



防波堤及护岸越浪研究综述*

刘二利¹, 耿宝磊², 齐作达²

- (1. 宁波大榭招商国际码头有限公司 宁波市大榭开发区 D 港区, 浙江 宁波 315812;
2. 交通运输部天津水运工程科学研究院, 港口水工建筑技术国家工程实验室,
工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 近年来防波堤越浪方面的相关研究, 分别在越浪影响因素、越浪量计算公式推导论证、越浪数值模拟与越浪量标准 4 个方面进行归纳总结。已有成果表明: 1) 越浪影响因素的研究多是集中于常规因素, 包括波高周期, 堤顶高程, 坡肩宽度, 护面块体, 而对水流、风速、波浪谱以及水的性质等其他因素研究相对较少; 2) 越浪量计算公式研究中主要集中在影响越浪量因素和越浪量公式比选以及公式推导 3 个方面; 3) 在数值模拟方面, 研究多以 RANS 方程、RNG $k-\varepsilon$ 的湍流模型、VOF 方法为基础, 运用 FLUENT 等成熟软件对越浪过程进行模拟或进行越浪量预测, 神经网络等机器学习算法也越来越多地使用在越浪量的数值模拟中; 4) 随着以上研究的深入, 越浪标准也开始逐步完善, 适用性得到了一定加强。

关键词: 越浪; 防波堤, 护岸, 综述

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0019-08

A review of research on overtopping of breakwater and revetment

LIU Er-li¹, GENG Bao-lei², QI Zuo-da²

(1. China Merchants International Container Terminals Ningbo, Daxie Co., Ltd., Ningbo 315812, China;

2. Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology, Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications, Tianjin 300456, China)

Abstract: Through collecting and sorting out the relevant researches on breakwater overtopping in recent years, this paper summarizes the influence of overtopping factors, the deduction and demonstration of overtopping calculation formula, overtopping numerical simulation and overtopping standard. The existing results show that: most of the factors of overtopping are focused on the study of conventional factors, including wave height period, dike top elevation, slope shoulder width and armor block, while the study of other factors such as flow, wind speed, wave spectrum and water properties is relatively less; the study of overtopping calculation formula mainly focuses on three aspects: the factors affecting overtopping, the comparison and selection of overtopping formula, and the derivation of formula. In the aspect of numerical simulation, RANS equation and RNG model are mostly used Based on $k-\varepsilon$ turbulence model and VOF method, fluent and other mature softwares are used to simulate the overtopping process or predict the overtopping amount. Machine learning algorithms such as neural network are more and more used in the numerical simulation of overtopping amount. With the deepening of the above research, the overtopping standard has gradually improved, and the applicability has been strengthened to a certain extent.

Keywords: overtopping; breakwater; revetment; review

收稿日期: 2021-03-08

*基金项目: 天津市交通运输科技发展计划项目(2021-12); 交通运输部天津水运工程科学研究院科技创新基金项目(TKS20200406)

作者简介: 刘二利(1978—), 男, 工程师, 从事码头管理工作。

通讯作者: 耿宝磊(1980—), 男, 博士, 研究员, 从事波浪理论及波浪与结构物作用研究。E-mail: tksengbaolei@163.com

海岸工程建筑物中,防波堤及护岸主要用于抵御外海波浪、潮流的冲刷和冲击,对保护海岸和保障港内水面平稳起到了重要作用。当波浪爬升高度超过堤顶高程时会产生越浪。防波堤及护岸的越浪一直是海岸工程中的重点问题,巨大的越浪会对海岸造成破坏,甚至会对海岸后方其他设施的稳定甚至人民的生命财产安全造成威胁,因此越浪量研究具有重要意义。

随着越浪量研究的发展,目前研究人员已经可以定量解析越浪量。越浪量是指波浪作用在海堤上,水体上爬后越过堤顶的水量,单位时间、单位堤宽上越过的水量称为平均越浪量,是确定海堤和护岸等海岸建筑物堤顶高程的重要水力学参数,对建筑物的经济适用性和建筑物的自身安全都有很大影响。

20 世纪 70—80 年代以来,许多学者对该问题进行了大量研究,分别从直立堤和斜坡堤等不同类型的护岸建筑入手,并取得了丰硕成果,这些研究可概括为以下几个方面:1)研究影响越浪量的因素;2)推导与论证越浪量计算公式;3)数值模拟越浪量;4)研究海岸工程允许越浪量。

1 影响越浪的因素

防波堤及护岸的越浪量受到诸多因素影响,对越浪量的研究始于对越浪影响因素的分析。影响越浪量的主要因素^[1-2]有堤的断面形状(堤顶高度 R_c 、海侧堤面坡比 m 、护面结构、堤顶宽度 b 、海底低坡 i)、波浪参数(有效波高 H_s 、谱峰周期 T_p 、波向角 β 、方向分布宽度、波浪频谱)、水的性质(密度、黏性、温度、可压缩性)、堤前水深 d 、水流、风速、比尺效应和重力加速度 g 。

1.1 波浪要素的影响

波高是影响越浪的主要因素,有学者在研究越浪量时涉及到了波高因素。贺朝敖等^[3]针对带胸墙的斜坡堤,对影响越浪量的几个主要因素(波高、波陡、相对水深等)进行了较系统的试验和讨论,提出了计算越浪系数的经验公式。许凡等^[4]通过波浪断面物理模型试验方法,研究波高、波

陡变化对斜坡堤越浪量的影响规律,比较了 4 种不同护面形式的消浪效果。朱昭力等^[5]通过物理模型试验发现直立堤波浪爬高主要与波高有关并成线性关系,受到周期影响较小。王聪等^[6]通过斜坡堤物理模型试验,研究不规则波作用下波高因素对越浪量的影响,得出了随波高增加爬坡水体可以获得更多能量、越浪量逐渐增大的结论。因此,波高成为影响越浪的主要因素是因为其与波能密切相关,波高增大时波能增大并引起较大的波浪爬高,或者在防波堤上发生破碎释放更大的能量,导致越浪更为严重。

周期是影响越浪量的另一个重要因素。陈汉宝等^[7]通过二维水槽试验研究了长周期涌浪对越浪量的影响,比较了试验结果和不同公式的计算值,引入与深水波陡有关的因子,对长周期条件下越浪量计算公式进行了修正。刘堃等^[8]以深圳机场第三跑道海堤设计断面为研究对象,通过物理模型试验,分析了波浪周期与波浪爬高等因素和越浪量之间的关系。

还有学者对波浪影响越浪的其他因素进行了研究。张晋勋等^[9]以马尔代夫机场岛护岸工程为例,得出堤顶越浪量随相对礁缘水深增加而增加的结论。高峰等^[10]通过三维物理模型试验,在不同方向及重现期波浪作用下,对全尺寸防波堤进行三维稳定性与越浪量测试,与二维波浪水槽试验结果对比,发现越浪量存在明显差异。张金牛等^[11]进行了孤立波作用下斜坡堤越浪试验研究,验证了无量纲的孤立波越浪量随来波相对波高增大而增加的结论。

1.2 防波堤结构因素

国内外众多学者从防波堤结构对越浪进行了研究,其中对堤顶超高、堤顶宽度研究较多,堤顶高程对越浪影响更为显著。邵杰等^[12]通过波浪水槽试验发现了防浪墙顶超高对越浪量影响最为显著,越浪量随相对防浪墙顶超高增大呈现较明显的指数递减关系。许荔等^[13]通过物理模型试验分析了防浪墙顶超高和平台相对宽度等因子对越浪量的影响规律。常江等^[14]通过物理模型试验分

析了堤顶宽度对越浪量的影响规律，给出了堤顶宽度对越浪量衰减系数的影响关系式，得出了堤顶宽度对越浪量影响机理。周雅等^[15]通过波浪断面物理模型试验发现堤顶超高对越浪量的影响最大，随着相对堤顶超高增大越浪量呈指数递减。在堤顶超高对越浪的影响方面，朱昭力等也得出无因次越浪量随相对堤顶超高增加呈指数递减的结论。

除堤顶高程超高外，防波堤其他构造也会对越浪产生影响。陈铭辉等^[16]研究了不规则波作用下坡肩和平台护面类型对越浪量的影响，建议将护面块体布置在波浪上爬区以减小越浪量。陈波等^[17]以珠澳口岸人工岛填海工程海堤为研究对象，结合物理模型试验对海堤越浪量进行优化设计，发现挡浪墙顶高程提高、防浪墙前肩台宽度增加和防浪墙弧形断面优化 3 个因素中，前两个对越浪量影响更加明显。柳玉良等^[18]通过波浪断面物理模型试验发现利用护面块体消散波能减小越浪，比采用胸墙阻挡波浪越顶效果要好。栾英妮等^[19]对护岸断面的 6 个方案进行越浪量和稳定性物理模型试验，分析影响越浪的因素，研究发现护岸越浪量大小不仅要考虑挡浪墙前的坡肩宽度影响，还要考虑坡肩宽度与挡浪墙高度之间的比值关系。L.Martinelli 等^[20]通过开展不规则波作用下带有下弯胸墙的直立堤越浪试验，发现试验测量的越浪量与现有预测公式具有良好的一致性，并且得到了随着胸墙出口角增加越浪量显著减小的结论。

综上所述，尽管防浪墙顶超高对越浪量影响最为显著，但还要注意其他结构的设计才可以增大对越浪量的控制，其中护面块体对于消减波能有明显效果，而且坡肩宽度和消浪墩也都会对越浪产生较大影响。另外，与波浪因素相比，防波堤结构因素对越浪的影响可以人为控制，因此可以对其重点研究，尤其要加强新型结构的开发。

1.3 其他因素影响

除了波浪要素和防波堤结构因素以外，还有其他因素也影响防波堤的越浪。T. Lykke Andersen 等^[21]通过碎石堤试验比较探究了比尺效应对防波堤越

浪的影响。

目前影响越浪的因素多是集中于常规因素的研究，包括波高周期、堤顶高程、坡肩宽度，其他因素研究相对较少，例如水流风速、波浪谱以及水的性质，为了能够更加系统全面探究外部条件对越浪的影响，有必要加强对影响越浪其他因素的探究。

2 越浪量计算公式推导与论证

目前许多学者对越浪量公式进行了研究，包括影响越浪的因素、越浪量公式的比选以及越浪公式研究方法 3 个方面。

越浪公式中有许多物理量都涉及到了影响越浪的因素，在影响因素的层面上对越浪公式进行推导和研究是最基础的分析方法，并且公式能够更加明显地体现这些因素与越浪之间的数量关系，从而为越浪量计算提供明确的理论依据。俞聿修等^[22]基于试验成果给出了斜向和多向不规则波作用于直立堤上的平均越浪量的计算公式，该公式考虑了较多的影响因素，如相对堤高、波浪方向、波浪方向分布和相对水深等，与试验结果拟合较好，可供工程设计参考使用。陈国平等^[23]通过二维断面试验研究了不规则波作用下海堤越浪量，指出采用波浪爬高和堤顶超高 2 个主要因子可较好反映越浪量变化规律，且堤顶超高对越浪量的影响非常敏感，越浪量随堤顶超高的降低呈指数增大，进而运用多元线性回归方法拟合得到反映多种影响因素的平均越浪量计算公式，称为陈国平公式。Wang D. T. 等^[24]通过积分物理模型试验，重点研究斜坡堤顶部波浪方向与越浪量之间的关系，并进行了分析和讨论，提出不规则波下平均越浪量的修正公式。朱嘉玲等^[25]总结国内外平均越浪量的相关计算公式，通过整体物理模型试验重点分析和讨论了波浪入射方向与斜坡堤堤顶越浪量的关系，并提出修正的越浪量计算公式。李晓亮等通过三维物理模型试验研究了在斜坡堤上斜向和多向不规则波在非破碎条件下的平均越浪量与波参数及堤参数的关系，考察因素包括堤顶

高度、海侧堤面坡度、不规则波有效波高、谱峰周期、方向分布宽度以及堤前水深,最终给出适用于混凝土护面和扭工字块体护面斜向和多向不规则波的平均越浪量估算公式。安蒙华等^[26]通过物理模型试验对超标准水动力条件下带胸墙斜坡堤的越浪量及越浪流特性进行研究,基于规则波的试验数据,建立了相对堤顶超高、相对墙顶超高以及相对胸墙高度与越浪量之间的经验关系公式。

还有许多学者在越浪公式的比较和选择方面进行了研究,他们根据不同工程情况通过对公式的比选,提出最佳越浪量计算公式,其中 van der Meer 公式适用范围比较广泛,另外 Eurotop 越浪公式和陈国平公式也在相关领域应用较多,这两个公式涉及到的因素较多、对于复杂断面越浪估算与物理模型结果较为接近。俞聿修^[27]列举了几个斜坡堤上的越浪量的计算方法,包括英国水利研究站(HR)方法、《海港水文规范》方法、Hebsgaard 公式、van der Meer 方法和大连理工大学方法,通过比较单向不规则波正向作用和入射波向对越浪量的影响,发现单向不规则波中上述各方法计算的平均越浪量变化趋势相同,如果考虑到斜向波等多因素影响并有较高安全性要求,建议采用 van der Meer 公式。杨克勤等^[28]介绍了国外常用 EurOtop(2007)平均越浪量的计算方法,结合国内《海港水文规范》及国内专家学者提出的计算方法进行对比分析,并通过实际工程案例情况进行验证比较,得出了 EurOtop(2007)关于斜坡式海堤平均越浪量计算方法考虑的影响因素更加全面、更具参考价值的结论。郑利涛^[29]以毛里塔尼亚 Tanit 渔港防波堤工程为例,进行长周期波越浪量的计算分析,推荐采用 pedersen 公式计算。张博文等^[30]通过横沙东滩促淤圈围五期工程允许越浪原型观测试验,运用图表统计、因子分析和无量纲化的方法,对 van der Meer 公式和海堤工程设计规范公式所考虑的各类因素进行分析和比选,发现 van der Meer 公式计算越浪量的值较实测值偏小,海堤工程设计规范公式计算值与实测值较为吻合。王聪将现有计算越浪量公式值与实际物模试验值

进行比较,提出了越浪量计算方法,推荐使用陈国平公式和 van der Meer 公式进行斜坡堤的越浪量计算。舒叶华等^[31]分析国内外常见的复式海堤结构的越浪量计算方法,比较不同结构形式下的复式海堤物理模型试验数据,推荐采用 Eurotop II 和陈国平公式计算复式海堤结构的越浪量。

还有学者通过其他方法对越浪公式进行推导。刘晓等^[32]通过非冲击波对防波堤作用的试验研究建立了射孔沉箱平均越浪的可靠预测公式,对多孔沉箱结构的水力设计研究具有一定的参考价值。Molines Jorge 等^[33]基于海岸结构顶部评估(CLASE)神经网络越浪预测方法,提出了一种新的 16 参数越浪估计器(Q6),将 Q6 与其他传统的越浪公式进行比较,得出 Q6 预测误差最小而且 Q6 描述了输入变量和越浪量之间明确关系的结论。Seok Bong Lee 等^[34]采用 GMDH 算法和新的 Eurotop 数据集,推导出新的倾斜海堤机器学习公式,与其他经验公式相比,GMDH 公式具有更高精度。

3 越浪量数值模拟

数学模型是研究越浪量必不可少的工具,数学模型具有理论性强、成本低、效率高等优点。国内外许多学者在数值模拟方面对越浪量进行研究,并取得了丰硕的成果,常用的数学模型有 RANS 方程、RNG $k-\varepsilon$ 的湍流模型、VOF 方法等。可用于数学模型分析的软件主要有 FLUENT 软件等。

在对越浪的数值模拟中,使用较多的是建立二维或三维数值波浪水槽,也有人使用其他模型对越浪过程进行模拟,还有人将数值模拟结果与物理模型试验结果进行对比,验证数学模型的准确性。李东洋等^[35]基于 OpenFOAM 建立三维数值波浪水槽并模拟了波浪正向入射情况下斜坡堤的越浪,模拟结果表明平均越浪量的计算值与试验结果吻合较好。王鹏等^[36]基于线性波理论,采用 VOF 法、RNG $k-\varepsilon$ 的湍流模型,通过 FLUENT 软件建立了可供实际应用的海堤上波浪爬高与越浪数值计算模型,验证了数值模拟结果。刘亚男

等^[37]基于 FLUENT 软件，运用一种“解析松弛”方法建立了数值波浪水槽，验证数值波浪水槽总体上可以较好地预报越浪量。邹国良等^[38]通过采用域内造波、消波并结合波前静压假定的破碎模型，进行了越浪量数值计算，计算结果表明非静压模型可合理地描述斜坡上的堤后越浪量。Amin Fathi 等^[39]采用光滑粒子水动力学 (SPH) 方法研究孤立波在 SBW 上的波浪爬高和越浪，根据试验结果验证了规则波-SBW 相互作用下的 SPH 模型模拟效果，结果表明，改进后的数值模型与试验数据吻合较好。Shinichiro Onda 等^[40]建立了一个三维数值模型来模拟溃堤过程中的越浪和渗流，计算结果表明模型能较好地再现越浪过程。Tuan Thieu Quang 等^[41]采用非线性浅水 (NLSW) 模型和雷诺平均 Navier-Stokes (RANS) 方程，研究低垂向顶墙防波堤的波浪越浪特性，对规则波和不规则波进行越浪试验，验证了模型的准确性。王欢欢等^[42]基于 LS-DYNA 软件建立二维模型，对防波堤在最高潮位下的冲击越浪过程进行了模拟，并与物理模型试验结果进行对比。叶晓文^[43]基于 CSPM 法和黎曼解修正的 SPH 方法建立了主动吸收式二维数值波浪水槽，研究波浪沿斜坡堤爬坡和越浪过程的水动力特性。

在数值模拟方面，同样要考虑影响越浪的因素，通过数学模型可以在理论上更加清晰明了地探究越浪因素对越浪的影响。黄宁等^[44]利用 FLUENT 软件，基于黏性不可压缩流体的雷诺时均 $N-S$ 方程和 $k-\epsilon$ 湍流模型，采用有限体积法对控制方程进行离散、建立数学模型，分析了平台宽度和斜坡坡度对越浪量的影响，比较数值模拟结果和前人物模试验结果，二者趋势一致，基本吻合。李晓亮^[45]通过建立数值模型模拟斜向和多向不规则波在斜坡堤上爬高和越浪的过程，重点考察了波向角和方向集中度对越浪量的影响。吴辰等^[46]基于非静压波浪数学模型模拟规则波及不规则波在光滑不可渗斜坡堤上的越浪过程。郭立栋等^[47]利用数值方法对斜坡堤越浪量影响因素进行了分析，指出相对胸墙高度对越浪量系数具有十

分显著的影响，它们之间存在指数反比关系。Jin Qiaoling 等^[48]基于能量平衡方程，考虑了波的折射、绕射、反射和破碎等因素，将波浪透射和越浪模块转化为基于能量平衡方程的多方向随机波变换波模型。曾婧扬等^[49]运用基于 RANS 方程、VOF 方法以及 GORING 造波方法建立二维数值波浪水槽，进行了孤立波在简单斜坡堤上越浪过程的数值模拟，通过数值模拟，研究不同相对堤顶宽度及不同相对波高条件下对孤立波越堤流基本特征。

还有学者利用数学模型评估和预测越浪，这也是越浪数学模型一个重要的应用领域，可以预先获取越浪的关键参数，因此在防波堤护岸防护方面具有重大意义。Fluixa-Sanmartin Javier 等^[50]基于大坝水库系统的基本水文和水力特征提出一种评估大坝最大越浪概率的简便工具，确定越浪是一种主要的破坏模式而且评估了降低越浪概率方面的影响。M. Salauddin 等^[51]通过物理模型试验研究了带板岩前缘的平面竖直海堤的越浪量，在试验结果基础上，提出一套新的预测公式，并与文献中已有的冲击和非冲击波条件下垂直海堤预报方法进行比较。ErOtop^[52]中还提到用神经网络 (ANN) 预测越浪，ANN 属于一种较为智能的工具，在使用之前需要进行模型训练，可以把已有的越浪数据输入 ANN 中，经过训练后能够预测越浪数据。

4 越浪量标准

防波堤越浪对堤后设施产生的影响非常重要，过高的越浪量会对堤后设施造成严重破坏，因此越浪量需要控制在合理范围内，国内外出台了很多关于防波堤允许越浪量的标准和规范。允许越浪量的设计需要考虑多方面因素，包括港内泊稳、堤后次生波、堤后路面正常使用以及人民生活 and 财产安全等因素。贺朝敖等为了便于衡量越浪程度，根据试验的资料将堤分为 4 类：不越水堤、少量越水堤、越水堤和潜水堤，给出了各类堤的越浪状态、相对墙高及越浪量范围，建议在制定护岸

允许越浪量标准时参考。俞聿修^[53]根据国内外对海岸工程的两种允许越浪量(平均越浪量和单波越浪量)的研究,分析并论述了日本、荷兰、美国和欧洲等相关规范中对允许越浪量的界定和研究。陈国平等^[54]根据越浪量对堤后不同防护措施下的冲刷破坏情况,提出了允许越浪量标准。陈波等在港珠澳大桥珠海口岸人工岛填海工程海堤设计中,为安全可靠地降低防浪墙高程,分析了国内外规范对越浪量标准的界定,结合物理模型试验检验了拟定不同工况的允许越浪量标准。夏运强等^[55]通过综述国内外现行规范(标准)和研究成果以及工程试验案例,对越浪量标准的制定原则和量值进行研讨,推荐了适合港口工程水工建筑物的允许越浪量标准。

5 结语

1) 针对影响越浪量因素的研究许多文献重点论述了波高、周期、波浪类型以及堤顶超高、堤顶宽度、护面类型、防波堤的结构形式等因素对越浪的影响,通过物理模型试验可以很好地验证以上因素对越浪的影响,其中堤顶超高、防浪墙高度对越浪的影响较为明显。然而,就目前影响越浪的因素研究现状来看,许多学者都从波浪条件和防波堤自身结构方面研究影响因素,尤其以防波堤自身结构因素居多,然而其他因素涉及较少,例如风速、水流、水的相关性质和比尺效应等因素可作为未来越浪研究的切入点。

2) 目前防波堤越浪量计算公式较多,涉及到不同的条件与因素,有不少学者通过试验验证公式的合理性,并通过修正相关参数使其满足实际情况。由于越浪计算公式与影响越浪的因素紧密相关,因此深入研究这些因素对越浪公式的推导具有重要意义。

3) 数学模型在越浪量研究的应用中已经比较成熟,从国内外研究现状来看,大多数学者能够利用相关软件和算法来模拟波浪水文条件进行越浪相关模拟和计算,并且能够开展物理模型试验验证其合理性和有效性。此外越浪的预测研究也

有所突破,目前神经网络(ANN)是最具代表性的预测工具,但是,预测越浪的数学模型种类不是很多,而且对越浪的预测多是集中于外文文献,国内相关文献较少,因此开发预测越浪的数学模型是很有必要的。

4) 已有学者总结了越浪标准,越浪标准对防波堤的设计和建造具有重要的指导意义,同时对堤后的使用区域也具有保护作用。越浪标准与影响越浪的因素密切相关,所以深入研究这些因素,尤其是改进并优化防波堤的结构对减小越浪具有重要的作用。越浪标准也不是一成不变的,随着越浪的深入研究,越浪的标准也会更加完善、更加具有适用性。

参考文献:

- [1] 李晓亮,俞聿修,赵凤亚,等.斜向和多向不规则波在斜坡堤上的平均越浪量的试验研究[J].海洋学报(中文版),2007(1):139-149.
- [2] 范红霞,周益人.海堤越浪量及后坡越浪流研究进展[J].水运工程,2008(8):14-19.
- [3] 贺朝敖,任佐皋.带胸墙斜坡堤越波量的试验研究[J].海洋工程,1995(2):62-70.
- [4] 许凡,林福裕,陈国平,等.斜坡堤越浪量试验研究[J].水运工程,2018(4):33-37.
- [5] 朱昭力,柯维林,陈国平,等.不规则波作用下带挑檐直立堤爬高与越浪量试验[J].水运工程,2019(4):21-24.
- [6] 王聪,陈国平,严士常,等.不规则波作用下斜坡堤越浪量试验研究[J].水运工程,2017(2):49-52.
- [7] 陈汉宝,陈松贵,周加杰,等.斜坡堤在涌浪作用下的越浪量试验研究[J].港工技术,2015,52(5):22-25.
- [8] 刘堃,陈哲淮,唐云,等.低桩承台直立结构波浪爬高与越浪量[J].水运工程,2018(9):38-41.
- [9] 张晋勋,刘清君,李道松,等.岛礁地形护岸工程越浪研究[J].施工技术,2019,48(3):1-3.
- [10] 高峰,雷华,张慈珩,等.随机波浪作用下的防波堤三维稳定性及越浪量试验研究[J].水运工程,2015(10):50-56.
- [11] 张金牛,吴卫,刘桦,等.孤立波作用下斜坡堤越浪量的实验研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2014,29(6):656-662.
- [12] 邵杰,王永举,张芝永.斜坡式海堤结构尺度对越浪量

- 的影响研究[J].人民长江,2018,49(6):88-91.
- [13] 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.
- [14] 常江,柳淑学,李金宣,等.斜坡堤堤顶宽度对越浪量影响的试验研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2014,29(5):544-551.
- [15] 周雅,林登荣,李庆银,等.不规则波作用下斜坡堤越浪量试验研究[J].水道港口,2016,37(4):331-335.
- [16] 陈铭辉,周益人.斜坡堤坡肩及平台护面类型对越浪量的影响[J].水运工程,2013(3):45-47.
- [17] 陈波,谢乔木,孙大洋.港珠澳大桥珠海口岸人工岛填海工程海堤越浪量的优化设计[J].水运工程,2015(2):213-218.
- [18] 柳玉良,张华昌,夏运强,等.某斜坡堤工程消浪措施效果的试验分析[J].水运工程,2015(9):79-83.
- [19] 栾英妮,刘海源,聂晓彤.斜坡式护岸断面越浪量及稳定性试验研究[J].中国水运(下半月),2014,14(6):364-366.
- [20] MARTINELLI L, RUOL P, VOLPATO M, et al. Experimental investigation on non-breaking wave forces and overtopping at the recurved parapets of vertical breakwaters[J]. Coastal engineering, 2018, 141(11): 52-67.
- [21] ANDERSEN T L, BURCHARTH H F, GIRONELLA X. Comparison of new large and small scale overtopping tests for rubble mound breakwaters[J]. Coastal engineering, 2011, 58(4): 351-373.
- [22] 俞聿修,赵凤亚,李晓亮,等.斜向和多向不规则波对直立堤平均越浪量研究[J].海洋工程,2007(3):32-39.
- [23] 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.
- [24] WANG D T, JU L H, ZHU J L, et al. Experimental study on mean overtopping of sloping seawall under oblique irregular waves[J]. China ocean engineering, 2017, 31(3): 350-356.
- [25] 朱嘉玲,王震,陈凌彦,等.斜向波作用下斜坡堤平均越浪量的试验研究[J].水运工程,2016(5):9-13.
- [26] 安蒙华,蒋勤.超标准潮波作用下越浪量及越浪流特性研究[J].中国港湾建设,2017,37(6):11-16.
- [27] 俞聿修.斜坡堤上平均越浪量计算方法的比较[J].港工技术,2011,48(1):1-4.
- [28] 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.
- [29] 郑利涛.长周期波越浪量分析[J].中国水运(下半月),2018,18(4):124-125.
- [30] 张博文,薛鹏宇.原型观测试验下平均越浪量的计算公式[J].水运工程,2019(2):15-21.
- [31] 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.
- [32] 刘晓,刘勇.直立堤平均越浪量计算方法对比[J].水运工程,2015(6):37-41.
- [33] MOLINES J, MEDINA J R. Explicit wave-overtopping formula for mound breakwaters with crown walls using clash neural network-derived data[J]. Journal of waterway port coastal & ocean engineering, 2015, 142(3): 1-13.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 王鹏,孙大鹏,吴浩.海堤上波浪爬高与越浪计算分析[J].海洋工程,2011,29(4):97-102.
- [37] 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(6):682-688.
- [38] 邹国良,张娜,马进荣,等.基于非静压模型的港内波浪传播变形模拟[C]中国海洋学会海洋工程分会.第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下).南京:中国海洋学会海洋工程分会,2015:106-111.
- [39] FATHI A, KETABDARI M J. Modeling of emerged semi-circular breakwater performance against solitary waves using SPH method[J]. Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering, 2018, 40(6): 1-14.
- [40] ONDA S, HOSODA T, NENAD M, et al. Numerical modelling of simultaneous overtopping and seepage flows with application to dike breaching[J]. Journal of hydraulic research, 2019, 57(1): 13-25.
- [41] TUAN T Q, THIN N V. Numerical study of wave overtopping on sea-dikes with crown-walls[J]. Journal of hydro-environment research, 2014, 8(4): 367-382.
- [42] 王欢欢,杨勋,葛鸿辉,等.基于混合模型的核电站防波堤越浪冲击研究[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(3):574-585.
- [43] 叶晓文.斜坡式防波堤越浪过程的SPH模拟[D].大连:大连理工大学,2011.

[44] 黄宁, 孙大鹏, 吴浩. 模拟斜坡堤上越浪量一种新的数值模式[J]. 水道港口, 2014, 35(6): 567-572.

[45] 李晓亮, 俞聿修. 斜坡堤上斜向和多向不规则波越浪量的数值研究[C] 中国海洋学会海洋工程分会. 第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册). 南京: 中国海洋学会海洋工程分会, 2009: 489-493.

[46] 吴辰, 张庆河, 张金凤, 等. 基于非静压方程的斜坡堤越浪数值模拟[J]. 港工技术, 2014, 51(6): 1-6.

[47] 郭立栋, 孙大鹏, 黄明汉, 等. 斜坡堤越浪量影响因素的数值研究[J]. 中国港湾建设, 2014(8): 1-4.

[48] JIN Q L, DONG S M. Modelling wave transmission and overtopping based on energy balance equation[J]. Journal of ocean university of China, 2018, 17(5): 1033-1043.

[49] 曾婧扬, 吴卫, 刘桦. 孤立波斜坡堤堤顶及后坡越浪流数值分析[J]. 力学季刊, 2013, 34(2): 181-190.

[50] JAVIER F S, LUIS A G, ADRIÁN M T, et al. Empirical tool for the assessment of annual overtopping probabilities of dams[J]. Journal of water resources planning and management, 2019, 145(1): 1-12.

[51] SALAUDDIN M, PEARSON J M. Wave overtopping and toe scouring at a plain vertical seawall with shingle foreshore: A physical model study[J]. Ocean engineering, 2019, 171(1): 286-299.

[52] PULLEN T, ALLSOP N W H, BRUCE T, et al. Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment Manual[M]. Hamburg: Boyens Medien GmbH, 2007.

[53] 俞聿修. 海岸工程的允许越浪量[J]. 港工技术, 2009, 46(1): 1-3.

[54] 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.

[55] 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.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 18 页)

参考文献:

[1] 刘必劲. 开敞式码头系泊船舶运动量、系缆力和撞击能量研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

[2] 周丰, 姜俊杰. 离岸深水港码头泊稳条件关键技术研究[J]. 水运工程, 2011(11): 117-120.

[3] 沈雨生, 周益人. 不同波浪和装载条件下系泊船舶横摇运动试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2018, 33(3): 364-369.

[4] 史宪莹, 张宁川. 混合浪作用下系泊船舶运动响应规律试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2011, 26(5): 574-580.

[5] 马小剑, 孙昭晨, 刘思, 等. 群性波列作用下系泊船舶的水动力响应数值模拟[J]. 船舶力学, 2015, 19(7): 797-809.

[6] 陈奇. 长周期波浪作用下的大型船舶系泊特性研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2014.

[7] 李越. 长周期波浪对船舶系泊稳定影响的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

[8] 孟祥玮, 高峰, 李焱. 波周期对系泊条件影响的数学模型研究[C] 中国海洋学会海洋工程分会. 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(中). 北京: 海洋出版社, 2011: 174-178.

[9] DHI group. MIKE 21 maritime-frequency response and mooring analysis, scientific documentation [R]. Copenhagen: DHI group, 2019.

[10] MADSEN P A, MURRAY R, SRENSSEN O R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics[J]. Coastal engineering, 1991, 15(4): 371-388.

[11] BINGHAM H. B. A hybrid Boussinesq-panel method for predicting the motion of a moored ship[J]. Coastal engineering, 2000, 40(1): 21-38.

(本文编辑 王璁)