

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.03.011

海堤波浪溢流量的分布特征及估算方法

潘毅^{1,2}, 屈小开¹, 周子骏¹, 陈永平¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098;
2. 秦皇岛市海岸带生态修复工程技术研究中心, 河北秦皇岛 066001)

摘要: 基于大型水槽试验结果, 分析了不同海堤相对出水高度的波浪溢流量特征并进行分类; 依据此分类方式, 使用韦伯分布对大型水槽试验测得的波浪溢流量进行拟合, 研究单个波浪溢流引起越堤流量的分布和瞬时越堤流量的分布, 提出了新的经验公式。结果表明, 新的经验公式与现有的方法相比提高了对波浪溢流过程中单个波浪溢流引起越堤流量和瞬时越堤流量分布的估算精度。

关键词: 波浪溢流; 极端条件; 风暴潮; 海堤; 波浪溢流量; 韦伯分布; 水槽试验; 越浪

中图分类号: TV871 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2020)03-0260-08

Distribution characteristics and estimation method of discharge of combined wave and surge overtopping in sea levees

PAN Yi^{1,2}, QU Xiaokai¹, ZHOU Zijun¹, CHEN Yongping¹

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Qinhuangdao Engineering Research Center of Coastal Ecological Restoration, Qinhuangdao 066001, China)

Abstract: Based on the results of full-scale flume tests, characteristics of combined wave and surge overtopping at relative freeboard were analyzed and classified. According to this classification, discharges of combined wave and surge overtopping measured from the full-scale flume test was fitted with the Weibull distribution, and distributions of individual overtopping volumes and instantaneous overtopping discharge were studied respectively. New empirical equations have been proposed to estimation the distribution of individual overtopping volumes and instantaneous overtopping discharge, which improved the estimation accuracy of them compared with the existing methods.

Key words: combined wave and surge overtopping; extreme condition; storm surge; sea levee; discharge of combined wave and surge overtopping; Weibull distribution; flume test; overtopping wave

波浪溢流指在强风暴潮等极端天气下, 堤前水位高于堤顶, 海堤受到越浪与溢流联合作用的现象^[1-2], 溢流、越浪与波浪溢流的对比如图 1 所示 (R_c 为海堤出水高度)。波浪溢流一旦发生, 极易引起大范围的溃堤灾难^[3]。2005 年卡特里娜飓风之后, 波浪溢流现象引起了海岸工程界的广泛关注, 各国学者对波浪溢流开展了应急性的研究^[4-7]。波浪溢流量指波浪溢流引起的单宽越堤流量, 通常指平均单宽越堤流量。类似于越浪量之于海堤越浪, 波浪溢流量是波浪溢流与海堤防护相关的最重要水力学参数, 波浪溢流量也是早期的相关研究最关注的参数。除了波浪溢流引起的平均单宽越堤流量之外, 单个波浪引起的越堤流量分布, 以及瞬时越堤流量分布, 也是海堤防护关注的问题。波浪溢流量是一个均值, 而单个波浪造成的越堤流量, 以及瞬时越堤流量都是一个随机量, 其量级能达到均值的数倍, 且更容易和海堤的破坏建立相关关系。

早期研究中, Hughes 等^[6]对波浪溢流过程中单个波浪引起的越堤流量分布, 以及瞬时越堤流量分布进

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: 潘毅(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事海岸工程方面研究。E-mail:panyi@hhu.edu.cn

引用本文: 潘毅, 屈小开, 周子骏, 等. 海堤波浪溢流量的分布特征及估算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 260-267.

PAN Yi, QU Xiaokai, ZHOU Zijun, et al. Distribution characteristics and estimation method of discharge of combined wave and surge overtopping in sea levees[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(3): 260-267.

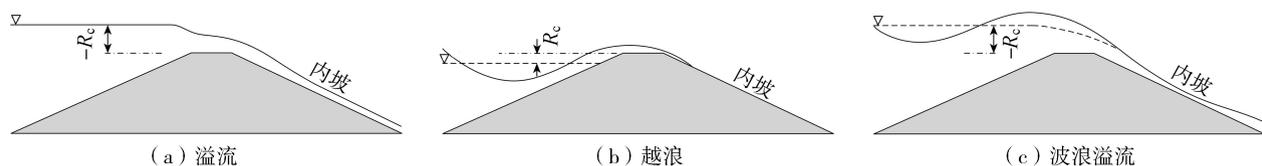


图1 溢流、越浪与波浪溢流

Fig.1 Surge overflow, wave overtopping and combined wave and surge overtopping

行了研究,沿用 van de Meer 等^[8]对越浪量分布的研究方法,采用式(1)的双参数韦伯分布来描述波浪溢流过程中单个波浪引起的越堤流量以及瞬时越堤流量过程分布。

$$P_V = P(V_i \leq V) = 1 - \exp\left(-\frac{V}{a}\right)^b \quad (1)$$

式中: P ——单个波浪引起特定越堤流量的发生概率; V_i ——单个波浪引起的单宽越堤流量; V ——给定单宽越浪量; P_V ——单个波浪引起的单宽越堤流量 V_i 小于或等于 V 的概率; a ——韦伯分布尺度因子; b ——韦伯分布形状因子。

对单个波浪的越堤流量, Hughes 等^[6]给出的尺度因子和形状因子为

$$a = 0.79q_{ws}T_p \quad (2)$$

$$b = 15.7 \left(\frac{q_s}{gT_p H_{m0}}\right)^{0.35} - 2.3 \left(\frac{q_s}{gH_{m0}^3}\right)^{0.79} \quad (3)$$

式中: q_{ws} ——平均波浪溢流量; T_p ——谱峰周期; q_s ——同等海堤出水高度(R_c)时无波浪情况下的稳定溢流量; g ——重力加速度; H_{m0} ——基于波浪谱的有效波高。

对于瞬时越堤流量过程, Hughes 等^[6]给出的韦伯分布尺度因子和形状因子可表示为

$$a = \frac{q_{ws}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)} \quad (4)$$

$$b = 8.10 \left(\frac{q_s}{gT_p H_{m0}}\right)^{0.34} \quad (5)$$

式中: Γ ——伽马函数。

越浪是波浪溢流研究的基础,也是海岸工程的经典问题之一,这里对越浪量的相关研究进行简单介绍。越浪量的主要特征可以用平均越浪量和越浪量分布来表征。对于平均越浪量, Owen^[9]通过试验研究给出经典公式,现在国外应用较广的是 van de Meer 等^[8]以及 Schüttrumpf 等^[10]的经验公式。对于越浪量分布, van de Meer 等^[8]使用双参数韦伯分布进行描述, Victor 等^[11]和 Nørgaard 等^[12]分别针对不同具体情况对越浪量分布的描述进行了改进。国内学者对越浪问题进行了大量物理模型和数值模拟研究。较早的有虞克等^[13]、王红等^[14]进行了不同结构形式海堤的越浪试验研究,提出了对应的平均越浪量公式。近年来,国内学者主要对不同情况下的具体越浪问题开展了研究,如护面形式和海堤断面对波浪爬高和越浪量的影响^[15-17],随机波或孤立波作用下的越浪特征研究等^[18-19]。

Hughes^[1]的研究重点在平均波浪溢流量,未对单个波浪引起的越堤流量以及瞬时越堤流量过程分布进行深入讨论,且式(3)涉及2个无量纲自变量,对公式的使用和拟合度的判断不够直观。本文以美国俄勒冈州立大学开展的大型水槽试验结果为基础,分析平均波浪溢流量特征,通过区分不同的波浪溢流类型,给出了单个波浪引起的越堤流量以及瞬时越堤流量过程分布新估算方法,提高了对二者的估算精度。

1 波浪溢流的原物尺寸水槽试验

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(O. H. Hinsdale Wave Research Laboratory, HWRL)的大水槽进行。大水槽尺寸为104 m×3.7 m×4.6 m(长×宽×高),可生成随机波。在距造波机44.28 m处修建海堤模型。如图2所示,海堤模型高3.25 m,外坡坡度为1:4.25,内坡坡度为1:3。海堤模型使用混凝土建造,堤顶和内坡留有深0.76 m、宽2.34 m的测试区,用来安装内坡护坡材料。海堤模型上游装有4台电容式波高仪,波高仪2~4作为一个三波高仪阵列,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和波高仪4之间安装1台超声波水位仪,用来校正波高仪的读数。位于海堤模型堤顶和内坡的5个测点处安装多普勒流速仪和超声波水位仪。每个测点处各安装1台侧视ADV和1台俯视ADV;俯视ADV测量距海堤模型表面3cm处流速,侧视ADV测量距海堤模型表面0.5cm处的流速。每个测点处各安装1台超声波水位仪进行水位测量。

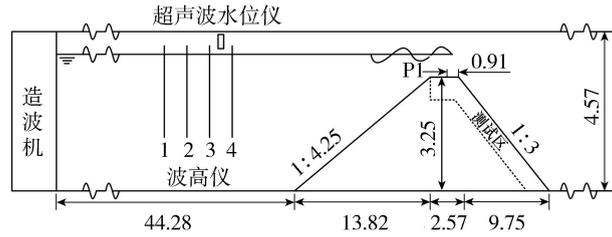


图2 大水槽和海堤模型布置(单位:m)

Fig. 2 Set up of large wave flume and sea levee model (units: m)

在图2所示的测试区内部,在不同的试验组次中依次安装不同类型的海堤护坡,包括碾压混凝土、铰接式护坡砖和高性能加筋草皮。共进行24组不同有效波高、谱峰周期和海堤出水高度组合下的波浪溢流试验。24组波浪溢流试验包括11组碾压混凝土试验、4组铰接式护坡砖试验和9组高性能加筋草皮试验;除此之外,进行了8组稳定溢流的试验组次,用来率定不同护坡条件下稳定溢流量计算公式中的经验参数。具体试验组次安排见表1和表2。本文的讨论中不涉及海堤内坡护坡的影响,因此对于护坡种类不再展开讨论。波浪溢流试验中的波浪序列根据TMA谱(一种改进的JONSWAP谱,更适用于过度水深的情形)生成。

研究中波浪溢流引起的越堤流量过程由堤顶P1点处的2台ADV和1台超声波水位仪测得的流速和水位时间序列计算得到。对每个组次,将计算得到的越堤流量过程取均值得到平均(单宽)波浪溢流量(简称波浪溢流量, q_{ws});对每个波浪期间的越堤流量过程进行积分,得到单个波浪引起的越堤流量。

2 平均波浪溢流量特征

在研究波浪预留量的分布特征之前,首先看一下平均波浪溢流量本身的特征。波浪溢流可以看作越浪和溢流过程的非线性叠加。通过相同海堤出水高度条件下波浪溢流量和溢流量 q_s 的比值,可以看出波浪溢流中越浪、溢流的相对比例。将所有的波浪溢流量和同等海堤出水高度下对应的稳定溢流量的比值 q_{ws}/q_s 以海堤相对出水高度 R_c/H_{m0} 为 x 轴绘制于图3,其中稳定溢流量用 q_s 为使用的Kindsvater堰流公式计算^[20],由式(6)给出。

表1 稳定溢流试验组次

Table 1 Test cases of stable surge overflow

海堤内坡护坡类型	试验组次	R_c/m	试验时长/min
碾压混凝土护坡	1	-0.151	15
碾压混凝土护坡	2	-0.148	15
碾压混凝土护坡	3	-0.242	15
碾压混凝土护坡	4	-0.308	15
碾压混凝土护坡	5	-0.310	15
碾压混凝土护坡	6	-0.388	60
铰接式护坡砖护坡	7	-0.305	60
高性能加筋草皮护坡	8	-0.296	90

表2 波浪溢流试验组次

Table 2 Test cases of combined wave and surge overtopping

海堤内坡护坡类型	试验组次	R_c/m	H_{m0}/m	T_p/s	试验时长/min
碾压混凝土护坡	1	-0.075	0.672	4.9	30
碾压混凝土护坡	2	-0.078	0.388	3.4	15
碾压混凝土护坡	3	-0.025	0.398	4.9	20
碾压混凝土护坡	4	-0.017	0.475	3.4	15
碾压混凝土护坡	5	-0.289	0.37	3.4	15
碾压混凝土护坡	6	-0.343	0.411	4.8	20
碾压混凝土护坡	7	-0.328	0.459	7.0	30
碾压混凝土护坡	8	-0.321	0.561	4.7	20
碾压混凝土护坡	9	-0.287	0.575	7.1	30
碾压混凝土护坡	10	-0.289	0.659	5.1	20
碾压混凝土护坡	11	-0.236	0.741	7.1	30
铰接式护坡砖护坡	12	-0.219	0.565	5.0	90
铰接式护坡砖护坡	13	-0.182	0.641	6.7	90
铰接式护坡砖护坡	14	-0.255	0.738	4.9	90
铰接式护坡砖护坡	15	-0.279	0.722	4.9	360
高性能加筋草皮护坡	16	-0.117	0.481	6.8	90
高性能加筋草皮护坡	17	-0.096	0.543	6.9	90
高性能加筋草皮护坡	18	-0.317	0.45	7.1	90
高性能加筋草皮护坡	19	-0.307	0.54	6.8	90
高性能加筋草皮护坡	20	-0.271	0.671	7.1	30
高性能加筋草皮护坡	21	-0.280	0.669	6.6	10
高性能加筋草皮护坡	22	-0.285	0.665	7.0	90
高性能加筋草皮护坡	23	-0.282	0.665	6.8	90
高性能加筋草皮护坡	24	-0.277	0.668	7.0	90

$$q_s = C_f \sqrt{g} h_1^{3/2} \tag{6}$$

式中： h_1 ——海堤上游水位， $h_1 = -R_c$ ； C_f ——经验参数，对于碾压混凝土、铰接式护坡砖和高性能加筋草皮分别取 0.5445、0.4438 和 0.415，由稳定溢流试验数据率定得到。

图3中同时点绘了 Hughes 等^[6]试验中对应的数据点。可以看到， R_c/H_{m0} 绝对值较大时， q_{ws}/q_s 趋近于 1，即波浪溢流量接近对应的稳定溢流量，此时波浪溢流过程中溢流占主导地位；当 R_c/H_{m0} 绝对值趋近于 0 时， q_{ws}/q_s 迅速增大，波浪溢流量达到对应稳定溢流量的数倍，此时波浪溢流过程中越浪占主导地位。这种差异以 $R_c/H_{m0} = -0.3$ 为分界点，因此，以 $R_c/H_{m0} = -0.3$ 为界，将 $R_c/H_{m0} \leq -0.3$ 的波浪溢流称为溢流主导的波浪溢流，将 $-0.3 < R_c/H_{m0} < 0$ 的波浪溢流称为越浪主导的波浪溢流。

在 Hughes 等^[6]的研究中，将所有波浪溢流组次一起考虑。本研究以 $R_c/H_{m0} = -0.3$ 来区分不同的波浪溢流组次，以得到更高的估算精度。

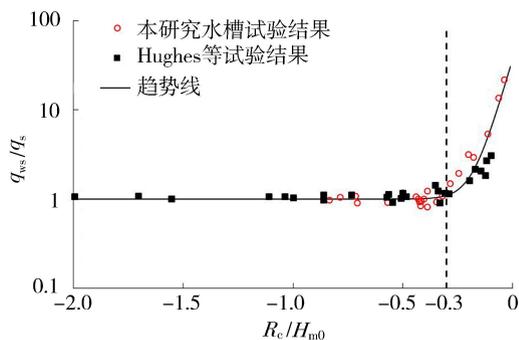


图3 波浪溢流量与稳定溢流量之间关系
Fig.3 Relationship between discharge of surge overflow and that of stable surge overflow

3 单个波浪引起的越堤流量分布

单个波浪引起的越堤流量分布是用于估计海堤和海堤护坡系统安全性的一个重要指标。单个波浪引起的越堤流量受到波浪溢流量、有效波高、谱峰周期等参数的影响。参考 van der Meer 等^[8]、Hughes 等^[6]的研究，这里对单个波浪引起的越堤流量分布同样采用式(1)所示的双参数韦伯分布进行表征。使用双参数韦伯分布对每个波浪溢流试验组次的单个波浪引起的越堤流量进行拟合，得到对应的尺度因子和形状因子。

单个波浪引起的越堤流量分布的韦伯分布形状因子是规律性相对难以捉摸的参数之一，Hughes 等^[6]的研究采用了 2 个无量纲参数对其进行回归分析，见式(3)。韦伯分布的尺度因子反映样本总体(可以理解为均值)的大小，而形状因子反映样本内部个体之间的相对差异性，因此，虽然不同海堤内坡护坡材料会影响到单个波浪引起越堤流量的大小，但这里分析时不再区分三者。事实上，如果区分三者来看，也很难找到三者对于形状因子影响规律的不同。另一方面，如图3所示，波浪溢流量与海堤相对出水高度的关系在 $-0.3 < R_c/H_{m0} < 0$ 的范围和 $R_c/H_{m0} \leq -0.3$ 范围内表现出不同的特征，那么是否说明在这 2 个区间内波浪溢流的水动力特征有所区别？因此在量纲分析中将这 2 个区间内的组次区分开来。经过多次尝试，选用无量纲参数 ($q_{ws}/(gH_{m0}T_p)$) 来建立韦伯分布形状因子的经验关系。将拟合得到的韦伯分布形状因子以 $q_{ws}/(gH_{m0}T_p)$ 为 x 坐标绘制于图4(a)，并将 $-0.3 < R_c/H_{m0} < 0$ 和 $R_c/H_{m0} \leq -0.3$ 范围内的点以不同符号来表示。同时也将式(3)的预测结果一起绘制于图4(a)。

如图4(a)所示，通过对海堤相对出水高度 R_c/H_{m0} 范围的划分，能够实现对韦伯分布形状因子 b 较为准确的估算。图4(a)中拟合曲线的经验公式为

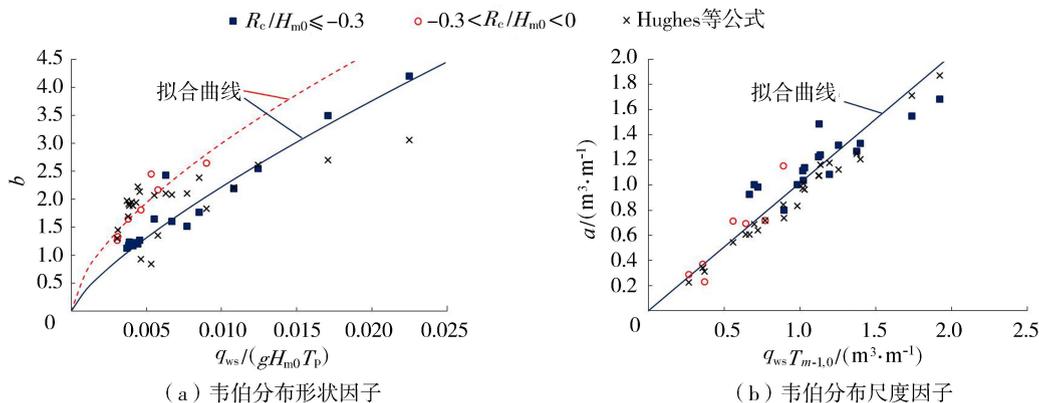


图4 单个波浪越堤流量的韦伯分布形状因子和尺度因子拟合曲线

Fig.4 Best-fit equations for Weibull shape and scale factors of individual overtopping volumes

$$b = \begin{cases} 73.55 \left(\frac{q_{ws}}{gH_{m0}T_p} \right)^{0.76} & R_c/H_{m0} \leq -0.3 \\ 54.58 \left(\frac{q_{ws}}{gH_{m0}T_p} \right)^{0.63} & -0.3 < R_c/H_{m0} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)决定系数 $R=0.9749$, 均方根误差为 0.1438 ; 式(8)决定系数 $R=0.8526$, 均方根误差为 0.2065 ; 适用范围为本试验研究的参数范围。将式(7)与 Hughes 等^[6]的式(3)预测结果相比较, 可以发现二者的预测结果在趋势上接近, 但式(7)通过对海堤相对出水高度的划分, 提高了对形状因子 b 的估算精度。

韦伯分布尺度因子具有一定的规律性, 相对较容易得到, 因为尺度因子反映了样本总体的大小, 其单位与研究对象一致, 其量级与研究对象的均值具有一定相关性。因为这里的研究对象单个波浪引起越堤流量的单位为 m^3/m , 因此通常的研究中会用一个同量纲的特征参数进行线性拟合, 如式(2)选用特征流量与特征周期的乘积来得到该同量纲的特征参数, 本研究同样采用这种方式。经过多次尝试, 最终选择拟合效果最好的参数组合为波浪溢流量与基于波浪谱负一阶矩和零阶矩计算的平均周期 $T_{m-1,0}$ 。将拟合得到的韦伯分布尺度因子以同量纲的特征参数 ($q_{ws} T_{m-1,0}$) 为 x 坐标绘制于图 4(b), 并将 $-0.3 < R_c/H_{m0} < 0$ 和 $R_c/H_{m0} \leq -0.3$ 范围内的点以不同的符号来表示。同时也将 Hughes 等^[6]提出的式(2)预测结果一起绘制于图 4(b)。可以看到, 对于尺度因子 a 的预测来讲, 划分 $-0.3 < R_c/H_{m0} < 0$ 和 $R_c/H_{m0} \leq -0.3$ 范围意义不大, 因此在经验公式的拟合时, 将二者一同考虑, 得到的经验关系如图 4 中的直线所示, 可表示为

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

式(8)决定系数 $R=0.806$, 均方根误差为 0.165 , 适用范围为本研究的参数范围。式(8)计算结果与式(2)^[6]计算结果较为接近, 预测精度上略优。

采用双参数韦伯分布对单个波浪引起的越堤流量分布进行成功表征后, 即可根据韦伯分布参数对其特征值进行计算, 如计算样本的平均值和最大值, 计算公式可以表述为

$$V_{\text{mean}} = a \Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right) \quad (9)$$

$$V_{\text{max}} = a [\ln(N+1)]^{1/b} \quad (10)$$

式中: V_{mean} ——单个波浪引起越堤流量的均值; V_{max} ——单个波浪引起越堤流量的最大值; N ——波浪序列中的波浪个数。

为了对提出的经验公式进行验证, 首先根据式(7)和式(8)计算各试验组次的 a 和 b ; 然后利用计算得到的 a 和 b , 根据式(9)、式(10)估算单个波浪引起越堤流量的均值 V_{mean} 和最大值 V_{max} 。将计算得到的单个波浪引起越堤流量的均值和最大值, 以及试验实测的均值和最大值进行比较, 绘制于图 5。如图 5 所示, 单个波浪引起的 V_{mean} 的计算值与测量值有较好的一致性; 单个波浪引起的 V_{max} 的计算值与测量值在趋势上保持一致性, 但较为离散, 这是由于不规则波列的最大值本身就存在较大随机性, 加上试验波浪序列中的波浪个数 N 不够大引起的。总体来说, 式(7)和式(8)能够对海堤波浪溢流过程单个波浪引起的越堤流量分布实现

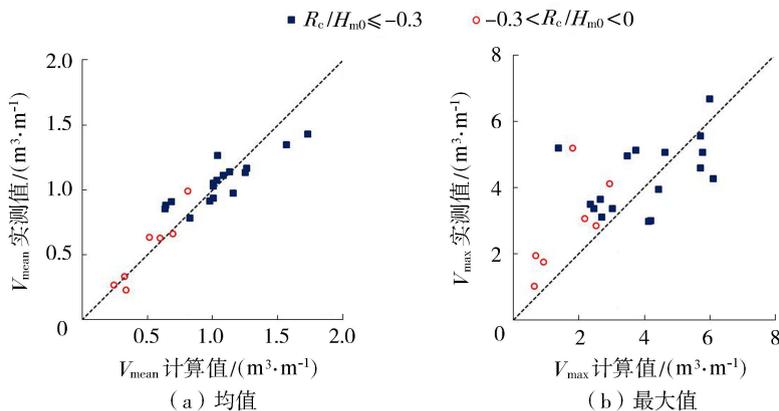


图5 单个波浪引起越堤流量特征值的估算

Fig. 5 Estimations of characteristic for individual overtopping volumes

较好地表征。

需要说明的是,用双参数韦伯分布对单个波浪引起的越堤流量进行拟合时,不同学者使用了不同部分的波浪数据。常规做法是对全部波浪数据进行拟合,如 Hughes 等^[6]的研究;此外,为了使拟合结果更好地反映较大波浪的分布特征,也有学者只对较大波浪进行拟合,如 Victor 等^[11]只对越堤流量大于其均值的波浪进行拟合, Hughes 等^[21]只对越堤流量排在前 10% 的波浪进行拟合。笔者曾通过对本试验中单个波浪引起越堤流量均值和最大值进行预测^[22],对不同拟合方式的优劣进行探讨,结果表明,对全部波浪数据进行拟合的方式略优。因此本研究的拟合使用了全部波浪数据。

4 瞬时越堤流量分布

在波浪溢流的过程中,每个单独波浪的冲击会造成一次瞬时的极值流量,而这个极值流量可能是平均波浪溢流量的数倍。这个极值流量虽然持续时间短,却是造成坝体或海堤护坡侵蚀的主要因素之一。因此,除了单个波浪引起的越堤流量分布之外,其瞬时越堤流量分布也能表达平均波浪溢流量之外的信息,瞬时越堤流量分布的研究对于海堤保护具有重要参考意义。

本研究中波浪溢流引起的瞬时越堤流量取堤顶上 P1 点处的波浪溢流量时间序列。参考 Hughes 等^[6]的研究,这里对瞬时越堤流量分布同样采用式(1)所示的双参数韦伯分布进行表征。对每个波浪溢流试验组次的瞬时越堤流量使用双参数韦伯分布进行拟合,得到对应的尺度因子和形状因子。经过多次尝试,选用无量纲参数 $q_s/(gH_{m0}T_p)$ 来建立韦伯分布形状因子的经验关系,其中 q_s 为同等海堤出水高度 R_c 时,无波浪情况下的稳定溢流量用广为使用的 Kindsvater 的堰流公式计算^[20]。将拟合得到的韦伯分布形状因子以无量纲参数 $q_s/(gH_{m0}T_p)$ 为 x 坐标绘制于图 6,并将 $-0.3 < R_c/H_{m0} < 0$ 和 $R_c/H_{m0} \leq -0.3$ 范围内的点以不同符号来表示。同时也将 Hughes 等^[6]提出的式(5)预测结果及其试验数据一起绘制于图 6。

从本文试验研究和 Hughes 等^[6]试验得到的韦伯分布形状因子的数据点,可以看到 2 点共同特征。(a) 2 组数据均在 $q_s/(gH_{m0}T_p)$ 接近 0 时趋近 0.75;在 $q_s/(gH_{m0}T_p)$ 接近 0 时,波浪溢流退化成越浪,因此在越浪情况下,瞬时越堤流量的韦伯分布形状因子与单个波浪引起越浪量的韦伯分布形状因子^[7]数值上接近,均为 0.75 左右。(b) 随着 $q_s/(gH_{m0}T_p)$ 的增大,韦伯分布形状因子的数值也会增大。但在本试验和 Hughes 等^[6]的试验中,韦伯分布形状因子的增大幅度不同,在两者都设计合理、采集正确的前提下,这种差异是由于模型与测量效应^[4]引起的。由于这 2 个试验的模型设置、数据采集方式都有所不同,这里不对二者之间的差异进行评价,仅给出根据本试验数据得到的最优拟合公式。

$$b = 30.64 \frac{q_s}{gH_{m0}T_p} + 0.8 \quad (11)$$

式(11)未对 $-0.3 < R_c/H_{m0} < 0$ 和 $R_c/H_{m0} \leq -0.3$ 范围进行区分,其决定系数 $R=0.5497$,均方根误差为 0.1242,适用范围为本试验研究的参数范围。瞬时越堤流量的情况与单个波浪引起的越堤流量略有不同,其均值为波浪溢流量,可通过经验公式进行预测^[6]。因此,无需单独为其韦伯分布尺度因子拟合经验公式,而只需要根据其均值——波浪溢流量和韦伯分布形状因子的数值,根据韦伯分布本身的性质来计算其尺度因子,经验公式为式(4)。利用式(11)计算韦伯分布形状因子的计算值,然后将测得的波浪溢流量和计算得到的韦伯分布形状因子的计算值代入式(4),计算得到韦伯分布尺度因子的计算值,并与其实测值进行比较,绘制于图 7。计算值与实测值显示出较好的一致性,证明了式(11)的合理性。

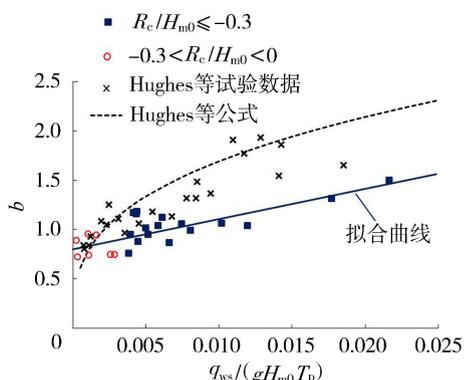


图 6 瞬时越堤流量的韦伯分布形状因子拟合曲线
Fig. 6 Best-fit equation for Weibull shape factor of instantaneous overtopping discharge

5 结 语

在全球气候变化的背景下,极端气候事件的强度和频率都在增加,使得波浪溢流的发生概率进一步提高,对波浪溢流量特征的研究对于海岸防灾有重要意义。

研究基于大型水槽试验结果,分析了不同海堤相对出水高度的波浪溢流量与稳定溢流量之间的关系,并以此为依据把波浪溢流分成溢流主导的波浪溢流和越浪主导的波浪溢流。对大型水槽试验测得的单个波浪溢流引起越堤流量和瞬时越堤流量使用双参数韦伯分布进行拟合,并在区分溢流主导的波浪溢流和越浪主导的波浪溢流的基础上,分别给出了预测单个波浪溢流引起越堤流量和瞬时越堤流量的韦伯分布参数的经验公式。新的经验公式与现有方法相比提高了估算精度。

本文研究成果提高了对波浪溢流量分布的估算精度,能更好地服务于海岸防灾领域;同时,研究成果为波浪溢流的分类及波浪溢流的相关研究提供了一个新的思路。

参考文献:

- [1] 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 Press, 2008: 867-880.
- [2] 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.
- [3] 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: 1-92.
- [4] PULLEN T, ALLSOP N W H, BRUCE T, et al, EurOtop: wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual[M]. [s. l.] :[s. n.], 2007.
- [5] 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: 155-166.
- [6] 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.
- [7] 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. (PAN Yi, ZHANG Zhuang, YUAN Saiyu, et al. An overview of research on combined wave and surge overtopping on levees[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1): 90-94. (in Chinese))
- [8] van de MEER J W, JANSSEN J P F M. Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments[M]. Delft: Delft Hydraulics, 1994.
- [9] OWEN M W. Design of seawalls allowing for wave overtopping[M]. Wallingford, UK: HR-Wallingford, 1980.
- [10] SCHÜTTRUPF H, MÖLLER J, OUMERACI H, et al. Effects of natural sea states on wave overtopping of seadikes[C] // EDGE B L, HEMSLEY J M. Ocean Wave Measurement and Analysis(2001). San Francisco: ASCE Press, 2001: 1565-1574.
- [11] VICTOR L, van de 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.
- [12] NØRGAARD J Q H, LYKKE ANDERSEN T, BURCHARTH H F. Distribution of individual wave overtopping volumes in shallow water wave conditions[J]. Coastal Engineering, 2014, 83: 15-23.
- [13] 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))
- [14] 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

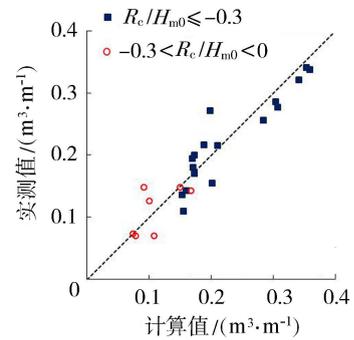


图7 瞬时越堤流量的韦伯分布尺度因子
计算值与实测值比较

Fig. 7 Comparison between calculated and measured Weibull scale factors of instantaneous overtopping discharge

- Engineering, 1996(1): 58-63. (in Chinese))
- [15] 常江, 柳淑学, 李金宣, 等. 滨海斜坡复式护岸断面波浪爬坡试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(1): 60-66. (CHANG Jiang, LIU Shuxue, LI Jinxuan, et al. Experimental research for wave run-up on coastal compound slope revetment [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2015, 55(1): 60-66. (in Chinese))
- [16] 闫科谛, 张庆河. 栅栏板护面斜坡堤越浪数值模拟研究[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(2): 16-19. (YAN Kedi, ZHANG Qinghe. Numerical simulation of overtopping on sloping dike with fence panels[J]. China Harbour Engineering, 2016, 36(2): 16-19. (in Chinese))
- [17] 金超杰, 邵杰, 张芝永, 等. 高滩陡坡地形下电力设施海堤的越浪量试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2): 39-43. (JIN Chaojie, SHAO Jie, ZHANG Zhiyong, et al. Experimental study on wave overtopping rate of seawalls for power facilities in high shoal and steep slope topography[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2): 39-43. (in Chinese))
- [18] 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. (GAO Feng, LEI Hua, ZHANG Ciheng, et al. Three-dimensional stability and overtopping test of breakwater under random wave action[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(10): 50-56. (in Chinese))
- [19] 张金牛, 吴卫, 刘桦, 等. 孤立波作用下斜坡堤越浪量的试验研究[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, 2014, 29(6): 656-662. (in Chinese))
- [20] KINDSVATER C E. Discharge characteristics of embankment-shaped weirs[M]. Washington, DC: Geological Survey, 1964.
- [21] HUGHES S A, THORNTON C I, van de MEER J W, et al. Improvements in describing wave overtopping processes[J]. Coastal Engineering Proceedings, 2012, 33: 35-50.
- [22] PAN Yi, LI Lin, 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(Sup1): 1207-1211.

(收稿日期:2018-09-05 编辑:张志琴)

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63, CN32-1117/TV, ISSN1000-1980, 双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及流体力学、岩土工程、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、环境工程等学科的学术论文。

《河海大学学报(自然科学版)》创办于1957年,是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、CSCD核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,绝大部分为国家科技攻关(重点)项目和各种自然科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并获得华东地区优秀期刊奖、中国高校精品科技期刊奖以及中国期刊方阵“双效期刊”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊等称号。

《河海大学学报(自然科学版)》每逢单月25日出版,国内外公开发行,每期定价15.00元,全年6期,共90.00元。欢迎广大读者通过全国各地邮政局订阅或直接与编辑部联系。

编辑部地址:江苏省南京市西康路1号 《河海大学学报(自然科学版)》编辑部

电话/传真:025-83786343

E-mail:xb@hhu.edu.cn

http://jour.edu.cn/hhdxbzr/ch/index.aspx