

海堤工程波浪溢流问题研究进展

潘毅^{1,2}, 张壮^{1,2}, 袁赛瑜^{1,3}, 周子骏^{1,2}, 陈永平^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了对全球气候变化背景下的海堤安全提供参考, 回顾了波浪溢流研究的发展历程, 从波浪溢流引起的越堤流量、内坡水流特征、越堤水流紊动特征等方面对波浪溢流相关的最新研究成果进行综述, 认为波浪溢流的基本水力学参数均能够较为合理地计算得出。在此基础上分析了溢流、越浪、波浪溢流的等价性, 指出了下一步需要针对波浪溢流区别于越浪的水动力特征及其对海堤作用与越浪对海堤作用的异同开展研究, 为海堤的设计、评估和加固提供依据。

关键词: 波浪溢流; 越浪; 海堤工程; 动力特征; 综述; 越堤流量

中图分类号: TV871 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2019)01-0090-05

An overview of research on combined wave and surge overtopping on levees// PAN Yi^{1,2}, ZHANG Zhuang^{1,2}, YUAN Saiyu^{1,3}, ZHOU Zijun^{1,2}, CHEN Yongping^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to provide useful information for the sea levee protection under the background of global climate change, this paper gives a comprehensive review on the research of combined wave and surge overtopping. The latest research findings on overtopping discharge, flow characteristics on the inner slope, and turbulence features induced by combined wave and surge overtopping are summarized. It shows that the basic parameters of combined wave and surge overtopping can be estimated reasonably, based on which the flow equivalency among wave overtopping, surge overflow and combined wave and surge overtopping is discussed. It is pointed out that the different characteristic flow patterns between combined wave and surge overtopping and wave overtopping, as well as their impacts on levees need to be investigated so as to provide better references for the design, assessment and reinforcement of levees.

Key words: combined wave and surge overtopping; wave overtopping; levee; dynamic feature; review; overtopping discharge

根据联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 关于极端事件和灾害的专题报告, 在全球气候变化背景下, 沿海地区的极端高水位和热带气旋最大风速都在增加^[1]。随之而来的强风暴潮会引起更大的风暴增水和波浪, 超强风暴潮直接引起堤前水位超过堤顶, 或风浪作用造成海堤顶部挡浪墙发生损坏时, 可导致海堤受到越浪和溢流的双重作用。2005 年卡特里娜飓风过后的调研表明, 大部分海堤破坏是由越浪和溢流的联合作用于海堤内坡引起^[2]。Hughes^[3]首次提出了越浪与溢流联合作用的概念; 潘毅^[4]将越浪与溢流联合作用译作波浪溢流。图 1 给出了越浪、溢流和波浪溢流的示意图 (图中 R_c 为海堤出水高度, SWL 为海平面)。波浪

溢流一旦发生, 极易造成大范围的溃堤灾难^[2,5], 这是因为波浪溢流不仅引起了明显大于越浪量的越堤流量, 而且引发了不同于越浪的水动力过程^[6], 而现有海堤防护体系 (堤顶和内坡) 大多针对越浪作用进行设计, 缺少对波浪溢流的认识和考虑。因此, 对极端条件下波浪溢流水动力及其对海堤作用的认知成为海岸防灾领域亟待解决的问题之一。

2005 年卡特里娜飓风发生以后, 波浪溢流现象受到了各国学者的重视。波浪溢流的研究通常是应急性的, 沿用越浪的研究方法研究波浪溢流的流量及其分布等基本参数^[7-9]; 与越浪类似, 通常认为波浪溢流过程最重要的参数仍是平均越堤流量与越堤流量分布。对于波浪溢流过程中的其他水力学参

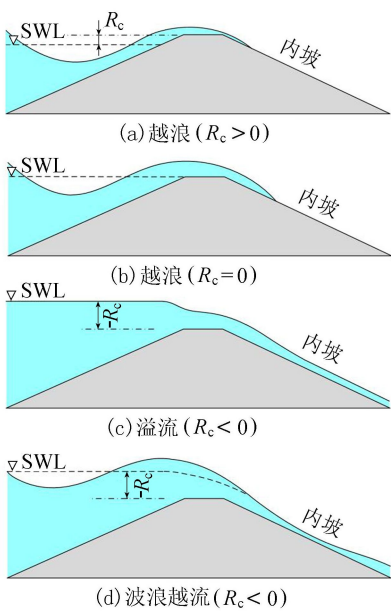


图1 溢流、越浪和波浪溢流示意图

数,包括平均流速参数和紊动特征等,也有研究给出了一些结论^[8-12]。溢流、越浪与波浪溢流的动力特征有所区别,同时,它们之间的转变也是一个逐渐的过程,因此,有学者针对这三者之间的关系进行了综合分析,给出了三者之间的等价关系^[13]。除了常规的水力学参数外,也有学者对波浪溢流过程中产生的不同于越浪的动力过程进行了分析和初步估算^[6]。

本文总结了国内外现有的波浪溢流研究,从越堤流量,背水坡水力学参数,紊动特征,溢流、越浪、波浪溢流的等价性特征等方面对波浪溢流的研究进展进行了系统论述,并在此基础上对未来相关研究方向进行了展望,为相关工程与研究提供参考。

1 波浪溢流越堤流量

越浪问题是海岸工程的经典问题之一,各国学者围绕越浪进行了大量研究工作;波浪溢流是越浪在海平面上升和风暴潮变强的新环境下衍生出的新问题,近年来得到了学术界的广泛重视。越浪是波浪溢流研究的基础,本节对传统越浪引起的越浪量特征、波浪溢流引起的越堤流量及其分布特征进行了综述。

1.1 平均越堤流量

对于传统越浪问题引起的平均越浪量, Owen^[14]通过试验研究给出了经验公式,现在国外应用较广的是 van de Meer 等^[15]和 Schüttrumpf 等^[16]的经验公式。国内学者对越浪问题也进行了大量的物理模型和数值模拟研究。虞克等^[17]和王红等^[18]分别进行了不同结构形式海堤的越浪试验研究,提出了相应的平均越浪量公式。目前国内海堤工程的越浪量计算通常参照物理试验结果或应用规范公式,并在越浪量基础上进一步考虑潮位和海

堤参数对海堤工程的安全进行评估^[19]。近年来,国内学者主要针对不同情况下的具体越浪问题开展了研究,如孤立波作用下的斜坡堤等^[20],或进行新的数值算法研究^[21-22]。

对于波浪溢流引起的平均越堤流量,欧洲的越浪手册中给出了应急性公式^[23]:

$$q_{ws} = q_s + q_w \quad (1)$$

式中: q_{ws} 为波浪溢流引起的平均越堤流量; q_s 为溢流产生的稳定流量,通过经典的堰流公式计算^[24]; q_w 为海堤出水高度为零时的越浪量,通过 Schüttrumpf 公式计算^[16]。

Reeve 等^[7]基于雷诺平均 N-S 方程建立了数值波浪水槽来研究不可渗透海堤的波浪溢流流量,基于模拟结果,给出了低上游水位($0 > R_c \geq -0.8$)情况下无量纲波浪溢流流量 Q 的表达式:

$$Q = \begin{cases} \frac{q_{ws}}{\sqrt{gH_s^3}} \frac{\sqrt{\tan\alpha}}{\xi_p} = 0.051 \exp\left(-1.98 \frac{R_c}{H_s \xi_p}\right) & \xi_p < 2 \\ \frac{q_{ws}}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.233 \exp\left(-1.29 \frac{R_c}{H_s}\right) & \xi_p \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度; H_s 为有效波高; α 为海堤坡度; ξ_p 为基于谱峰周期计算的 Iribarren 数。

Hughes 等^[8]对波浪溢流进行了一系列比尺为 25:1 的水槽试验研究,给出了一个简单的利用海堤相对出水高度 (R_c/H_{m0}) 来估算无量纲平均波浪溢流流量的公式:

$$\frac{q_{ws}}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.034 + 0.53 \left(\frac{-R_c}{H_{m0}}\right)^{1.58} \quad (3)$$

式中: H_{m0} 为基于能谱的有效波高。

Pan 等^[6,9]进行了一系列比尺为 1:1 的大尺寸水槽试验,发现式(3)对不可渗透海堤波浪溢流的平均越堤流量有较好的预测效果,并给出了植被护坡情况下的平均波浪溢流流量公式:

$$q_{ws} = \begin{cases} 0.034 \sqrt{gH_{m0}^3} + 0.53 \sqrt{gH_{m0}^3} \left(\frac{-R_c}{H_{m0}}\right)^{1.58} & \frac{R_c}{H_{m0}} \leq -0.3 \\ 0.0053 \sqrt{gH_{m0}^3} + 0.911 q_s \left(\frac{-R_c}{H_{m0}}\right)^{0.08} & -0.3 < \frac{R_c}{H_{m0}} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

将一系列越堤流量公式与一系列 1:1 大尺度试验数据进行对比,建议对于不可透水海堤,当 $-0.3 < \frac{R_c}{H_{m0}} < 0$ 时使用式(1);当 $\frac{R_c}{H_{m0}} \leq -0.3$ 时使用式(3);对于植被护坡情况下使用式(4)。

1.2 单个波浪引起的越堤流量分布

对于传统越浪问题的单个波浪越浪量分布,

van de Meer等^[15]使用韦伯分布进行描述, Victor等^[25]和 Nørgaard等^[26]分别针对不同的具体情况对越浪量分布的描述方法进行了改进。对于越浪概率, Besley^[27]提出的公式得到了广泛应用, Nørgaard等^[26]提出了浅水情况下 Besley 公式的修正。

对于波浪溢流问题的单个波浪越浪量分布, Hughes等^[8]最早使用双参数韦伯分布对单个波浪引起的波浪溢流越堤流量进行描述:

$$P(q \leq q_*) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{q_*}{a}\right)^b\right] \quad (5)$$

式中: q 为单个波浪引起的越堤流量; q_* 为概率密度函数的自变量; P 为 q 小于 q_* 的概率; a 和 b 分别为尺度因数和形状因数, 分别表示为

$$a = 0.79q_{ws}T_p \quad (6)$$

$$b = 15.7\left(\frac{q_{s1}}{gT_pH_{m0}}\right)^{0.35} - 2.3\left(\frac{q_{s1}}{\sqrt{gH_{m0}^3}}\right)^{0.79} \quad (7)$$

式中: T_p 为谱峰周期; q_{s1} 为同等 R_c 条件下海堤的稳定溢流量。

Pan等^[6]基于 1:1 大尺寸水槽试验结果对 Hughes等^[8]的公式进行了修正, 提高了对单个波浪引起的波浪溢流越堤流量分布的估算精度(尤其当 $-0.3 < R_c/H_{m0} < 0$ 时), 修正后的韦伯分布参数为

$$a = 1.017q_{ws}T_{m-1,0} \quad (8)$$

$$b = \begin{cases} 73.55\left(\frac{q_{ws}}{gH_{m0}T_p}\right)^{0.76} & \frac{R_c}{H_{m0}} \leq -0.3 \\ 54.58\left(\frac{q_{ws}}{gH_{m0}T_p}\right)^{0.63} & -0.3 < \frac{R_c}{H_{m0}} < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $T_{m-1,0}$ 为基于波浪谱质一阶矩的平均周期。

1.3 瞬时越堤流量分布

瞬时越堤流量同样可以使用式(5)所示的双参数韦伯分布进行描述。Hughes等^[8]通过水槽试验给出了对应的韦伯分布参数表达式:

$$a = \frac{q_{ws}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)} \quad (10)$$

$$b = 8.10\left(\frac{q_{s1}}{gT_pH_{m0}}\right)^{0.34} \quad (11)$$

式中: Γ 为伽马函数。

Pan等^[6]基于 1:1 大尺寸水槽试验结果对 Hughes等的形状因数 b 的公式进行了修正, 提高了对瞬时越堤流量分布的估算精度, 修正后的形状因数公式为

$$b = \frac{30.64q_{s1}}{gH_{m0}T_p} + 0.8 \quad (12)$$

2 内坡水流特征参数

卡特里娜台风后的调研表明, 波浪溢流情况下

绝大多数的海堤决口始于内坡^[2]。对内坡水流参数的认知对于波浪溢流情况下海堤内坡的安全性评估有重要意义。Hughes等^[8]基于水槽试验结果给出了波浪溢流作用下内坡水流参数的经验公式, 其中内坡平均流速 v_m 可用下式计算:

$$v_m = 2.5(q_{ws}g\sin\theta)^{1/3} \quad (13)$$

式中: θ 为内坡坡角。

内坡上的均方根波高 H_{rms} 可用下式计算:

$$\frac{H_{rms}}{d_m} = 3.43\exp\left(\frac{R_c}{H_{m0}}\right) \quad (14)$$

式中: d_m 为内坡上的平均水流厚度, 可用 q_{ws} 除以 v_m 得到。

Pan等^[9]基于 1:1 大尺寸水槽试验结果, 获得了内坡上水流切应力的经验公式:

$$\tau_{rms} = 0.0547\gamma_w d_m \quad (15)$$

式中: τ_{rms} 为内坡上的均方根切应力; γ_w 为水的容重。其他特征切应力可以用均方根切应力进行计算:

$$\tau_t = k\tau_{rms} \quad (16)$$

式中: τ_t 为特征切应力; k 为系数, 对应 1/10 大切应力 $\tau_{1/10}$ 、1/3 大切应力 $\tau_{1/3}$ 、平均切应力 τ_{mean} 时 k 值分别为 2.36、0.976、0.329。

3 越堤水流紊动特征

海堤内坡的高速强紊动水流会对坡面产生较高的紊动切应力, 紊动切应力的确定对预测土质海堤冲刷甚至决堤破坏意义重大。Yuan等^[28]对模型比尺为 1:1 海堤模型随机波浪溢流的三维流速数据进行了分析, 比较了流速断面分布法、雷诺应力法、紊动能法等方法确定的坡顶和坡面上部的紊动切应力, 并给出了考虑出水高度和浪高等变量的海堤内坡上部的紊动切应力 τ_{tur} 经验公式:

$$\frac{\tau_{tur}}{-gR_c} = \begin{cases} 49.97\left(-\frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{-0.89} & -2 < \frac{R_c}{H_{m0}} < 0 \\ 27.398 & \frac{R_c}{H_{m0}} \leq -2 \end{cases} \quad (17)$$

由于坡脚处流速超出常规流速仪器的测量范围, Yuan等^[29]建立了海堤随机波浪溢流三维水动力数值模型, 揭示了坡面紊动切应力分布规律, 探讨了海堤形态(堤顶宽度、迎水坡度、背水坡度和附加土堤等)对坡面紊动切应力的影响^[30], 并根据物理模型和数值模型模拟结果, 揭示了高效加筋草皮垫防护的土质海堤溢流的冲刷破坏机理, 给出了波浪溢流作用下高效加筋草皮垫失效时间的计算方法^[31]。

4 溢流、越浪、波浪溢流等价性分析

波浪溢流可以看作越浪和溢流过程的非线性叠加。通过相同 R_c 情况下波浪溢流参数和溢流参数的比值,可以看出波浪溢流中越浪、溢流的相对比例。将不同波浪溢流试验得到的平均越堤流量 q_{ws} 和内坡平均流速 v_m 分别与相同 R_c 下的溢流流量 q_s 和溢流流速 v_s 相比^[8-9],得到越堤流量比和内坡流速比,以相对出水高度 R_c/H_{m0} 为 x 轴进行点绘,如图 2 所示。图中散点为数据点,实线为趋势线。

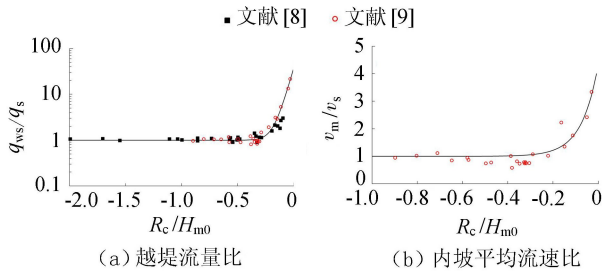


图 2 波浪溢流与溢流特征参数比

从图 2 可以看到,两种特征参数比值的分布趋势都是大约以 $R_c/H_{m0} = -0.3$ 为界。当 $R_c/H_{m0} \leq -0.3$ 时,波浪溢流与溢流特征参数比接近 1,即波浪的存在对于溢流参数影响很小,Pan 等^[9]将这种情况下的波浪溢流总结为溢流主导的波浪溢流;反之,当 $-0.3 < R_c/H_{m0} < 0$ 时,两种特征参数的比值随着 R_c/H_{m0} 接近 0 而迅速变大,Pan 等^[9]将这种情况下的波浪溢流总结为越浪主导的波浪溢流。事实上, R_c/H_{m0} 本身就反映了波浪溢流中溢流与越浪的比例关系, R_c (负值) 越小表明溢流成分更大,而 H_{m0} 越大则越浪成分更大。这种主导因素的划分对于提高波浪溢流参数的估算精度具有指导意义,如式(4)式(9)均通过对不同 R_c/H_{m0} 分段考虑而提高了参数的估算精度。

5 结论与展望

本文从波浪溢流流态特征方面对波浪溢流相关的最新研究成果进行综述。与越浪相关研究类似,目前波浪溢流相关的研究重点仍放在其引起的越堤流量及其分布,本文总结了现有的几种公式并给出了适用范围的推荐。波浪溢流的其他流态特征,如内坡水流的流速、波高、平均切应力和紊动特征等也均有学者进行了研究,并给出了估算方法。

波浪溢流可以看作越浪和溢流过程的非线性叠加,通过波浪溢流参数和溢流参数的比值,可以看出波浪溢流中越浪、溢流的相对比例。而这种相对比例的分布特点明显地将波浪溢流分成了两类:溢流主导和越浪主导。通过溢流主导与越浪主导的划

分,能够明显提高某些特征水动力参数的估算精度。

目前对波浪溢流多沿用越浪的研究方法,对波浪溢流引起的越堤流量、流速参数等进行研究,但波浪溢流引起了更为复杂的特征水动力过程,如直接作用于堤顶和内坡的破碎波和连续变化水流等,仅靠流量和流速参数很难全面反映其对海堤的作用情况。总之,虽然对波浪溢流引起的越堤流量和内坡水流参数等基本特征有了一些认识,但由于缺少对波浪溢流引起的特征水动力过程的认识,很难对波浪溢流对海堤的作用进行全面评估。因此,需要针对波浪溢流区别于越浪的水动力特征开展研究,如破碎波引起的波压力特征及其在海堤内坡的分布、内坡连续变化水流的紊动特征及其对护面的侵蚀破坏作用等,并分析波浪溢流对海堤的作用特征与越浪对海堤的作用特征的异同,为海堤的设计、评估和加固提供更好的参考。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [2] ANDERSEN, C F, BATTJES, J A, DANIEL, D E, et al. The New Orleans hurricane protection system: what went wrong and why[M]. Reston: ASCE, 2007, 92.
- [3] HUGHES S A. Levee overtopping design guidance: what we know and what we need [C]//Proceedings of the Solutions to Coastal Disasters 2008 Congress, Turtle Bay, HI: ASCE, 2008: 867-880.
- [4] 潘毅. 海岸防护:人工养滩工程和海堤越浪、溢流和加固的研究[D]. 上海:同济大学, 2012.
- [5] BAXTER P J. The east coast Big Flood, 31 February 1953: a summary of the human disaster [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2005, 363(1831): 1293-1312.
- [6] 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.
- [7] REEVE D E, SOLIMAN A, LIN P Z. Numerical study of combined overflow and wave overtopping over a smooth impermeable seawall[J]. Coastal Engineering, 2008, 55 (2): 155-166.
- [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] PAN Y, LI L, AMINI F, et al. Full scale HPTRM strengthened levee testing under combined wave and surge overtopping conditions: overtopping hydraulics, shear

- stress and erosion analysis [J]. Journal of Coastal Research, 2013, 29(1) : 182-200.
- [10] PAN Y, LI L, AMINI F, et al. New understanding on the distribution of individual wave overtopping volumes over a levee under negative freeboard [J]. Journal of Coastal Research, 2016, SI(75) : 1207-1211.
- [11] YUAN S Y, LI L, AMINI F, et al. Sensitivity of combined turbulent wave overtopping and storm surge overflow response to variations in levee geometry [J]. Journal of Coastal Research, 2015, 31(3) : 702-713.
- [12] YUAN S Y, LI L, AMINI F, et al. Turbulence measurement of combined wave and surge overtopping of a full-scale HPTRM-strengthened levee [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2014, 140(4) : 86-95.
- [13] PAN Y, LI L, AMINI F, et al. The influence of three levee-strengthening systems on overtopping hydraulic parameters and hydraulic equivalency analysis between steady and intermittent overtopping [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2013, 139(4) : 256-266.
- [14] OWEN M W. Design of seawalls allowing for wave overtopping [R]. Wallingford: Hydraulics Research Station, 1980.
- [15] van der MEER J W, JANSSEN J P F M. Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments [R]. Delft: Delft hydraulics, 1994.
- [16] SCHÜTTRUMPF 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: [s. n.], 2001 : 1565-1574.
- [17] 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 Ke, YU Guangming. Experimental study of overtopping volume on sloping breakwater [J]. Hydro-Science and Engineering, 1992 (3) : 211-219. (in Chinese))
- [18] 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 Hong, ZHOU Jiabao, ZHANG Jiachang. Estimation of irregular wave overtopping quantities on single sloping [J]. Hydro-Science and Engineering, 1996 (1) : 58-63. (in Chinese))
- [19] 谢婕, 龚政, 陈永平, 等. 海堤安全评价指标体系的构建及应用 [J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2) : 59-63. (XIE Jie, GONG Zheng, CHEN Yongping, et al. Establishment and application of index system for seawall safety assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2) : 59-63. (in Chinese))
- [20] 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. (ZHANG Jinniu, WU Wei, LIU Hua, et al. An experimental study on overtopping of solitary wave against a slope dike [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics: Ser A, 2014, 29 (6) : 656-662. (in Chinese))
- [21] 黄英丽, 王国玉, 房克照, 等. 基于 Boussinesq 方程的陡峭礁坪上波浪传播变形数值模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2017, 37 (1) : 38-42. (HUANG Yingli, WANG Guoyu, FANG Kezhao, et al. Numerical modeling of wave propagation and deformation on steep reef based on Boussinesq equation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1) : 38-42. (in Chinese))
- [22] 李雪临, 路宽, 韩林生, 等. 基于 SPH-ALE 方法的波浪水槽数值模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (6) : 39-43. (LI Xuelin, LU Kuan, HAN Linsheng, et al. Numerical simulation of wave flume based on SPH-ALE method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6) : 39-43. (in Chinese))
- [23] PULLEN T, ALLSOP N W H, BRUCE T, et al. EurOtop: wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual [M]. UK: Environment Agency, 2007.
- [24] HENDERSON F M, Open channel flow [M]. New York: MacMillian Publishing Co. , Inc. , 1966.
- [25] VICTOR L, van der MEER J W, TROCH P. Probability distribution of individual wave overtopping volumes for smooth impermeable steep slopes with low crest freeboards [J]. Coastal Engineering, 2012, 64 : 87-101.
- [26] NØRGAARD J Q H, ANDERSEN T L, BURCHARTH H F. Distribution of individual wave overtopping volumes in shallow water wave conditions [J]. Coastal Engineering, 2014, 83 : 15-23.
- [27] BESLEY P. Overtopping of seawalls: design and assessment manual [R]. Wallingford: HR Wallingford Ltd. , 1999.
- [28] YUAN S Y, LI L, AMINI F, et al. Turbulence measurement of combined wave and surge overtopping of a full-scale HPTRM-strengthened levee [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2014, 140(4) : 04014014.
- [29] YUAN S Y, LI L, AMINI F, et al. Numerical study of turbulence and erosion of an HPTRM-strengthened levee under combined storm surge overflow and wave overtopping [J]. Journal of Coastal Research, 2014, 30 (1) : 142-157.
- [30] YUAN S Y, LI L, AMINI F, et al. Sensitivity of combined turbulent wave overtopping and storm surge overflow response to variations in levee geometry [J]. Journal of Coastal Research, 2015, 31(3) : 702-713.
- [31] YUAN S Y, TANG H W, LI L, et al. Combined wave and surge overtopping erosion failure model of HPTRM levees: accounting for grass-mat strength [J]. Ocean Engineering, 2015, 109 : 256-269.

(收稿日期: 2018-01-16 编辑: 雷燕)