopping of armored rubble slopes at home and abroad[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(8): 34-40.
- [19] 俞聿修. 直立堤上平均越浪量计算方法的比选[J]. 港工技术, 2011, 48(3): 1-3, 22.
- YU Y X. Comparison and selection of methods to calculate mean wave overtopping on vertical seawall[J]. Port Engineering Technology, 2011, 48(3): 1-3, 22.
- [20] 许荔, 陈国平, 严士常, 等. 护岸越浪量的试验研究[J]. 水运工程, 2013(9): 36-40.
- XU L, CHEN G P, YAN S C, et al. Test study on wave overtopping at revetment[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(9): 36-40.
- [21] 李晓亮. 破碎波条件下直立堤平均越浪量试验研究[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 445-451.
- LI X L. Experimental study of mean discharge of wave overtopping on vertical seawall under the condition of breaking waves[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(3): 445-451.
- [22] HU K, MINGHAM C G, CAUSON D M. Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the non-linear shallow water equations[J]. Coastal Engineering, 2000, 41(4): 433-465.
- [23] SUZUKI T, ALTOMARE C, VEALE W, et al. Efficient and robust wave overtopping estimation for impermeable coastal structures in shallow foreshores using SWASH[J]. Coastal Engineering, 2017, 122: 108-123.
- [24] 张杰, 丁亮. 长江口围垦工程越浪数值模拟研究[J]. 水运工程, 2015(5): 22-25.
- ZHANG J, DING L. Numerical simulation of wave overtopping of reclamation engineering at Yangtze River estuary[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(5): 22-25.
- [25] SHAO S D, JI C M, GRAHAM D I, et al. Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model[J]. Coastal Engineering, 2006, 53(9): 723-735.
- [26] AKBARI H. Simulation of wave overtopping using an improved SPH method[J]. Coastal Engineering, 2017, 126: 51-68.
- [27] LOSADA I J, LARA J L, GUANCHE R, et al. Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters[J]. Coastal Engineering, 2008, 55(1): 47-62.
- [28] 周勤俊, 王本龙, 兰雅梅, 等. 海堤越浪的数值模拟[J]. 力学季刊, 2005, 26(4): 629-633.
- ZHOU Q J, WANG B L, LAN Y M, et al. Numerical simulation of wave overtopping over seawalls[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2005, 26(4): 629-633.
- [29] 张九山, 吴卫, 王本龙, 等. 带异形块体海堤越浪的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展A辑, 2006, 21(5): 572-578.
- ZHANG J S, WU W, WANG B L, et al. Numerical simulation of overtopping over seawall with dolos[J]. Journal of Hydrodynamics Ser A, 2006, 21(5): 572-578.
- [30] 刘亚男, 郭晓宇, 王本龙, 等. 基于RANS方程的海堤越浪数值模拟[J]. 水动力学研究与进展A辑, 2007, 22(6): 682-688.
- LIU Y N, GUO X Y, WANG B L, et al. Numerical simulation of wave overtopping over seawalls using the RANS equations[J]. Journal of Hydrodynamics Ser A, 2007, 22(6): 682-688.
- [31] 董志, 关大玮, 苗青, 等. 复式海堤上规则波和不规则波越浪数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(3): 112-118.
- DONG Z, GUAN D W, MIAO Q, et al. Numerical simulation of

- regular and irregular waves overtopping on composite section sea-dike[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(3): 112-118.
- [32] 李东洋, 张庆河, 焦方骞. 不规则波作用下斜坡堤越浪的数值模拟[J]. *水道港口*, 2018, 39(1): 25-30.
- LI D Y, ZHANG Q H, JIAO F Q. Numerical simulation of overtopping of sloping breakwater under irregular wave[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2018, 39(1): 25-30.
- [33] CHEN W, WARMINK J J, VAN GENT M R A, et al. Numerical modelling of wave overtopping at dikes using OpenFOAM[J]. *Coastal Engineering*, 2021, 166: 103890.
- [34] VAN GENT M R A, VAN DEN BOOGAARD H F P, POZUETA B, et al. Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures[J]. *Coastal Engineering*, 2007, 54(8): 586-593.
- [35] ZANUTTIGH B, FORMENTIN S M, BRIGANTI R. A neural network for the prediction of wave reflection from coastal and harbor structures[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 80: 49-67.
- [36] LEE S B, SUH K D. Development of wave overtopping formulas for inclined seawalls using GMDH algorithm[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(5): 1899-1910.
- [37] LEE S B, SUH K D. Derivation of wave overtopping formulas for vertical walls using GMDH algorithm[C]//*Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts*. Hanoi, Vietnam: Springer, 2020.
- [38] 刘诗学, 王收军, 陈松贵, 等. 基于人工智能的单坡式防波堤越浪量评估方法研究与应用[J]. *水道港口*, 2019, 40(5): 541-546, 587.
- LIU S X, WANG S J, CHEN S G, et al. Research and application of artificial intelligence based method for overtopping assessment of straight slopes[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2019, 40(5): 541-546, 587.
- [39] 胡原野, 王收军, 陈松贵, 等. 基于随机森林的复坡堤越浪量预测研究[J]. *海洋学报*, 2021, 43(10): 106-114.
- HU Y Y, WANG S J, CHEN S G, et al. Overtopping prediction for composite slope breakwater based on random forest method[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(10): 106-114.
- [40] 郑健, 张黎邦, 刘勇. 基于深度神经网络的开孔沉箱反射系数计算方法研究[J]. *水道港口*, 2020, 41(5): 511-519.
- ZHENG J, ZHANG L B, LIU Y. Study on calculation method of reflection coefficient for perforated caissons based on deep neural network[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2020, 41(5): 511-519.
- [41] KOOSHEH A, ETEMAD-SHAHIDI A, CARTWRIGHT N, et al. Individual wave overtopping at coastal structures: a critical review and the existing challenges[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 106: 102476.
- [42] 俞聿修. 海岸工程的允许越浪量[J]. *港工技术*, 2009, 46(1): 1-3.
- YU Y X. Tolerable overtopping limits at coastal structures[J]. *Port Engineering Technology*, 2009, 46(1): 1-3.
- [43] 夏运强, 李贺青, 沈如军. 港口工程允许越浪量标准分析研究[J]. *海洋工程*, 2013, 31(6): 104-109.
- XIA Y Q, LI H Q, SHEN R J. Discussion on permissible overtopping discharge limit in harbor engineering[J]. *The Ocean Engineering*, 2013, 31(6): 104-109.
- [44] 耿宝磊, 王咪, 陈汉宝, 等. 中外港口规范对比研究 II: 海堤越浪量标准[J]. *水道港口*, 2019, 40(4): 397-403.
- GENG B L, WANG M, CHEN H B, et al. Comparison of domestic and foreign port standard Part II: sea wall overtopping[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2019, 40(4): 397-403.
- [45] DOS REIS M T L G V, POSEIRO P G G, ESPINOSA C J, et al. Risk management in maritime structures[M]//XU J P, CRUZ-MACHADO V A, LEV B, et al. *Proceedings of the Eighth International Conference on Management Science and Engineering Management*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014.
- [46] SABINO A, POSEIRO P, RODRIGUES A, et al. Coastal risk forecast system[J]. *Journal of Geographical Systems*, 2018, 20(2): 159-184.
- [47] ALVARELLOS A, PEÑA E, FIGUERO A, et al. Neural network overtopping predictor proof of concept[C]//*Proceedings of the 14th International Work-Conference on Artificial Neural Networks*. Cadiz, Spain: Springer, 2017.
- [48] STOKES K, POATE T, MASSELINK G, et al. Forecasting coastal overtopping at engineered and naturally defended coastlines[J]. *Coastal Engineering*, 2021, 164: 103827.
- [49] ALISES A, MOLINA R, GÓMEZ R, et al. Overtopping hazards to port activities: application of a new methodology to risk management (POrt Risk MAnagement Tool) [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 123: 8-20.
- [50] CAO D P, TAN W K, YUAN J. Assessment of wave overtopping risk for pedestrian visiting the crest area of coastal structure[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 120: 102985.
- [51] CHINI N, STANSBY P K. Extreme values of coastal wave overtopping accounting for climate change and sea level rise[J]. *Coastal Engineering*, 2012, 65: 27-37.
- [52] CHEN H P, MEHRABANI M B. Lifetime wave overtopping risk analysis of sea defences subjected to changing operational conditions[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 97: 464-479.

Review and prospect of studies on wave overtopping prediction

LI Jing^{1,2}, ZHANG Zefei^{3,4*}, DING Xuelin^{3,4}, ZHU Yong^{3,4}, XIA Dongdong^{1,2}

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. Marine Academy of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, China; 4. Key Laboratory of Ocean Space Resource Management Technology, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract: This paper reviews available methods for prediction of wave overtopping and researches on early warning of wave overtopping risk. In general, various empirical formulae based on physical model tests are widely used to predict the mean overtopping discharge. In recent years, numerical modeling and machine learning algorithms such as artificial neural networks have also been developed and used. Besides, quantitative analysis and assessment of overtopping risk have also been paid more attention. Finally, this paper proposes the importance of establishing overtopping forecast and risk early warning system in coastal risk management.

Key words: overtopping discharge; overtopping prediction; risk analysis; early warning system