

风暴潮期间水位变化条件下的海堤越浪量研究

张旭, 杨亚婷

(黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475000)

摘要: 风暴潮期间的水位变化会引起海堤结构相对超高的动态变化,因此需要针对现有的恒定水位条件下越浪量计算公式进行改进。通过FLUENT软件模拟真实风暴潮水文条件下的越浪过程,分析变水位条件下波浪谱的变化特征;在此基础上,对现有的Eurotop(2018)越浪量公式进行修正,建立了适用于变水位条件的相对等效超高越浪量计算公式,拓展了Eurotop(2018)公式的适用范围并提高了其计算精度。

关键词: 风暴潮;变水位;越浪量;数值模拟

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)01-0064-07

0 引言

风暴潮是沿海地区的主要自然灾害之一,会给海岸防御体系带来严重破坏,同时给人民生命、财产和环境造成重大损失。近年来,由于全球气候变化,沿海出现极端高水位的频次增加,热带气旋风速不断增大^[1],沿海地区将面临更高频率和更大强度的风暴天气,在这样的强风暴潮天气条件下,会产生更显著的风暴增水和近海波浪。海平面上升和风暴增强的双重效应相互叠加,增加了极端海浪和极端风暴潮发生的可能性^[2]。

波浪平均越浪量 q 是堤防工程中常用来评价堤防结构水力性能的参数。 q 在很大程度上取决于入射有效波高 H_{m0} 与水面超高 R_c 的比值(见图1),即相对超高(R_c/H_{m0}),其中 R_c 定义为堤顶高程和海平面静水位(Static Water Level, SWL)之差。SWL发生变化时,会直接影响越浪水位超高,从而导致越浪量发生变化,特别是风暴潮期间,SWL始终处于动态变化的过程中,整体越浪过程十分复杂。

实验数据集经验公式是计算越浪量最简单有效的方法,尤其在展现对不同波浪和海堤型式参数以及越浪过程物理方面的特性时,显得尤为简洁。

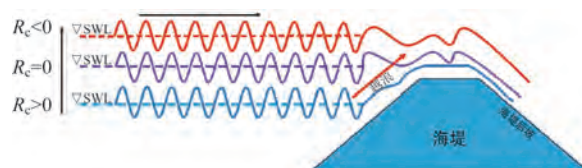


图1 水位变化条件下海堤越浪过程

Fig.1 Process of wave overtopping of seawall under changing water levels

例如,GODA^[3]和OWEN^[4]对斜坡式的越浪过程进行了初步研究,基于有限数量的有效参数推导出了简单的经验公式。自此,众多学者对海堤越浪量计算公式进行了探究,如VAN DER MEER等^[5]和BESLEY^[6]开展了大量波浪水槽实验,对现有的越浪量经验公式进行了改进;在欧盟的CLASH项目中,STEENDAM等^[7]收集了超过10 000个越浪量数据,对数据规模、物理模型和实验室效果进行了详细评估;同时VAN DER MEER等^[5]利用CLASH数据库研究了波浪破碎对平均越浪量的影响,并提出了基于Iribarren破碎标准的海堤越浪量公式,该公式在Eurotop(2018)上发布;SCHÜTTTRUPF等^[8]针对海堤出水高度为零($R_c = 0$)时的特定情形研究了海堤的平均越浪量,并提出了计算公式。2005

收稿日期: 2023-11-03。

基金项目: 河南省自然科学基金(242300420041)。

作者简介: 张旭(1990-),男,助教,硕士,主要从事水利工程方面的研究。E-mail:2927757837@qq.com

年,大西洋“卡特里娜”飓风期间出现了负超高的越浪现象($R_c < 0$),即波浪溢流现象,针对这一特殊现象,HUGHES等^[9]在几何比尺为25:1的梯形截面海堤模型上,开展了一系列波浪溢流水槽试验,确立了较准确的波浪溢流水动力过程;LI等^[10]通过分析大型水槽试验结果,得到了后坡材料为不透水碾压混凝土的波浪溢流量拟合曲线,并考虑了波浪溢流的主导性问题;PAN等^[11]则对负超高条件下的海堤波浪溢流越浪量特征进行了描述,确定了单个越浪量Weibull函数相关参数的计算公式。

由于物理实验受限于现实条件,难以对水位变化进行深入研究,导致变水位条件下的越浪过程研究难以实现。本文将通过数值模拟的方法,对斜坡式光滑海堤堤前水位变化对波浪平均越浪量 q 的影响进行研究,旨在使现有的经验公式可以更广泛地适用该条件下的水力和几何参数,从而提高现阶段海堤越浪量公式的精确度和适用性。

1 数值水槽的建立与验证

1.1 模型的基本参数和流体体积法

本文使用有限体积法对结构化网格进行时间和空间上的离散,进而求解空气和水两相流的Navier-Stokes方程。本文采用的数值波浪水槽和海堤模型见图2,基本参数为:水槽长度50.5 m,高度1.8 m,海堤高度0.4 m,前坡坡度1:4.25,后坡坡度1:3。为了深入研究波浪与海堤之间的相互作用,对数值水槽进行精细的网格划分,全局网格为0.025 m,而壁面和堤顶的边界层网格为0.010 m。在数值水槽中,边界条件设置如下:水槽上方设为压力出口边界,底部设为壁面边界,左端作为用户自定义函数(User-Defined Functions,UDF)输入速度入口边界,右端包括自由出流边界。这个模型旨在深入研究波浪溢流与海堤之间的相互作用,因此

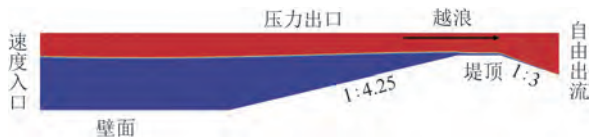


图2 数值波浪水槽局部图

Fig.2 Schematic diagram of numerical wave overtopping flume

特别关注海堤表面的水动力特征。

流体体积法(Volume of Fluid,VOF)模型是一种在多相流体动力学研究中广泛使用的数值模型,旨在捕捉不同相(如液体和气体)之间的清晰界面。该模型基于质量守恒方程,通过跟踪每个相在离散空间中的体积分,精确模拟流体界面的形状和运动。在波浪数值水槽中,VOF模型可以模拟液体-气体界面,以及波浪传播和波浪-结构相互作用的复杂情况。本文采用VOF多相流模型计算网格中每个单元中各相的比例(体积分)。计算公式为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

式中: \mathbf{U} 为 u 、 v 、 w (3个不同方向的速度分量)组成的速度场; t 为流动时间; α 为水的体积百分比,取值范围为0~1,即当网格中全为水时 $\alpha=1$,全为空气时 $\alpha=0$ 。利用体积分可以计算出混合物在每个网格单元内的密度,混合物的密度估计为:

$$\rho = \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a \quad (2)$$

式中: ρ_w 和 ρ_a 分别为水和空气的密度; ρ 为水气混合物的密度。

1.2 紊流模型和参数设定

重整化群 k - ε (Re-normalization group k - ε ,RNG k - ε)湍流模型是一种改进的标准 k - ε 湍流模型,旨在更准确地描述流体的湍流特性,最早由YAKHOT等^[12]提出,基于重整化群方法来改进湍流模型,使其对湍流流动的模拟更为精确。相较于标准的 k - ε 模型,RNG k - ε 模型更适用于模拟复杂湍流流动,特别是涉及大面积流体运动和流线弯曲较大的情况。这一改进模型在描述湍流的非线性行为方面更为准确,因此在高精度湍流模拟中得到广泛应用,如波浪与海堤相互作用模拟、风工程和涡流建模等领域。其湍流模型数学表达式为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_k \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

式中: G_k 是由平均速度梯度引起的湍动能产生; t 为流动时间; α_k 和 α_ε 分别为湍流能和耗散率有效普朗特数的倒数; $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为经验参数, 分别取 1.42 和 1.68; k 为湍动能; ρ 为流体密度; ε 为湍动能耗散率; μ 为粘性系数; μ_t 为涡粘性; μ_{eff} 为雷诺粘性系数; C_μ 为经验参数, 取 0.09; u_i 为速度分量张量; x_j 为空间位置张量。

1.3 模型的验证

在对数值模型进行验证时, 边界条件的选择和计算参数的设定都会对造波效果产生影响。通过比较数值自由表面高程与物理实验的时间序列变化过程, 可以验证数值模型造波的准确性。为简洁起见, 选取了 PAN 等^[11]物理实验数据案例 Trial3 的波浪条件, 以获得波浪数值模型对不同波浪要素和水位条件下不规则波浪再现能力, 选取的 Trial3 波浪条件为深水条件下的不规则波, 波谱采用 JONSWAP 谱, 谱峰升高因子 $\gamma=3.3$, 使用三点法对波浪进行入反射分离。数据根据数值模型中波浪充分发展生成的模拟时间对应的 0~80 s 入射波面高程时间序列得到。图 3 为数值波浪水槽模型模拟出的波浪波形和 PAN 物理试验波浪波形的对比图, 两者较为一致。

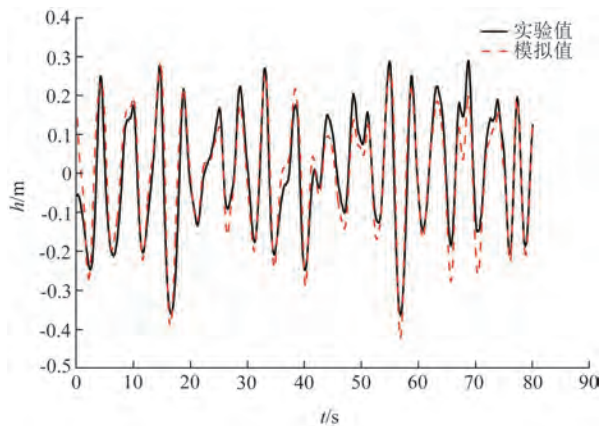


图3 数值波浪水槽与PAN实验值波浪波形的对比

Fig.3 Comparison of wave waveforms of numerical wave sink and Pan experimental value

通过将数值模型计算的单宽累积越浪量与实验测量的单宽累积越浪量进行比较(见图4), 评估

了 Fluent 模型模拟海堤越浪量的能力。在对数值模型验证时, 边界条件的选择和计算参数的设定都会对造波效果产生影响。从图4可以看到, 数值模型和物理模型结果的一致性很好, 数值模拟波高的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为 0.72, 单宽累积越浪量变化过程与实验值也十分吻合, 单宽累积流量随时间变化的 RMSE 为 0.84。结果表明, 数值模型能较好地再现波浪的传播过程。总体而言, 数值模型能够准确地再现入射不规则波(包括波的传播和性质), 因此可以认为, 数值模型能够预测复杂海堤越浪量的整体变化过程。

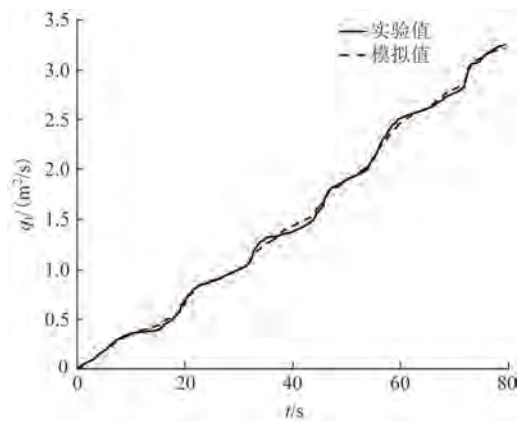


图4 数值水槽单宽越浪量与PAN实验值随时间变化情况对比
Fig.4 Comparison of the single-width wave crossing volume of the numerical sink with the experimental value of Pan with time

2 堤前水位变化对海堤越浪量的影响

海堤断面参数和波浪要素会直接影响越浪量大小。最直观的参数表现形式为相对超高(R_c/H_{m0}), 直接反应了海堤与波浪之间的作用关系。本文针对风暴潮期间的波浪增水过程进行研究, 在此过程中需要了解水位变化是否对波浪要素造成改变, 为此, 设定波浪要素条件为有效波高 $H_s=0.10$ m, 有效周期 $T_p=1.70$ s, 初始的堤前超高为 0.3 m。设置水位以 0.008 3 m/s 的速度上升, 研究水位变化过程中波浪要素的变化情况。在对波浪分析后需要对波浪要素的变化情况进行剥离。为了进行波浪的入反射分离, 并推导出变水位条件下的入射波况, 必须去除信号中由于水位变化引起的波浪漂移, 因

此首先需对数值水槽中的多个采集点无波浪条件下的水位变化进行检测,获得各个测点的水位变化,再通过加入波浪条件下的水位变化,并扣除无浪条件下的水位变化,从而获得波浪引起的水位变化及其扣除水位变化的波浪波形,结果见图5。

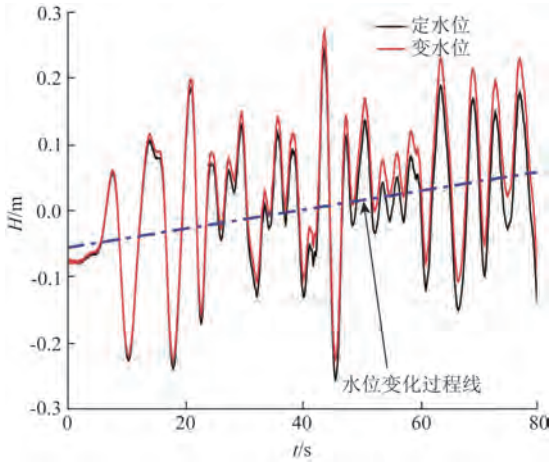


图5 变水位和定水位条件下波高的变化

Fig.5 Changes of wave height under variable water level and constant water level

从图5可以看出,在水位变化条件下,波浪要素的变化十分微小,更多的改变可能出现在波浪传递的过程中,由于时间变化,波浪出现反“浅水变形”,即波浪在堤前浅水变形的效应不断下降,从而降低了波高的变化范围,但是变化过程十分微弱,主要是由于与海浪堤前水深变化时间相比,波浪的传播速度时间过于短促,水深变化0.1 m,波浪有效波高 $H_s=0.106$ m,有效周期 $T_p=1.678$ s。在这种尺度下可以认为在水深变化的条件下,波浪要素不发生改变,波浪的能量分布更加平均,波浪要素导致的越浪过程可能变化不大(见图6)。针对上述分析结果,可以认为海堤超高 R_c 减小是导致海堤越浪量改变的主要原因。因此我们计算和统计了不同波浪要素条件下水位变化过程的越浪量,表1为变水位数值模拟条件下的越浪组次。

本文将海堤水位变化的时间定为波浪充分发展后的60 s,对海堤水位变化条件下数值模拟得到的越浪量与通过Eurotop(2018)的计算值进行比较。Eurotop(2018)计算公式由VAN DER MEER等提出,公式广泛用于工程设计,其基于大量的试验数

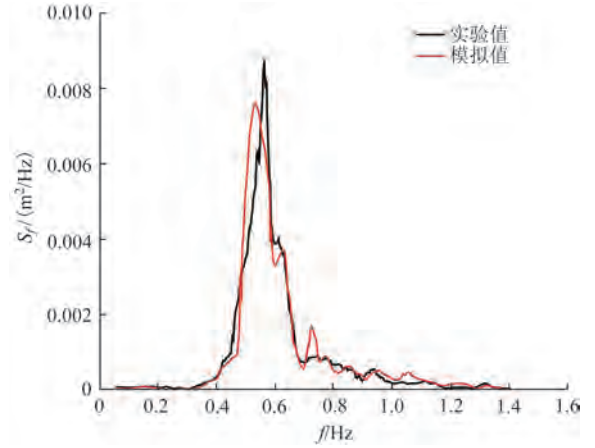


图6 变水位和定水位条件下波浪谱的对比

Fig.6 Comparison of wave spectra under variable water level and fixed water level

据分析得到,通过Iribarren数(ξ_p)区分破碎波与非破碎波。

对破碎波($\xi_p < 2$)有:

$$Q_v = \frac{q_w}{\sqrt{gH_s^3}} \frac{\sqrt{\tan \alpha}}{\xi_p} = 0.06 \exp \left(-5.2 \frac{R_c}{H_s \xi_p \gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} \right) \quad (7)$$

对非破碎波($\xi_p > 2$)有:

$$Q_v = \frac{q_w}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.2 \exp \left(-2.6 \frac{R_c}{H_s \gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} \right) \quad (8)$$

式中: Q_v 为无量纲越浪量; q_w 为单宽越浪量; α 为外坡坡角; γ_r 为与表面摩擦力相关的回归系数; γ_b 为与外坡平台相关的回归系数; γ_h 为与堤前水深相关的回归系数; γ_β 为与波浪入射角度相关的回归系数; ξ_p 为基于谱峰周期计算的破波参数数; g 为重力加速度; R_c 为堤前超高; H_s 为有效波高。在计算过程中,为了对比越浪过程的变化情况,海堤越浪量中的超高选取为增水过程中的初始超高 R_{c0} ,再计算无量纲平均越浪量与相对超高的关系,结果见图7。

由于水位的增加,海堤越浪量有所增加,尤其在水位超高 R_c 较小时,越浪量可达到Eurotop(2018)计算公式的1.5~2.0倍,公式严重低估了越浪量,即在变水位情况下,不透水斜坡结构利用式(7)预测的越浪量与实际差距很大。在大超高 R_c 越浪条件下,海堤越浪量虽有所增加,但增加幅度并不明显,因为在较大的相对超高下,海堤爬高受海堤型式的

表1 数值模拟越浪组次

Tab.1 Numerical simulation overtopping events

模拟组次	初始超高 R_{c-0}/m	最终水位 $R_{c-\text{end}}/\text{m}$	有效波高 H_s/m	相对超高(-)	水深变化 $\Delta h/\text{m}$
WS-1	0.30	0.295	0.050	5.900	0.005
WS-2	0.30	0.290	0.100	2.900	0.010
WS-3	0.30	0.285	0.125	2.280	0.015
WS-4	0.30	0.280	0.150	1.866	0.020
WS-5	0.30	0.250	0.200	1.250	0.050
WS-6	0.20	0.195	0.050	3.900	0.005
WS-7	0.20	0.190	0.100	1.900	0.010
WS-8	0.20	0.185	0.125	1.480	0.015
WS-9	0.20	0.180	0.150	1.200	0.020
WS-10	0.20	0.150	0.200	0.750	0.050
WS-11	0.10	0.095	0.050	1.900	0.005
WS-12	0.10	0.090	0.100	0.900	0.010
WS-13	0.10	0.085	0.125	0.680	0.015
WS-14	0.10	0.080	0.150	0.530	0.020
WS-15	0.10	0.050	0.200	0.250	0.050
WS-16	0.05	0.045	0.050	0.900	0.005
WS-17	0.05	0.040	0.100	0.400	0.010
WS-18	0.05	0.035	0.125	0.280	0.015
WS-19	0.05	0.030	0.150	0.200	0.020
WS-20	0.05	0	0.200	0	0.050

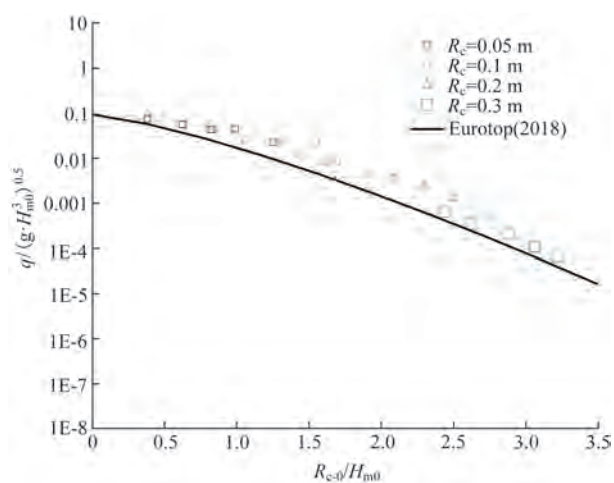


图7 不同超高条件下无量纲越浪量变化情况

Fig.7 Changes of dimensionless wave crossing under different ultra-high conditions

影响较大,堤前水位变化相对于海堤超高而言,其作用被明显弱化。因此 Δh (增水高度,即 $R_{c-\text{end}} - R_{c-0}$) 与 R_c 的相对关系是影响海堤变水位条件下越浪量的重要参数。

3 考虑水位变化的平均越浪量计算公式

对于变水位情况下导致的海堤越浪量变化情况,为了使 Eurotop(2018) 的使用范围更广,计算精度更高,需要对式(7)中相对超高 (R_c/H_{m0}) 进行等效处理,并对公式的计算范围进行确定。从上述的研究中可以发现,海堤堤防前的增水效果可能与海堤的断面型式也有关,如前坡坡度和堤脚水深。为了简化参数的设定,针对本文提出的几何设置和波浪

条件,在式(2)中不考虑波浪周期、结构坡度和水深的影响。基于上一节的研究结果可知,水位变化并没有改变波浪的基本要素,只是调整了海堤越浪前的堤前水位,因此,改进的公式不需要对波浪参数进行修正。经过多次计算尝试,确立了海堤等效相对超高公式。具体形式为:

$$(R_c/H_s)_{\text{equal}} = \frac{R_{c-0}}{H_s} + 1.05 \exp\left(\frac{R_{c-0}}{\Delta h}\right)^{0.32} \quad (9)$$

式中: R_{c-0} 为初始超高; H_s 为有效波高; Δh 为增水高度; $(R_c/H_s)_{\text{equal}}$ 为等效相对超高。将越浪量数值计算结果和改进后的结果进行对比(见图8),在较大的相对超高范围内,即 $R_c/\Delta h < 1.3$ 时,等效相对超高的计算结果较Eurotop(2018)的结果有所提高,但是相对误差仍超过10%;当 $R_c/\Delta h > 1.3$ 时,公式计算值和模拟值的相对误差不超过5%,可以有效用于大超高和低水位变化的风暴潮海堤越浪现象中。因此,可以确定公式适用于 $1.3 < R_c/\Delta h < 5.5$ 即水位变化较小的斜坡堤,且相对超高需满足 $0.25 < R_c/H_s < 1.2$ 。

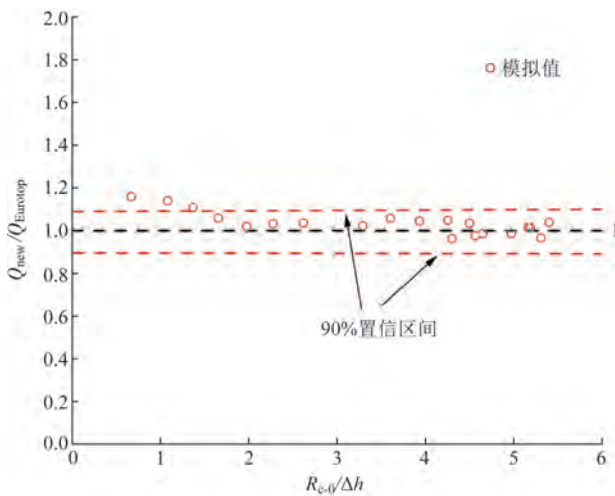


图8 公式越浪量计算值与模拟值比值随相对变化水深的变化

Fig.8 The new formula of the change of water depth with relative change of the ratio of the calculated value of the wave volume to the simulated value

4 结论

本文建立了波浪二维数值模型,对不规则波和越浪过程进行了再现模拟,验证了模型的正确性,并对变水位条件下越浪过程中的波浪要素和越浪

量进行了分析。结论如下:

①在水深变化条件下,波浪要素基本保持不变,主要由于波浪传播时间较水位变化时间小得多,因此可以忽略水深变化的影响。海堤超高 R_c 的减小是导致海堤越浪量发生变化的主要原因。

②水位增加会导致海堤越浪量增加,尤其是在水位超高 R_c 较小时,越浪量可能达到Eurotop(2018)计算公式的1.5~2.0倍,公式严重低估了越浪量。在大超高 R_c 越浪条件下,海堤越浪量增加,但增加幅度不明显,表明参数 Δh 与超高 R_c 之间的相对关系是影响海堤变水位条件下海堤越浪量的重要因素。

③在Eurotop(2018)越浪量公式的基础上,建立等效相对超高 $(R_c/H_{m0})_{\text{equal}}$ 计算公式,并确立了公式的使用范围和计算精度,为变水位变化条件下海堤越浪量的计算提供了方法。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 582.
- [2] American Society of Civil Engineers Hurricane Katrina External Review Panel. The New Orleans hurricane protection system: What went wrong and why[M]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2007: 92.
- [3] GODA Y. Expected rate of irregular wave overtopping of seawalls [J]. Coastal Engineering in Japan, 1971, 14(1): 43-51.
- [4] OWEN M W. Design of seawalls allowing for wave overtopping [R]. Hydraulics Research Station Wallingford, 1980.
- [5] VAN DER MEER J W, JANSSEN J P F M. Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments[R]. Delft Hydraulics, 1994.
- [6] BESLEY P. Wave overtopping of seawalls, design and assessment manual[R]. Research & Development Technical Report W178, 1999.
- [7] STEENDAM G J, VAN DER MEER J W, VERHAEGHE H, et al. The international database on wave overtopping[C]//Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering. Lisbon: World Scientific, 2004: 4301-4313.
- [8] SCHÜTTRUPF H, MÖLLER J, OUMERACI H, et al. Effects of natural sea states on wave overtopping of seadikes[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis. San Francisco: ASCE, 2001: 1565-1574.
- [9] 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.
- [10] LI L, PAN Y, AMINI F, et al. Full scale study of combined wave

- and surge overtopping of a levee with RCC strengthening system [J]. Ocean Engineering, 2012, 54: 70-86.
- [11] PAN Y, KUANG C P, LI L, et al. Full-scale laboratory study on distribution of individual wave overtopping volumes over a levee under negative freeboard[J]. Coastal Engineering, 2015, 97: 11-20.
- [12] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization-group analysis of turbulence[J]. Physical Review Letters, 1986, 57(14): 1722-1724.

Study on changes in wave overtopping volume of seawalls under variable water level conditions during storm surge events

ZHANG Xu, YANG Yating

(Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475000, China)

Abstract: During storm surges, variations in water levels lead to dynamic changes in the relative freeboard of sea dike structures, necessitating improvements to the existing wave overtopping discharge formulas designed for constant water levels. To address this, this study uses FLUENT software to simulate wave overtopping processes under realistic storm surge hydrodynamic conditions, and analyzes the spectral characteristics of waves under varying water levels. Based on these analyses, the Eurotop (2018) wave overtopping formula is revised, and a new calculation formula for wave overtopping discharge is developed by introducing the concept of relative equivalent freeboard under variable water levels. This approach extends the applicability of the Eurotop (2018) formula and enhances its computational accuracy.

Key words: storm surge; combined wave and surge overtopping; seaward-side slope; flume test