

# 直立式防浪墙对单坡斜坡堤越浪量分布的影响

刘曙光<sup>1,2</sup>, 顾家悦<sup>1</sup>, 胡欣<sup>3</sup>, 鞠权赫<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 联合国环境署-同济大学环境与可持续发展学院, 上海 200092;

3. 上海城投(集团)有限公司, 上海 200020)

**摘要:** 考虑到国内普遍带有防浪墙的斜坡堤在风暴潮下受到最大越浪量的破坏威胁, 采用波浪水槽试验测定了破碎波情况下单坡带有直立式防浪墙上的单波越浪量, 基于现有的单坡无防浪墙的越浪量分布计算公式, 引入防浪墙影响因子, 推导出单坡带有防浪墙的越浪量分布形状参数和越浪概率的计算公式. 研究表明, 越浪量分布形状参数、越浪概率都与相对出水高度、防浪墙相对高度有关. 随着防浪墙相对高度的增大, 形状参数呈指数增大趋势, 而越浪概率呈指数减小趋势. 研究结果可为海堤设计提供参考.

**关键词:** 越浪; 越浪量分布; 越浪概率; 防浪墙

**中图分类号:** U656.2<sup>+</sup>1; TV92

**文献标志码:** A

## Influence of Vertical Crown-wall on Probability Distribution of Wave Overtopping over a Sloped Seawall

LIU Shuguang<sup>1,2</sup>, GU Jiayue<sup>1</sup>, HU Xin<sup>3</sup>, JU Quanhe<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. UN Environment-Tongji Institute of Environment for Sustainable Development, Shanghai 200092; 3. Shanghai Chengtou Group Corporation, Shanghai 200020, China)

**Abstract:** Considering the destructive threat of the maximum individual wave overtopping volume on domestically typical sloped seawalls with crown-walls, in this research, wave flume experiments were conducted to measure the individual wave overtopping volume over the sloped seawall with the crown-wall in breaking wave conditions. Based on the empirical fitting equations for the single sloped seawall without crown-walls, influence factors of crown-walls are introduced to the empirical formula for shape factor and probability of wave overtopping probability for seawalls with crown-walls. It is concluded that the shape factor and the probability of wave overtopping are both related to the relative freeboard and the relative wall height. The shape factor

increases exponentially with the increasing of the relative wall height, while the probability of wave overtopping decreases exponentially as the wall height increases. The experimental results can be taken as reference for seawall design.

**Key words:** wave overtopping; probability distribution of wave overtopping; probability of wave overtopping; crown-wall

近年来全球气候变化导致极端气象的频率和强度增加, 风暴潮引起海堤发生越浪甚至破坏事件频发, 造成巨大经济损失. 研究人员以往将平均单宽越浪量  $q$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) 作为海堤的设计标准, Franco 等<sup>[1]</sup>提出考虑到风暴潮时几个大波短时间内对海堤的冲击破坏作用, 在海堤高程确定设计时考虑最大单波越浪量  $V_{\max}$  与越浪量分布更合适. 欧洲新的海堤设计规范中已将越浪量分布和最大单波越浪量作为设计标准.

越浪量分布, 即为单波越浪量概率分布, 是海堤单波越浪量的累积频率分布曲线在某个特定越浪量时所对应的概率值. 以往研究<sup>[2-3]</sup>表明斜坡式与直立式海堤上越浪量分布均服从双参数 Weibull 分布:

$$P(V) = \exp\left[-\left(\frac{V}{a}\right)^b\right] \quad (1)$$

式中:  $P(V)$  是单波越浪量为  $V$  的累积频率,  $V$  是单宽单波越浪量,  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $a$  是比例参数;  $b$  是形状参数. 当越浪量分布服从 Weibull 分布时,  $a$  可以用  $b$  和越浪概率  $P_{\text{ow}}$  的函数表示.

$$a = \frac{1}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)} \frac{qT_m}{P_{\text{ow}}} \quad (2)$$

式中:  $\Gamma$  为伽玛函数;  $T_m$  为平均波周期. 因此, 当  $T_m$  和  $q$  已知时,  $P_{\text{ow}}$  和  $b$  可确定越浪量分布.

收稿日期: 2018-09-25

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD1100401)

第一作者: 刘曙光(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为防洪工程、海岸工程.

E-mail: liusgliu@tongji.edu.cn



扫码  
查看  
作者  
扩展  
介绍

开放科学(资源服务)  
标识码(OSID)

以往研究<sup>[1-5]</sup>包括不同堤前水深、不同海堤坡度等情况下越浪量分布形状参数和越浪概率,但对于我国上海地区典型的设置防浪墙的斜坡式海堤越浪量分布的研究较少<sup>[6]</sup>.因此本文研究直立式防浪墙对于光滑单斜坡堤上越浪量分布形状参数和越浪概率的影响作用.通过不同防浪墙高度的斜坡堤试验,基于以往研究的单坡无防浪墙的越浪量分布形状参数和越浪概率经验公式,引入防浪墙的影响因子,定量分析防浪墙对越浪量分布和越浪概率的影响作用,并研究估算公式.

## 1 越浪量分布研究进展

许多研究表明,仅考虑平均越浪量,则忽略一个或几个大波短时间内对于海堤的冲击、侵蚀作用<sup>[7]</sup>.研究者们认为应将越浪量分布与最大越浪量作为海堤设计标准.因此,近30年来,国内外许多研究者对海堤上越浪量分布的形状参数、越浪概率与水力参数、结构参数之间的关系作了详细的研究.

### 1.1 越浪量分布形状参数

文献[2]对缓坡结构海堤的研究、文献[1]对直立墙式海堤的研究都表明 $b$ 为常数, $b=0.75$ .Bruce等<sup>[8]</sup>通过抛石海堤试验,分析大于平均越浪量部分的越浪值,认为波陡 $s_{m-1,0}$ 与 $b$ 不存在明显相关关系,得到斜坡堤上 $b=0.74$ .Besley<sup>[9]</sup>通过大量对缓坡海堤和直立墙式海堤的试验研究表明, $0.6 < b < 0.9$ 时, $b$ 与波陡、坡面坡度相关关系不明显.

但Hughes等<sup>[10]</sup>总结了文献[2-4]3个研究中的数据,通过对前10%较大越浪值分析,表明此部分越浪值仍然服从双参数Weibull分布,同时 $b$ 可以表示成相对出水高度( $R_c/H_{m0}$ )的函数,如式(3):

$$b = \left[ \exp\left(-0.6 \cdot \frac{R_c}{H_{m0}}\right) \right]^{1.8} + 0.64 \quad (3)$$

式中: $H_{m0}$ 为基于能量谱的有效入射波高, $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$ , $m_0$ 为波谱的零阶矩; $R_c$ 是出水高度.式(3)的适用范围为 $-1.5 < R_c/H_{m0} < 4.0$ .

Victor等<sup>[3]</sup>研究了低出水高度( $-1.00 < R_c/H_{m0} < 1.69$ )、陡坡( $0.36 < \cot \alpha < 2.75$ , $\alpha$ 为斜坡海堤的坡度)的光滑不透水海堤结构,研究表明 $b$ 与波陡无明显关系,而与坡面坡度有相关关系,并且发现波高分布为non-Rayleigh分布的组次的形状参数值大于波高服从Rayleigh分布组次相应的形状参数值.在综合以上2种波高分布组次的情况下,给出如下经验公式:

$$b = \exp\left(-2.0 \cdot \frac{R_c}{H_{m0}}\right) + (0.56 + 0.15 \cdot \cot \alpha) \quad (4)$$

在Victor等<sup>[3]</sup>研究的基础上,Nørgaard等<sup>[11]</sup>对其公式进行了一些修正,使其在浅水波情况时拟合的结果更加符合实际.

Zanuttigh等<sup>[12]</sup>分别以 $R_c/H_{m0}$ 、相对平均越浪量 $\sqrt{q/(gH_{m0}^3)}$ 和量纲一化参量 $q/(gH_{m0}T_{m-1,0})$ 为自变量,与 $b$ 进行相关性分析,结论证明对于光滑表面的海堤而言, $R_c/H_{m0}$ 可以很好地表达 $b$ ,但是对于抛石型斜坡堤则不适用.

### 1.2 越浪概率

海堤的越浪概率 $P_{ow}$ 定义为单个波列中发生越浪的波浪个数 $N_{ow}$ 与波列中波浪总数 $N_w$ 之比<sup>[2-3]</sup>.文献[1-2]给出以 $R_c/H_{m0}$ 为自变量的越浪概率的经验表达式,为

$$P_{ow} = \frac{N_{ow}}{N_w} = \exp\left[-\left(\frac{1}{\chi} \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^2\right] \quad (5)$$

式中:量纲一化参数 $\chi$ 是与海堤结构参数或者水力参数相关的一个系数.文献[2]认为 $\chi$ 与2%相对最大爬高值 $R_{u2\%}/H_{m0}$ 相关.文献[2,13]通过相对最大爬高值与坡面糙率、浅水折减系数、入射波角度折减系数、破波参数之间的经验公式得出爬高的经验公式,再应用于估算 $\chi$ .Franco等<sup>[1]</sup>试验表明,对于深水直立墙海堤 $\chi=0.91$ ,为一个常数量.故根据文献[1-2,13],可以得出直立墙海堤的越浪概率计算公式为

$$P_{ow} = \exp\left[-\left(1.1 \cdot \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^2\right] \quad (6)$$

缓坡对应的 $\chi$ 最大值由文献[2]公式计算,相应的海堤越浪概率为

$$P_{ow} = \exp\left[-\left(0.65 \cdot \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^2\right] \quad (7)$$

缓坡对应的 $\chi$ 最大值由文献[13]公式计算,则相应的海堤越浪概率为

$$P_{ow} = \exp\left[-\left(0.5 \cdot \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^2\right] \quad (8)$$

Victor等<sup>[3]</sup>通过低出水高度光滑表面海堤试验得到越浪概率与坡面坡度具有较强的相关关系,即 $\chi$ 与坡面坡度呈线性相关关系,表达式为

$$P_{ow} = \exp\left\{-\left[(1.4 - 0.30 \cdot \cot \alpha) \frac{R_c}{H_{m0}}\right]^2\right\} \quad (9)$$

即在不同海堤断面结构形式下,越浪概率的区间以式(6)为下边界、以式(8)为上边界<sup>[3]</sup>.

## 2 试验布置和方法

### 2.1 试验布置

试验在上海河口海岸科学研究中心河口海岸交通行业重点实验室波浪水槽中进行. 该波浪水槽长 150 m、宽 1.0 m、高 1.2 m, 具有主动吸收二次反射波浪的功能, 水槽一端安装可生成不同波浪谱不规则波的推板造波机. 海堤模型试验断面堤身为碎石堆成, 海堤表面采用抛光水泥板, 其糙率系数为 0.988. 斜坡堤模型距离造波机推板 50 m. 试验海堤断面与测量仪器设置如图 1a、1b.

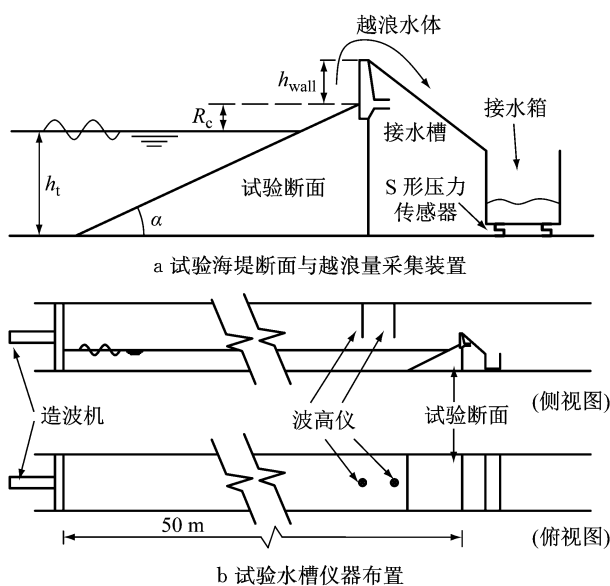


图 1 试验设置示意

Fig.1 Sketch of the experiment set-up

### 2.2 试验方法

#### 2.2.1 单波越浪量的测量

试验中波要素采用电容式波高仪测量, 由计算机自动采集处理, 波浪的入反射分离采用 Goda 和 Suzuki<sup>[14]</sup>的方法完成.

斜坡堤模型后放置 50 cm×50 cm×35 cm 上开口有机玻璃矩形的接水箱接取并测量单波越浪量, 见图 1a, 接水箱底部布置 4 个 S 型总力传感器, 由 DH3820 高速静态应变测试分析系统采集越浪水体重量数据, 转换成相应的越浪量, 采集速率为 100 Hz. 越浪量数据通过 Matlab 软件低通滤波器处理, 形成越浪水体随时间的累积越浪量曲线, 如图 2. 图 2 中曲线累积越浪量值突然增大即为越浪水体进入接水箱. 由于越浪水体进入接水箱后需经过一段时间才能稳定, 此过程对数据采集有一定影响, 故对照试验过程录像, 避免出现 2 次越浪由于时间间隔

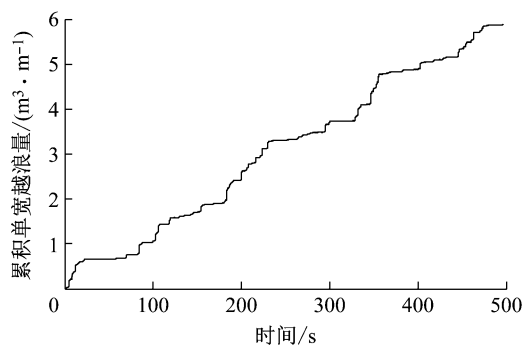


图 2 累积越浪量随时间变化过程曲线

Fig.2 Cumulative overtopping volume time series curve

较短而被作为 1 次越浪计入的情况.

#### 2.2.2 试验参数和试验组次安排

波浪序列以波谱有效波高  $H_{m0}$  和波谱有效波周期  $T_{m-1,0}$  作为目标波要素, 根据 JONSWAP 谱生成, 谱峰系数  $\gamma=3.3$ . 共进行了 178 组试验, 其中, 单斜坡堤无防浪墙组次 48 组, 单斜坡堤设有直立式防浪墙组次 130 组. 表 1 给出了试验中水力参数和结构参数的范围, 所得到的结论和公式均仅适用于破碎波情况. 表 1 中,  $T_{m-1,0}$  为波谱有效波周期,  $T_{m-1,0} = m_{-1}/m_0$ ,  $m_{-1}$  和  $m_0$  分别为波谱的 -1 阶矩和 0 阶矩;  $H_{m0}$  为基于能量谱的有效入射波高;  $\xi_{m-1,0}$  为破波参数, 也称为 Iribarren 数,  $\xi_{m-1,0} = \tan \alpha / \sqrt{H_{m0}/L_{m-1,0}}$ ,  $L_{m-1,0}$  为深水波长,  $L_{m-1,0} = \frac{g}{2\pi} \cdot T_{m-1,0}^2$ ;  $h_t$  为堤前水深;  $h_{wall}$  为防浪墙高度;  $h_{wall}/H_{m0}$  和  $h_{wall}/R_c$  为防浪墙相对高度.

表 1 水力参数、结构参数范围

Tab.1 Test ranges of hydraulic parameters and structural parameters

$\cot \alpha$	$T_{m-1,0}/s$	$R_c/H_{m0}$	$R_c/m$	$H_{m0}/m$
3, 4, 5	1.47~3.67	0.47~2.57	0.075~0.215	0.084~0.190
$\xi_{m-1,0}$	$h_t/m$	$h_{wall}/cm$	$h_{wall}/H_{m0}$	$h_{wall}/R_c$
1.00~4.53	0.25~0.39	2, 4, 6, 8, 10	0.13~0.78	0.09~1.34

## 3 试验结果分析

针对波高服从 Rayleigh 分布的组次, 采用双参数 Weibull 分布拟合单波越浪量分布, 给出 Weibull 分布形状参数  $b$ 、越浪概率的估算公式, 并在此基础上, 量化分析防浪墙的设置对  $b$ 、 $P_{ow}$  的影响, 并相应地给出影响因子的估算公式.

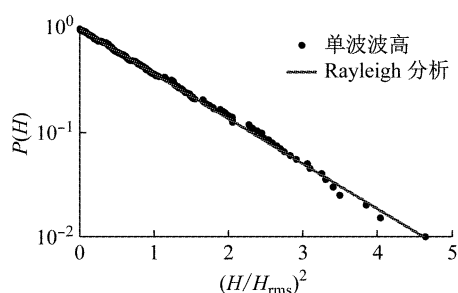
### 3.1 波高分布对越浪量分布的影响

根据 Victor 等<sup>[3]</sup>和 Pan 等<sup>[15]</sup>的研究, 波高分布是否服从 Rayleigh 分布可能对越浪量 Weibull 分布

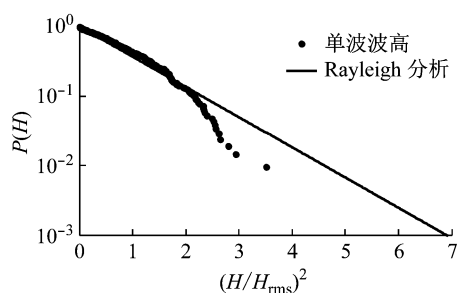
的  $b$  的大小有一定影响:具有较大有效波高的组次的波高分布大多数服从 non-Rayleigh 分布<sup>[16]</sup>;波高服从 non-Rayleigh 分布的组次对应较大的  $b$  值;较大的  $b$  值对应的波列,其最大越浪量值上限较低。

对所有试验组次的波高值进行 Weibull 分布拟合。图 3 给出了波高服从 Rayleigh 分布和 non-Rayleigh 分布的典型的组次。图 3 中  $H_{rms}$  为均方根

波高,  $H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2}$ ;  $P(H)$  为波高  $H$  的累积频率。其中波高服从 non-Rayleigh 分布的组次中较大波高所占百分比小于其对应的 Rayleigh 概率分布值,这一试验结果与 Victor 等<sup>[3]</sup> 和 Nørgaard 等<sup>[11]</sup> 研究中测量到的 non-Rayleigh 波高分布的组次相似。图 4 给出了无防浪墙组次中波高服从 Rayleigh 分布和服从 non-Rayleigh 分布组次对应的  $b$  与  $R_c/H_{m0}$  之间的相关关系。波高服从 non-Rayleigh 分布组次(方形点)的数据点基本上位于服从 Rayleigh 分布组次(圆形点)的数据点上方,即波高服从 non-Rayleigh 分布的组次对应较大的  $b$  值,得到的基本结论与 Victor 等<sup>[3]</sup> 和 Pan 等<sup>[15]</sup> 相一致。



a Rayleigh 分布情况 ( $h_t=0.29$  m,  $H_{m0}=0.133$  m,  $T_{m-1,0}=2.146$  s)



b non-Rayleigh 分布情况 ( $h_t=0.27$  m,  $H_{m0}=0.161$  m,  $T_{m-1,0}=2.050$  s)

图 3 试验组次波高分布示例

Fig.3 Distribution of wave heights in tests

为了避免可能因波高分布不同而造成对越浪量分布存在不确定的影响,只分析波高服从 Rayleigh 分布的试验组次。因此,本研究的结论与公式均仅适用于波高服从 Rayleigh 分布。

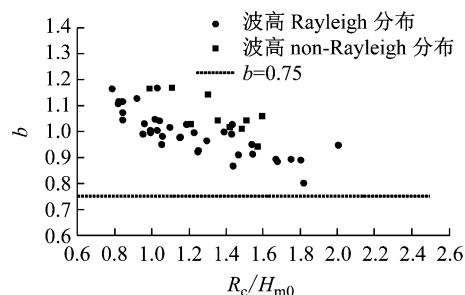


图 4 波高分布服从 Rayleigh 和 non-Rayleigh 组次对应的形状参数

Fig.4 Measured shape factor  $b$  corresponding to Rayleigh distribution and non-Rayleigh distribution

### 3.2 无防浪墙越浪试验

参照文献[2-3]的研究方法,选择双参数 Weibull 分布,即用式(1)拟合越浪量分布,得到  $a$  和  $b$  值。图 5 给出了一组波高服从 Rayleigh 分布的越浪量分布及其最佳拟合 Weibull 分布曲线示例,其  $h_t=0.29$  m,  $H_{m0}=0.133$  m,  $T_{m-1,0}=2.146$  s,  $R_c/H_{m0}=1.31$ ,  $b=0.972$  9。

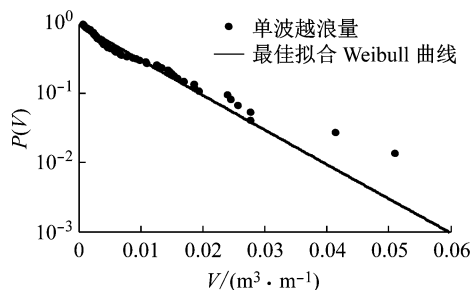


图 5 单波越浪量累积频率分布和超越概率最佳拟合曲线

Fig.5 Distribution of the individual wave overtopping volumes and the optimal fitting Weibull distribution curve

关于应用 Weibull 分布函数拟合越浪量分布时,单个试验中应选取哪一部分越浪量值更具有代表性,国内外已经有很多研究做了相关讨论。文献[4,15]在研究波浪溢流流量分布时用 Weibull 分布函数拟合了单个试验的所有单波溢流流量。文献[2-3,8-9]选用大于平均单波越浪量部分的数据即符合  $V_i > \bar{V}_{meas}$  条件的数据。Hughes 等<sup>[10]</sup> 选用最大 10% 的越浪量数据进行曲线拟合。Pan 等<sup>[15]</sup> 认为选用全部数据进行拟合曲线得到的结果更加能反映出整体越浪量分布规律。Pan 等<sup>[17]</sup> 在研究溢流情况下越浪量分布时,对比 100%、50%、10% 越浪量拟合而得的形状参数和比例参数,结果显示:由  $b_{100\%}$  和  $a_{100\%}$  形成的公式求出的平均越浪量和最大越浪量与实际更

相符,采用部分越浪量数据可能会造成由于数据量较少而出现误差.在本研究中,由图 5 可以发现:较小越浪量部分数据点较多,且对整体分布形态影响很大;较大越浪量值存在很大程度不稳定性,若选用较大部分的单波越浪量进行 Weibull 分布函数拟合,其形状参数可能受到较大越浪量值不稳定性影响,并且拟合结果将不能很好地反映整体越浪量分布情况.故将选取所有单波越浪量数据用于拟合 Weibull 分布函数.

首先将无防浪墙的单斜坡堤作为基准断面,研究无防浪墙情况下单波越浪量 Weibull 分布.根据 Hughes 等<sup>[10]</sup>和 Zanuttigh 等<sup>[12]</sup>成果,采用  $R_c/H_{m0}$  为自变量对  $b$  拟合.图 6 给出了无防浪墙情况,两者的相关关系图及其最佳拟合曲线,即图 6 中实线,相应的最佳拟合公式为

$$b = \left[ \exp\left(-0.49 \cdot \frac{R_c}{H_{m0}}\right) \right]^{1.8} + 0.64 \quad (10)$$

式(10)的相关系数  $R^2=0.6011$ ,均方根误差(RMSE)为 0.049 69.绝大部分数据点均落在 90% 置信区间之间.线①和线③分别对应着 Victor 等<sup>[3]</sup>的式(4)和 Hughes 等<sup>[10]</sup>的式(3),本研究无防浪墙工况对应的形状参数  $b$  值分布于这两者之间,表明试验所得数据在合理的范围内. Hughes 等<sup>[10]</sup>公式得到  $b$  值较小,原因可能是选取最大 10% 越浪量来拟合 Weibull 分布,取到的 Weibull 分布的尾部值即最大部分越浪量较大,从而对应的 Weibull 分布的  $b$  较小. Victor 等<sup>[3]</sup>公式得到  $b$  值较大,原因可能是该公式适用于  $\cot \alpha < 2.50$ ,当缓坡情况下,即  $\cot \alpha \geq 3.00$  时,  $b$  与  $\cot \alpha$  不能呈良好的线性关系.

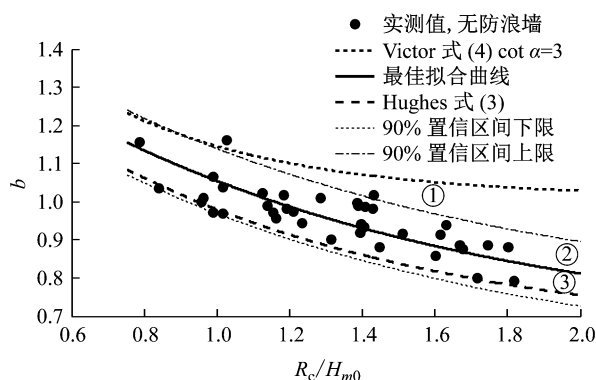


图 6 单坡无防浪墙情况下 Weibull 分布形状参数的最佳拟合曲线

Fig.6 Optimal fitting curve of the shape factor  $b$  for the sloped seawall without crown-wall

越浪量 Weibull 分布比例参数  $a$  与  $P_{ow}$  之间存在理论关系.根据文献[1-2]的研究采用  $R_c/H_{m0}$  作

为自变量,以 Rayleigh 分布函数形式得到单坡无防浪墙越浪概率  $P_{ow}$  最佳拟合式,如式(11):

$$P_{ow} = \exp\left[-\left(0.56 \cdot \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^2\right] \quad (11)$$

式(11)的相关系数为 0.814 6,均方根误差为 0.060 71,可很好预估单坡无防浪墙时的  $P_{ow}$ .

图 7 中,线③为越浪概率的最佳拟合曲线;线①为式(8)即式(9)中  $\cot \alpha = 3.00$  时对应的越浪概率;线②为式(7)对应曲线;线④为式(6)对应曲线. Victor 等<sup>[3]</sup>认为任何情况下越浪概率值都应落在线②和线④之间. Victor 等<sup>[3]</sup>式(9)计算而得的越浪概率值略大于本试验实测值.原因可能是: Victor 等<sup>[3]</sup>越浪概率式(9)适用范围是  $\cot \alpha < 2.50$ ,本试验模型坡度为  $\cot \alpha = 3.00$ . Victor 等<sup>[3]</sup>在  $\cot \alpha = 2.75$  时该坡度对越浪概率的影响系数实测值为 0.79,结合本研究得到的坡度为  $\cot \alpha = 3.00$  时影响系数值为 0.75,可以认为越浪概率与坡面坡度的关系不是呈线性变化,而应该是指数的形式,且存在一个最小值,即当坡度平缓到一定程度,其对越浪概率的影响基本不变.

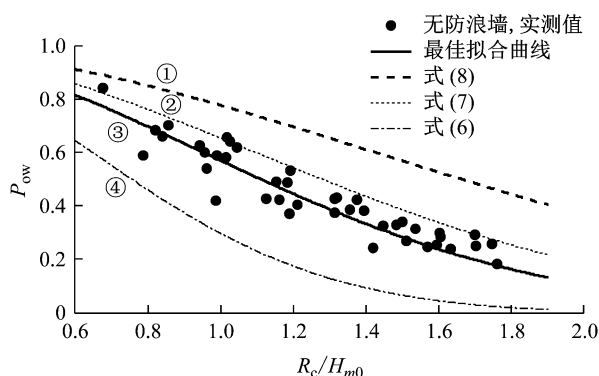


图 7 单坡无防浪墙情况下越浪概率  $P_{ow}$  的最佳拟合曲线  
Fig.7 Optimal fitting curve of the probability of wave overtopping  $P_{ow}$  for the sloped seawall without crown-wall

### 3.3 防浪墙对形状参数的影响

为了研究防浪墙对越浪分布的形状参数的影响,将单坡无防浪墙情况下的越浪量 Weibull 分布形状参数  $b$  的拟合公式作为基准线,在式(10)基础上,参照文献[13,18]中防浪墙影响作用分析方法,将防浪墙的影响作用以影响因子  $\gamma_{v,sf}$  的形式引入越浪量 Weibull 分布形状参数  $b$  的公式中.

式(10)引入影响因子  $\gamma_{v,sf}$  表征防浪墙对越浪量 Weibull 分布形状参数的影响,具体形式如下:

$$b = \left[ \exp\left(-0.49 \cdot \frac{R_c}{H_{m0}}\right) \gamma_{v,sf} \right]^{1.8} + 0.64 \quad (12)$$

图8给出了设有不同防浪墙高度组别的形状参数与相对出水高度之间的相关关系图及其趋势线(趋势线不是相应组别形状参数预估公式对应的曲线)。从图8可以看出:①随着防浪墙的增高,对应的形状参数值明显呈逐渐增大的趋势;②随着防浪墙高度的增加,形状参数 $b$ 的分布越来越分散。

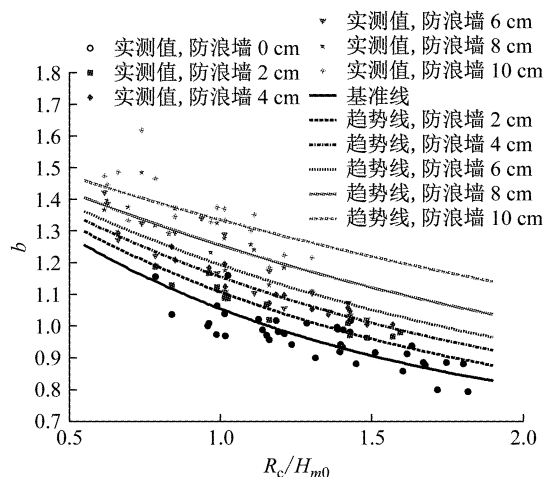


图8 不同防浪墙高度组别的形状参数的对比

Fig.8 Comparison of shape factors of different crown-wall heights

出现上述现象的原因可能是:

(1) 根据图9给出 Weibull 分布概率分布图,形状参数的大小决定了函数图像的形状:形状参数值较小时,绝大部分越浪量很小,很小一部分越浪量是很大的;当形状参数值较大时,越浪量大小分布比较集中,较小和较大的越浪量发生的概率降低. 试验观察发现,防浪墙将入射水体反射回去,反射的水体与下一个入射波浪产生叠加的效果使得堤前形成类似于“壅水”的现象,提升了下一个甚至后续几个入射波的堤前水位,使得  $R_c/H_{m0}$  变小. 随着防浪墙高度增加,这种现象出现的强度增大,随之反映在形状参数上,根据式(10),形状参数会出现增大的现象,也

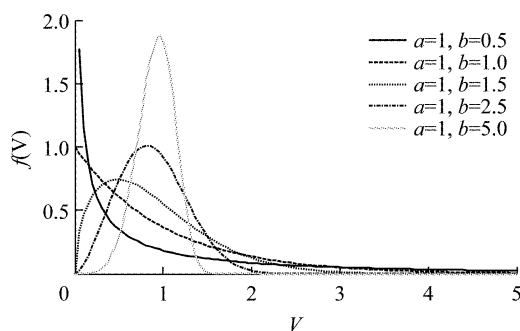


图9 不同形状参数对应的 Weibull 分布概率密度函数

Fig.9 Probability density function of Weibull distribution for different shape factors

就出现了图8所示的情况。

(2) 防浪墙的高度增加使得越浪水体更加混乱,水体非常不稳定导致形状参数 $b$ 的分布离散性也随着防浪墙高度的增加而增加。

将不同防浪墙高度试验组别的形状参数 $b$ 值与边界条件代入式(12),得到影响因子 $\gamma_{v, sf}$ 值,进一步得到 $\gamma_{v, sf}$ 与相对防浪墙高度 $h_{wall}/H_{m0}$ 之间呈指数相关关系,如图10,有少数点落在区间外,绝大部分点在区间之间。

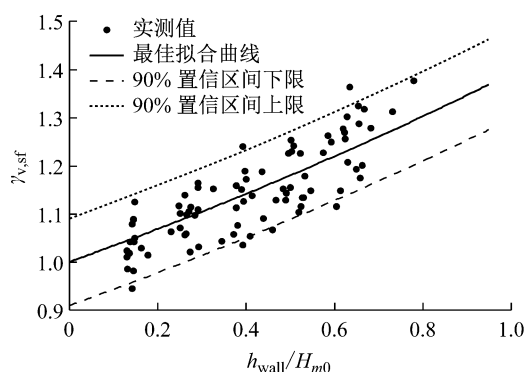


图10 影响因子与防浪墙相对高度之间的关系及其最佳拟合曲线

Fig.10 The relationship between  $\gamma_{v, sf}$  and  $h_{wall}/H_{m0}$  and its optimal fitting curve

破碎波情况下影响因子 $\gamma_{v, sf}$ 的最佳拟合曲线的表达式为

$$\gamma_{v, sf} = \exp\left(0.33 \cdot \frac{h_{wall}}{H_{m0}}\right) \quad (13)$$

式(13)的 $R^2=0.665$ ,均方根误差为0.054 71. 为了验证式(12)和(13)的有效性和合理性,将根据式(12)和(13)计算而得的形状参数值与实测值进行对比,两者关系如图11所示,可以看出预测值与实

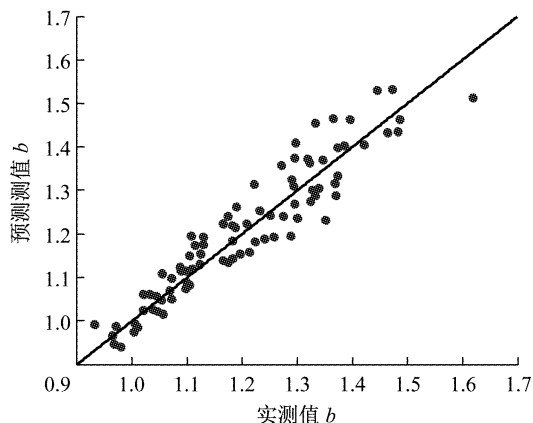


图11 不同防浪墙高度下形状参数实测值与预测值之间的对比

Fig.11 Comparison between measured and predicted shape factors of different crown-wall height

测值的比值接近 1, 所有点与直线  $y=x$  的相关系数  $R^2=0.8868$ . 可以说明, 式(12)和(13)可以较好地预测防浪墙对越浪量分布的形状参数的影响.

### 3.4 防浪墙对越浪概率的影响

与防浪墙对形状参数的研究方法相似, 将无防浪墙情况下的越浪概率  $P_{ow}$  拟合公式作为基准线, 在式(11)基础上, 将防浪墙的影响作用以影响因子  $\gamma_{v,P}$  的形式引入越浪概率  $P_{ow}$  的公式中.

根据 Victor 等<sup>[3]</sup>的研究思路, 在式(11)中引入影响因子  $\gamma_{v,P}$  表征防浪墙对越浪概率的影响作用, 即  $\chi = \gamma_{v,P} / \sqrt{0.56}$ .

$$P_{ow} = \exp \left[ -0.56 \cdot \left( \frac{R_c}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\gamma_{v,P}} \right)^2 \right] \quad (14)$$

图 12 给出了不同防浪墙高度组别的  $P_{ow}$  与  $R_c/H_{m0}$  之间的相关关系及其趋势线. 可以看出, 越浪概率  $P_{ow}$  随着防浪墙高度的增加而减少, 相对出水高度较大时, 越浪概率  $P_{ow}$  减小的幅度相对较大.

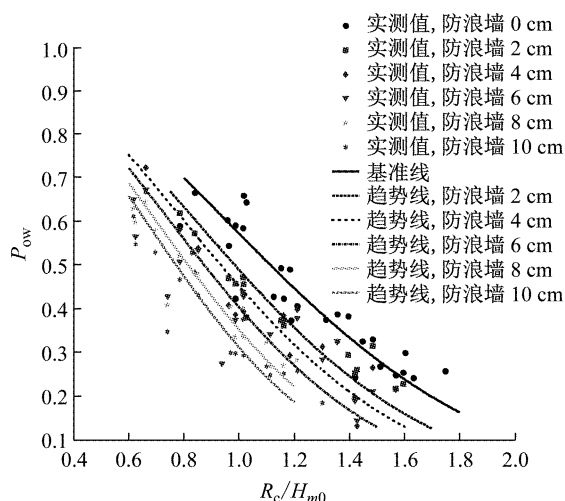


图 12 不同防浪墙高度组别的越浪概率的对比

Fig. 12 Comparison of probability of wave overtopping of different crown-wall height

将不同防浪墙高度试验组别的实测越浪概率  $P_{ow}$  值、边界条件值代入式(14), 得到影响因子  $\gamma_{v,P}$  值, 进一步得到  $\gamma_{v,P}$  与相对防浪墙高度  $h_{wall}/R_c$  之间呈指数相关关系, 如图 13. 有 5 个数据点落在 90% 置信区间外边缘, 绝大部分数据点落在 90% 置信区间内.

破碎波情况下影响因子  $\gamma_{v,P}$  的最佳拟合曲线的表达式为

$$\gamma_{v,P} = \exp \left( -0.54 \cdot \frac{h_{wall}}{R_c} \right) \quad (15)$$

式(15)的相关系数  $R^2=0.6684$ , 均方根误差为 0.05868, 此式可以较好地预估防浪墙对越浪概率

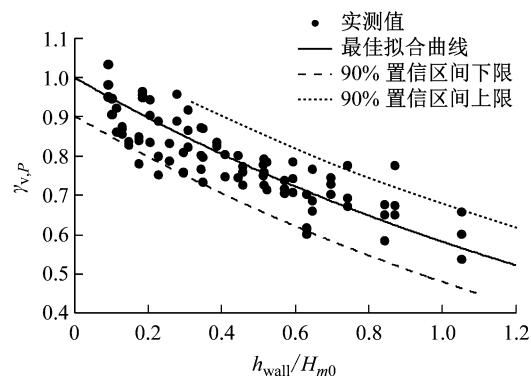


图 13 影响因子与防浪墙相对高度之间的关系及其最佳拟合曲线

Fig. 13 Relationship between  $\gamma_{v,P}$  and  $h_{wall}/R_c$  and its optimal fitting curve

的影响作用.

为了检验式(14)和(15)的有效性和合理性, 将由式(14)和式(15)计算得到的越浪概率预测值与实测越浪概率  $P_{ow}$  值进行比较, 两者关系如图 14. 可以得出, 预测值与实测值的比值都接近于 1, 所有点与直线  $y=x$  的相关系数  $R^2=0.8572$ , 说明了在模型试验参数范围内式(14)和(15)可以较好地预估不同防浪墙高度的单斜坡堤发生越浪的概率大小.

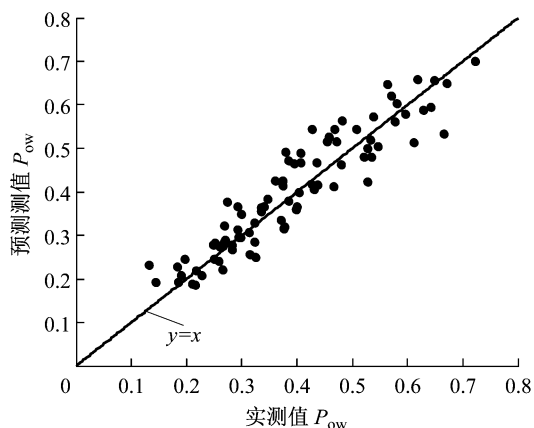


图 14 不同防浪墙高度下越浪概率实测值与预测值之间的对比

Fig. 14 Comparison between measured and predicted probability of wave overtopping of different crown-wall height

## 4 结论

通过物理模型试验, 研究在破碎波情况下防浪墙对单波越浪量分布的形状参数和越浪概率的影响, 得到以下结论:

(1) 双参数 Weibull 分布公式(1)可以很好地描

述破碎波情况下无防浪墙与设置不同高度防浪墙的越浪量分布。

(2) 波高分布是否服从 Rayleigh 分布对越浪量分布有一定的影响,相比于波高服从 Rayleigh 分布的组次,波高服从 non-Rayleigh 分布的组次对应较大的  $b$  值。得到的基本结论与 Victor 等<sup>[3]</sup>和 Pan 等<sup>[15]</sup>相一致。

(3) 无防浪墙越浪试验表明,当斜坡海堤坡度较缓,即  $\cot \alpha \geq 3.00$  时,形状参数  $b$ 、越浪概率  $P_{ow}$  与  $\cot \alpha$  都不能呈很好的线性关系,Victor 等<sup>[3]</sup>公式在缓坡情况下不适用。

(4) 形状参数  $b$  与相对出水高度  $R_c/H_{m0}$  和防浪墙相对高度  $h_{wall}/H_{m0}$  有关。形状参数  $b$  随着防浪墙相对高度  $h_{wall}/H_{m0}$  呈指数增大,即防浪墙相对高度增加,较大越浪量占比增大,最大越浪量出现的概率减小。基于式(10),考虑防浪墙作用的影响因子  $\gamma_{v, sf}$  被引入,得到式(12)和式(13)可以较好地预测破碎波条件下防浪墙对越浪量分布形状参数的影响。

(5) 越浪概率  $P_{ow}$  与相对出水高度  $R_c/H_{m0}$  和防浪墙相对高度  $h_{wall}/R_c$  有关。越浪概率  $P_{ow}$  随着防浪墙相对高度  $h_{wall}/R_c$  呈指数减小。基于式(11),考虑防浪墙作用的影响因子  $\gamma_{v, p}$  被引入,得到式(14)和式(15)可以较好地预测破碎波条件下防浪墙对越浪概率的影响。

提出了破碎波条件下直立式防浪墙对于光滑单斜坡堤上越浪量分布形状参数和越浪概率的影响公式,为在海堤设计中越浪量分布和最大越浪量的估算提供参考。同时,实际工程中还需考虑各种护面块体掩护斜坡堤的情况,需要在此基础上作进一步研究。

## 参考文献:

- [1] FRANCO L, GERLONI M D, MEER J W V D. Wave overtopping on vertical and composite breakwaters[C]// 24th International Conference on Coastal Engineering. Kobe; [S. n.]: 1994, 1030-1044.
- [2] MEER J W V D, JANSSEN J P F M. Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments[J]. Delft Hydraulics, 1994, 12(2): 175.
- [3] 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(6): 87.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] LIU S, JU Q, HUANG W, *et al.* Effects of crown wall and berm on wave-overtopping discharge over a seawall [J]. Journal of Coastal Research, 2018, 34(4): 968.
- [7] 范红霞. 斜坡式海堤越浪量及越浪流试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [8] FAN Hongxia. Experimental study on the overtopping discharge and overtopping flow of the sloped seawall [D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [9] BRUCE T, van der MEER J W, FRANCO L, *et al.* Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters [J]. Coastal Engineering, 2009, 56(2): 166.
- [10] BESLEY P. Wave overtopping of seawalls, design and assessment manual [R]. Wallingford: HR Wallingford Ltd, 1999.
- [11] HUGHES S, THORNTON C, MEER J V D, *et al.* Improvements in describing wave overtopping processes [C/CD]//33th International Conference on Coastal Engineering. Santander; [S. n.], 2012.
- [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.
- [13] ZANUTTIGH B, MEER J W V D, BRUCE T, *et al.* Statistical characterisation of extreme overtopping wave volumes [C/CD]//Ice, Coasts, Marine Structures and Breakwaters. Edinburgh; [S. n.], 2013.
- [14] EUROTOP. European manual on wave overtopping of sea defences and related structures[S/OL]. [2018-09-01]. www.overtopping-manual.com.
- [15] GODA Y, SUZUKI Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments [C/CD]//15th International Conference on Coastal Engineering. Honolulu; [S. n.], 1976.
- [16] 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.
- [17] BATTJES J A, GROENENDIJK H W. Wave height distributions on shallow foreshores[J]. Coastal Engineering, 2000, 40(3): 161.
- [18] 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(752): 1207.
- [19] Van DOORSLAER K, De ROUCK J, AUDENAERT S, *et al.* Crest modifications to reduce wave overtopping of non-breaking waves over a smooth dike slope [J]. Coastal Engineering, 2015, 101: 69.