



# 极端波浪溢流过程中海堤堤顶的 下冲水流特征分析<sup>\*</sup>

胡贵娴<sup>1</sup>, 潘毅<sup>1</sup>, 王旭鹏<sup>2</sup>

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 河北昌黎黄金海岸国家级自然保护区管理中心, 河北 昌黎 066600)

**摘要:** 针对堤前水位高于堤顶时极端波浪溢流造成的海堤堤顶下冲水流问题, 基于波浪溢流大型水槽试验中测得的堤顶流速时间序列开展研究, 并提出波浪溢流过程中不同角度下冲水流的发生概率和平均流速的经验公式。结果表明, 下冲水流的流速通常大于同一位置的流速均值, 下冲水流的发生概率随其角度增大而明显减小, 下冲水流的平均流速随其角度的增大而略有减小, 但当出水高度趋近于 0 时, 不同角度下冲水流的平均流速均会显著增大。

**关键词:** 越浪; 波浪溢流; 大型水槽试验; 下冲水流

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0034-06

## Feature of downward-flushing flow on crest of levee under combined wave and surge overtopping conditions

HU Gui-xian<sup>1</sup>, PAN Yi<sup>1</sup>, WANG Xu-peng<sup>2</sup>

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Changli Gold Coast National Nature Reserve, Changli 066600, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the downward-flushing flow on the crest of a levee caused by extreme combined wave and surge conditions, the time series of flow velocity measured in full-scale flume tests on combined wave and surge overtopping are investigated, and empirical formulas for the occurrence probability and average velocity of the downward-flushing flow of different angles are proposed. The results show that the velocity of downward-flushing flow is usually greater than the average velocity at the same position. The occurrence probability of downward-flushing flow decreases significantly with the increase of its angle, while the average velocity of downward-flushing flow decreases slightly with the increase of its angle. However, the average velocity of downward-flushing flow of different angles increases significantly when the relative freeboard approaches 0.

**Keywords:** wave overtopping; combined wave and surge overtopping; full-scale flume test; downward-flushing flow

随着全球气候变化, 沿海地区的极端高水位和热带气旋的最大风速都表现出增加的趋势<sup>[1]</sup>。在强风暴潮等极端天气条件下, 风暴增水和波浪进一步增强, 从而导致海堤的堤前水位超过堤

顶, 海堤会受到越浪和溢流的联合作用, 即波浪溢流<sup>[2-3]</sup>。越浪与波浪溢流的关系对比如图 1 所示。近些年来, 由于波浪溢流的发生而导致的溃坝事件时有发生<sup>[4]</sup>。2005 年对卡特里娜飓风的相

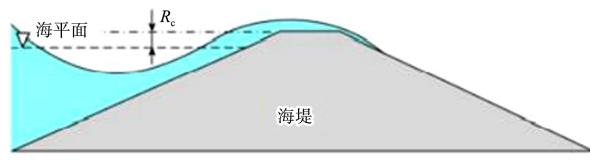
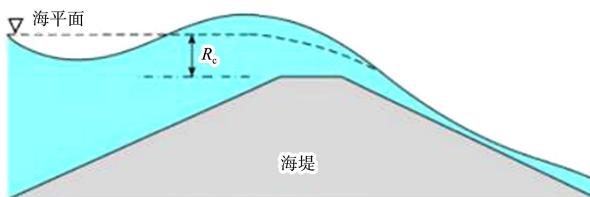
收稿日期: 2022-03-22

\*基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51979098); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20181309)

作者简介: 胡贵娴(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海岸带资源与环境。

通讯作者: 潘毅(1985—), 男, 博士, 教授, 研究方向为港口、海岸及近海工程。E-mail: panyi@hhu.edu.cn

关研究表明, 绝大部分的海堤破坏都是波浪溢流对海堤内坡的侵蚀所致<sup>[5]</sup>。因此, 研究波浪溢流期间的水动力特征对海堤内坡防护具有重要意义。

a) 越浪 ( $R_c > 0$ )

b) 波浪溢流

注:  $R_c$  为海堤出水高度。

图 1 越浪与波浪溢流的关系

在 2005 年卡特里娜飓风之后, 各国海岸工程学者对波浪溢流现象给予高度关注, 并进行了一系列应急性研究<sup>[6-10]</sup>。由于波浪溢流可以看作是极端条件下的越浪现象, 因此现有的大部分研究都集中在越浪量、流速和剪应力等经典越浪水力参数上<sup>[11]</sup>。基于现有研究, 可以对不同海堤内坡条件下的平均越浪量进行合理估算, 也有学者建立了越浪量分布<sup>[12]</sup>、海堤内坡流速、堤顶和内坡剪应力和湍流动能<sup>[13]</sup>的经验公式。

上述研究均沿用越浪的研究方法, 主要针对越浪量和流速等参数开展研究, 但大比尺波浪溢流水槽试验表明, 波浪溢流期间堤顶还会受到波浪破碎造成的斜向水流冲击力。在传统越浪现象过程中, 在经过波浪破碎和波浪爬高后, 堤顶的水流流向基本水平, 不会出现波浪溢流期间产生的下冲水流作用力; 另一方面, 现有海堤的防护措施中, 并没有考虑下冲水流对海堤的影响, 对于极端风暴潮作用下海堤对下冲水流冲击作用的抵御能力也不得而知。大比尺波浪溢流水槽试验中下冲水流直接作用于堤顶见图 2, 这种冲击力无法采用现有越浪研究中的参数表征, 故有必要开展针对性的研究工作。

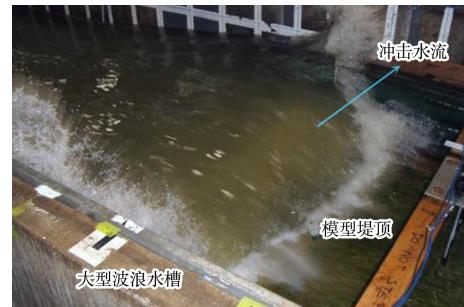


图 2 波浪溢流大型水槽试验中观测到的下冲水流

本文以波浪溢流大型水槽试验结果为基础, 围绕波浪溢流期间堤顶下冲水流特征开展分析工作, 基于对堤顶流速时间序列的分析, 剖析不同波况和上游水位下下冲水流的发生概率和流速特征, 并提出估算不同下冲角度的下冲水流的经验公式。本文的研究成果能为极端条件下的海堤防护提供重要的参考依据。

## 1 波浪溢流大型水槽试验

波浪溢流大型水槽试验在美国俄勒冈州立大学欣斯代尔波浪研究实验室的大水槽中进行。试验装置如图 3 所示。大水槽的尺寸为  $104 \text{ m} \times 3.7 \text{ m} \times 4.6 \text{ m}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高), 配有活塞式造波机, 可由给定波浪谱生成随机波。在距造波机  $44.28 \text{ m}$  处修建了由混凝土建造的海堤模型。该海堤模型的长度比尺为 1:1, 模型高度为  $3.25 \text{ m}$ , 外坡坡度为 1:4.25, 内坡坡度为 1:3。在海堤堤顶和内坡留有深  $0.76 \text{ m}$ 、宽  $2.34 \text{ m}$  的测试区, 用来安装 3 种不同的内坡护坡材料, 分别为碾压混凝土 (RCC)、铰接式护坡砖 (ACB) 和高性能加筋草皮 (HPTRM), 由于安装于堤顶和海堤内坡的护坡材料类型对下冲水流特征影响较小, 因此本文对内坡护坡材料不予讨论。水槽下游装有流量可调的水泵循环系统, 将下游水体输送到海堤模型上游水槽底部排出, 从而平衡波浪溢流造成的越堤水量。在海堤模型上游安装了 4 个电容式波高仪。波高仪 2~4 作为三波高阵列, 用来进行波浪的入反射分离, 波高仪 1 作为备用。在波高仪 3 和 4 之间安装 1 个超声波水位仪 (ARF), 用来校正波高仪的读数, 同时测得的水位时间序列也可用于计算不同情况下的平均水位。

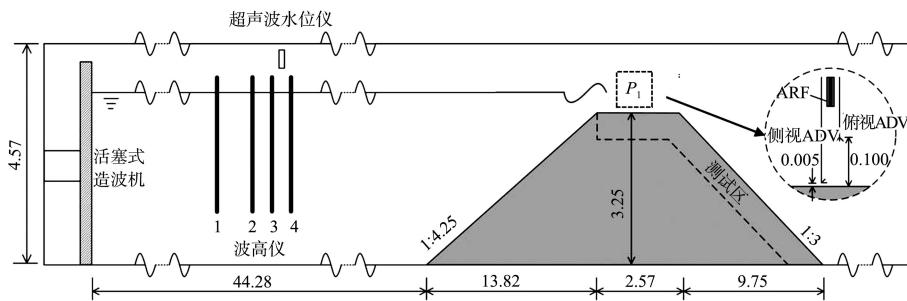


图 3 试验装置与海堤模型 (单位: m)

此外,在测试区上的  $P_1$  处, 使用多普勒流速仪(ADV)和超声波水位仪(ARF)对海堤堤顶流速和水流深度进行测量。在  $P_1$  点分别放置 1 台侧视 ADV 和 1 台俯视 ADV。侧视 ADV 探头安置在距堤顶上方 0.5 cm 处, 测量与其同一水平高度下距离探头 5 cm 处的流速(其探头指向垂直于水槽轴向, 保证测点水流不受探头本身影响); 俯视 ADV 探头安置在距堤顶上方 10 cm 处, 测量其下方 5 cm 处的流速。因此, 侧视 ADV 可测得贴近堤顶处(高于堤顶 0.5 cm)的流速, 俯视 ADV 可测得堤顶上方 5 cm 处的流速。

该试验根据理想的 TMA 谱生成了不规则波时间序列, 共设计了 24 组不同漫顶条件下的波浪溢流试验, 见表 1。其中包括对 3 种不同护坡材料类型的试验, 分别为 11 组 RCC 试验、4 组 ACB 试验和 9 组 HPTRM 试验(护坡材料的影响不予讨论)。试验过程中, 首先开启水泵循环系统, 使海堤模型上方形成稳定溢流, 并调节流量使海堤出水高度(负值)达到预定水位, 而后开启造波机。注意开启造波机后堤前平均水位会有所调整(略不同于预定水位), 故表 1 中的海堤出水高度为实测值而非预定值。

表 1 波浪溢流试验组次

海堤内坡护坡材料	试验组次	海堤出水高度 $R_c/m$	有效波高 $H_{m0}/m$	谱峰周期 $T_p/s$
碾压混凝土(RCC)	1	-0.075	0.672	4.89
	2	-0.078	0.388	3.38
	3	-0.025	0.398	4.85
	4	-0.017	0.475	3.36
	5	-0.289	0.370	3.38
	6	-0.343	0.411	4.78
	7	-0.328	0.459	6.97
	8	-0.321	0.561	4.71
	9	-0.287	0.575	7.05
	10	-0.289	0.659	5.08
	11	-0.236	0.741	7.05

续表1

海堤内坡护坡材料	试验组次	海堤出水高度 $R_c/m$	有效波高 $H_{m0}/m$	谱峰周期 $T_p/s$
铰接式护坡砖(ACB)	1	-0.219	0.565	4.98
	2	-0.182	0.641	6.68
	3	-0.255	0.738	4.94
	4	-0.279	0.722	4.94
高性能加筋草皮(HPTRM)	1	-0.117	0.481	6.84
	2	-0.096	0.543	6.86
	3	-0.317	0.450	7.05
	4	-0.307	0.540	6.81
	5	-0.271	0.671	7.07
	6	-0.280	0.669	6.55
	7	-0.285	0.665	6.95
	8	-0.282	0.665	6.79
	9	-0.277	0.668	6.97

根据波高仪 1~4 的测量结果, 采用文献[13]的最小二乘法进行波浪的入反射分离, 再使用快速傅里叶变换算法从入射波的时间序列推导出入射波的波谱, 从而根据入射波谱计算有效波高  $H_{m0}$  和谱峰周期  $T_p$ , 在  $P_1$  处测得的流深和流速的时间序列用于估算越堤流量和平均越堤流量  $q_{ws}$  的时间序列。靠近堤顶的侧视 ADV 的测量数据用于分析与堤坝破坏直接相关的下冲水流的近堤流速。

## 2 下冲水流特征分析

本文的分析基于位于堤顶的侧视 ADV 测得的垂向二维流速时间序列开展。规定平行于堤顶指向岸侧的方向为  $x$  轴正向, 垂直于堤顶向上的方向为  $y$  轴正向, 流速与  $x$  轴正向的夹角为流向, 因此向下的下冲水流的流向为负。对不同流向的下冲水流进行分类讨论, 将落在  $[-35^\circ, -25^\circ]$ 、 $[-25^\circ, -15^\circ]$ 、 $[-15^\circ, -5^\circ]$  和  $[-5^\circ, 5^\circ]$  区间内的流向分别视作  $-30^\circ$ 、 $-20^\circ$ 、 $-10^\circ$  和  $0^\circ$  进行分类,

进而讨论不同流向的发生概率和平均流速大小。 $0^\circ$ 、 $-10^\circ$ 、 $-20^\circ$ 和 $-30^\circ$ 的不同角度下的流向发生概率分别记作 $P_0$ 、 $P_{10}$ 、 $P_{20}$ 和 $P_{30}$ 。不同角度的流向发生概率以落入相应流向区间的数据点的数量与时间序列中流速数据点总数的比值计算, 并取 4 个流向区间内的所有流速数据点的平均值为不同流向下的平均流速 $v_m$ ;  $0^\circ$ 、 $-10^\circ$ 、 $-20^\circ$ 和 $-30^\circ$ 角度下的平均流速大小分别记作 $v_{m0}$ 、 $v_{m10}$ 、 $v_{m20}$ 和 $v_{m30}$ 。

一个流速时间序列的示例(表 1 中的铰接式护坡砖组次 1)见图 4。可以看出, 在 2 022、2 032、2 037、2 042 和 2 047 s 时, 在水平速度急剧增加的同时, 垂直速度的绝对值也急剧增大。水平速度的急剧增加表示一个波的开始, 而垂直速度的绝对值的急剧增加表示一个下冲水流的发生, 这也就说明了下冲流通常发生在一个波的开始。但也可以看出, 并不是所有波的开始都伴随有向下的流速方向。这是由于大多数下冲水流都是因波浪破碎产生的, 但卷破波仅发生在部分波浪中。注意图 4 中的流速时间序列经过了滤波处理, 可能因此滤掉了真实存在的流体紊动特征。事实上, 水体紊动对某些护坡的破坏作用也非常显著, 但因为下冲水流中掺杂了部分气泡, 难以区分真实紊动和掺气水流造成的信号噪声, 因此本文对下冲水流的紊动特征暂不予讨论, 而是基于滤波后的时间序列研究其发生概率和流速特征。

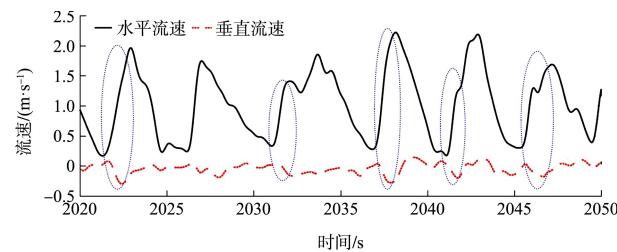


图 4 水平流速与垂直流速的时间序列

流速时间序列中垂直速度与水平速度关系示例(表 1 中的铰接式护坡砖组次 1)见图 5。可以看出, 随着水平流速的增加, 垂直流速由正值变为负值, 其绝对值不断增大, 流向也更向

下。同一组次中瞬时流速大小与流向的关系见图 6。同样可以看到高流速下, 下冲水流发生的概率更大。

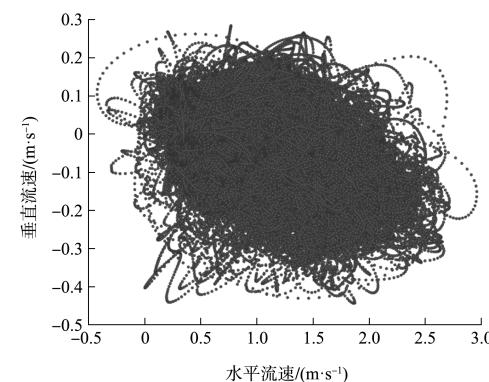


图 5 瞬时流速的水平速度与垂直速度关系

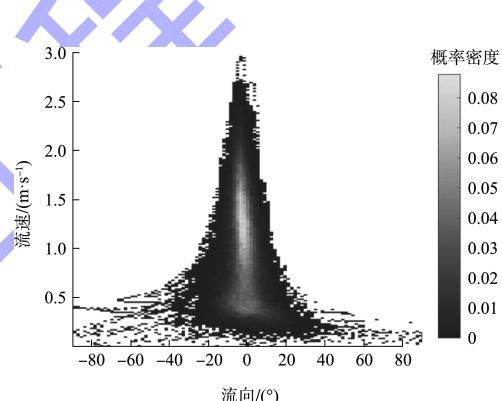
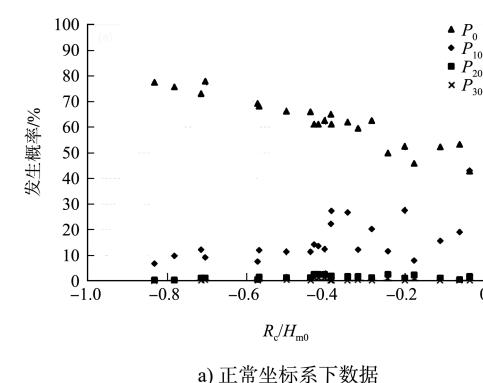
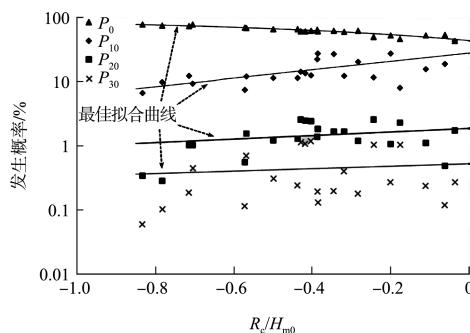


图 6 瞬时流速的流向与流速大小关系

所有试验组次中不同流向向下冲水流的发生概率如图 7 所示, 其中图 7a) 为笛卡尔坐标系, 可以直观反映不同流向发生概率的相对大小; 但 $P_{20}$ 与 $P_{30}$ 数据相近, 在笛卡尔坐标系中难以区分, 因此为了更好地区分 $P_{20}$ 与 $P_{30}$ 之间的大小关系, 将笛卡尔坐标系改用对数坐标系, 绘制于图 7b)。



a) 正常坐标系下数据



b) 对数坐标系下数据及最佳拟合曲线

图 7 不同流向下的越堤流的发生概率

可以看出,平行于堤顶的水流发生概率( $P_0$ )在40%~80%,并且随着海堤相对超高( $R_c/H_{m0}$ )绝对值的减小而降低。这表明在 $R_c/H_{m0}$ 的绝对值趋近于0时,越浪在波浪溢流过程中逐渐占主导地位;同时,由于波浪溢流过程中越浪占据了主导地位,出现向下流向的概率( $P_{10}$ 、 $P_{20}$ 和 $P_{30}$ )会随着 $R_c/H_{m0}$ 绝对值趋于0而增加。流向为-10°的发生概率在10%~40%,流向为-20°和-30°的发生概率分别为0.5%~2.5%和0.1%~1.5%,这些在评估海堤防护安全性中应当加以考虑。图7b)中的曲线是4种不同流向下的越堤流的发生概率与海堤出水高度之间关系的最佳拟合曲线,其对应的经验公式为:

$$P_0 = 100 \tanh(-0.682R_c/H_{m0} + 0.465) \quad (1)$$

$$P_{10} = 100[1 - \tanh(-0.825R_c/H_{m0} + 0.911)] \quad (2)$$

$$P_{20} = 100[1 - \tanh(-0.320R_c/H_{m0} + 2.335)] \quad (3)$$

$$P_{30} = 100[1 - \tanh(-0.220R_c/H_{m0} + 2.973)] \quad (4)$$

式(1)~(4)的均方根误差分别为3.242%、7.201%、0.6902%和0.3950%。总体来说,均方根误差在接受范围。 $P_{10}$ 的误差值要大于 $P_0$ 的误差值,这是由于下冲水流比堤顶平行的水流具有更高的随机性。此外,因为 $P_{20}$ 和 $P_{30}$ 的值较小,离散程度也更小,所以它们的误差值均小于 $P_0$ 的误差值。式(1)~(4)的适用范围应在本文测试参数的范围内,即 $-0.85 < R_c/H_{m0} < 0$ 。

除了以上分析的不同流向下的越堤流的发生概率外,不同流向下的平均流速大小 $v_m$ 也是影响堤坝安全的另一个重要因素。经过对不同无量纲参数的尝试计算,最终建立了相对出水高度 $R_c/H_{m0}$ 与无量纲的平均流速 $v_m/(-gR_c)^{0.5}$ 之间的经验关

系,如图8所示。

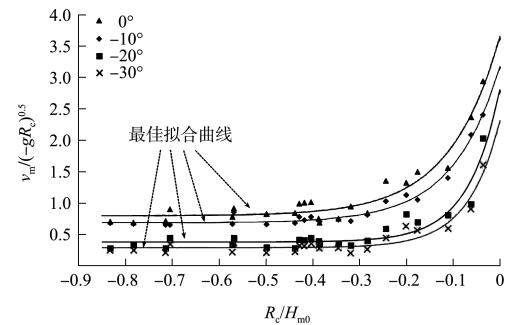


图 8 不同流向下的下冲水流无量纲平均流速与相对出水高度之间的关系

可以看出,在同一相对出水高度下,随着下冲水流角度的增大(由0°变为30°),其平均流速大小在随之略有减小。图8中曲线为二者最佳拟合曲线,其对应的经验公式为:

$$v_{m0}/(-gR_c)^{0.5} = 2.882 \exp(9.294R_c/H_{m0}) + 0.793 \quad (5)$$

$$v_{m10}/(-gR_c)^{0.5} = 2.491 \exp(9.961R_c/H_{m0}) + 0.684 \quad (6)$$

$$v_{m20}/(-gR_c)^{0.5} = 2.437 \exp(14.64R_c/H_{m0}) + 0.379 \quad (7)$$

$$v_{m30}/(-gR_c)^{0.5} = 2.019 \exp(14.56R_c/H_{m0}) + 0.286 \quad (8)$$

式中: $v_{m0}$ 、 $v_{m10}$ 、 $v_{m20}$ 和 $v_{m30}$ 分别为下冲水流在0°、-10°、-20°和-30°下的平均流速大小。式(5)~(8)的均方根误差分别为0.1436、0.06917、0.1454和0.1035。在波浪溢流大型水槽试验中,海堤出水高度 $R_c = 0.3$  m时是所有试验组次中的最典型的一种工况,根据式(5)~(8)的最优拟合的均方根误差值,计算得到此种工况下 $v_{m0}$ 、 $v_{m10}$ 、 $v_{m20}$ 和 $v_{m30}$ 的均方根误差分别为0.2462、0.1186、0.2493和0.1775 m/s。由于最大瞬时流速的大小约为3 m/s,因此 $v_m$ 的均方根误差在可以接受的范围内。与上文相同,式(5)~(8)的适用范围也应在本文测试参数的范围内,即 $-0.85 < R_c/H_{m0} < 0$ 。

### 3 结论

1)从时间序列分析来看,流速越高,发生下冲水流的概率越大,即下冲水流的流速通常大于同一测点流速时间序列的均值。

2)下冲水流发生概率随着下冲水流角度的增大(由0°变为30°)而减小,平行于堤顶的水流发生概率( $P_0$ )最高。

3) 下冲水流平均流速随着下冲水流角度的增大(由 $0^\circ$ 变为 $30^\circ$ )而略有减小, 但随着相对出水高度趋近于0, 不同角度的下冲水流平均流速均会显著增大。

4) 本文提出波浪溢流过程中不同角度下冲水流的发生概率和平均流速的经验公式, 但需要说明的是, 上述经验公式是基于波浪溢流大型水槽试验的结果提出, 其适用范围应限于试验测试参数的范围内, 即 $-0.85 < R_e/H_{m0} < 0$  以及海堤外坡坡度为1:4.25, 对于试验范围外的工况, 本文的经验公式应谨慎使用。

## 参考文献:

- [1] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [2] HUGHES S A. Levee overtopping design guidance: what we know and what we need [C]//WALLENDORF L, EWING L, JONES C, et al. Solutions to Coastal Disasters Congress 2008. Reston: ASCE, 2008: 867-880.
- [3] 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.
- [4] BAXTER P J. The east coast big flood, 31 January-1 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: 1293-1312.
- [5] 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.

- [6] FORMENTIN S M, ZANUTTIGH B. A new method to estimate the overtopping and overflow discharge at over-washed and breached dikes [J]. Coastal engineering, 2018, 140: 240-256.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 黄飞扬, 潘毅, 周子骏, 等. 海堤外坡坡度对波浪溢流量的影响[J]. 水运工程, 2022(3): 21-26, 60.
- [11] 潘毅, 张壮, 袁赛瑜, 等. 海堤工程波浪溢流问题研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(1): 90-94.
- [12] 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, 75 (S1): 1207-1211.
- [13] MANSARD E P D, FUNKE E R. The measurement of incident and reflected spectra using a least square method [C]//ASCE. Proceeding of 17th Coastal Engineering Conference. New York: ASCE, 1980: 154-172.

(本文编辑 王璁)

## 编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: [www.syge.com.cn](http://www.syge.com.cn), 敬请广大读者和作者周知并相互转告。