

· 综 合 ·



规则波作用下斜坡堤越浪量的数值模拟*

段 岳, 高华喜, 孙宇飞, 齐 欣

(浙江海洋大学, 浙江 舟山 316000)

摘要: 台风过境产生极端波浪造成斜坡式海堤越浪, 现有计算越浪量的经验公式都存在适用性的问题。为探求台风天气下舟山区域斜坡堤越浪量计算公式, 基于 VOF 方法, 对 Navier-Stokes 方程和 $k-\varepsilon$ 方程进行求解, 建立速度边界造波和阻尼消波的数值波浪水槽。在水槽中建立斜坡堤模型, 通过改变影响越浪量的相关因素, 模拟台风浪条件下规则波作用于斜坡堤发生越浪。将数值模拟结果与物理模型试验结果进行对比, 分析确定各因子与越浪量系数的定量关系, 提出一种新的计算越浪量系数的经验公式。结果表明, 经验公式突出波陡与越浪量的对数关系, 相对水深越大, 相对堤顶超高越大, μ' 值越小, 越浪量越小。

关键词: 规则波; 斜坡堤; 越浪量; 数值波浪水槽

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0001-06

Numerical simulation of wave overtopping over sloping seawall under regular wave

DUAN Yue GAO Hua-xi SUN Yu-fei QI Xin

Zhejiang Ocean University Zhoushan 316000 China

Abstract: The extreme waves generated by the typhoon cause the overtopping of the sloping seawall. However the existing empirical formulas for calculating the wave overtopping discharge have the applicability. In order to find out the formula for calculating the amount of overtopping of the sloping seawall in Zhoushan area under typhoon weather we solve the Navier-Stokes and $k-\varepsilon$ equations based on the VOF method establish the numerical wave flume with boundary velocity wave generation and wave damping absorber build the model of slope seawall in the flume and simulate the condition of regular waves acting on slope seawall under the typhoon weather by changing the relevant factors affecting wave overtopping discharge. We compare the numerical simulation results with the experimental results of the physical model analyze the quantitative relationship between each factor and the overtopping coefficient and propose a new empirical formula for calculating the overtopping coefficient. The results show that the empirical formula presents the logarithmic relationship between the steepness of outburst wave and the wave overtopping discharge. The larger the relative water depth is the larger the relative height of the dike is and the smaller the μ' value is the smaller the wave overtopping is.

Keywords: regular wave; sloping seawall; overtopping; numerical wave flume

海堤作为海岸防护的工程设施, 是抵御台风浪和风暴潮灾害的重要屏障。近年来, 我国东南沿海地区多次发生超过海堤原有设计标准的台风灾害, 使海堤因波浪越顶而遭到严重破坏。但海

堤设计使其完全不发生越浪是不现实的, 在安全性及经济性的综合考虑下, 我国采用了允许部分越浪的海堤设计标准^[1]。因此, 在海堤建设中对允许越浪量计算成为海堤设计的必要环节。

收稿日期: 2021-04-04

***基金项目:** 国家自然科学基金项目(51879237)

作者简介: 段岳(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口与航道工程技术。

国外学者 Saville^[2]、合田良实^[3]、Owen^[4]、Dewaai 等^[5]、Meer^[6] 先后对海堤的越浪量问题进行了大量的试验研究和理论分析。针对斜坡堤越浪的经验公式我国也有大量的研究成果，虞克等^[7]、朱嘉玲等^[8]、陈国平等^[9] 都各自提出计算斜坡堤平均越浪量的公式。随着近年来台风频发，针对台风浪情况下斜坡堤越浪量的计算公式相对缺乏，Esteban 等^[10] 对海啸作用堤坝产生的过度冲顶进行研究，提出经验公式以确定堤顶超高；Pillai 等^[11] 通过小规模物理模型测试，得到相对水深对堤顶越浪速率影响的新公式；Wang 等^[12] 基于 Flow-3D 软件建立二维数值波浪水槽，讨论越浪量与波高、波周期、临海侧坡度之间的关系，并提出计算越浪量的经验公式。

尽管目前已经有许多关于越浪量的试验成果及相应的经验计算公式，但这些计算公式适用的海况及海堤结构不同，每个经验公式都存在适用性问题。目前针对台风、风暴潮过境时产生的台风浪对斜坡式海堤影响的水动力研究尚不成熟。因此本文通过数值模拟方法针对舟山区域台风浪条件下，研究斜坡堤越浪的变化特性，基于规则波的数值模拟结果，提出越浪量系数与相关参数的经验公式。

1 数值波浪水槽

1.1 数值方法

对于二维情况下，连续性方程和动量方程如下：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + F_x \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + F_y - \rho g \tag{3}$$

式中： ρ 为密度， t 为时间， u 、 v 为 x 、 y 方向速度； μ 为动力黏性系数； p 为压强； g 为重力加速度； F_x 、 F_y 分别为附加源项在 x 、 y 方向上的分量。

VOF (volume of fluid, 流体体积) 输运方程：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(uF)}{\partial x} + \frac{\partial(vF)}{\partial y} = 0 \tag{4}$$

式中： F 为流体体积函数，表示单元内流体所占体积与该单元可容纳流体体积之比。

根据速度边界造波法，在造波边界输入速度解析解的水平及垂向的速度分量即可生成相应水波理论的数值波形，速度分量式为：

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\text{ch}[k(z+d)]}{\text{sh}(kd)} \cos[k(x-ct)] + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \frac{\pi H}{L} \frac{\text{ch}[2k(z+d)]}{\text{sh}^4(kd)} \cos[2k(x-ct)] \tag{5}$$

$$v = \frac{\pi H}{T} \frac{\text{sh}[k(z+d)]}{\text{sh}(kd)} \sin[k(x-ct)] + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \frac{\pi H}{L} \frac{\text{sh}[2k(z+d)]}{\text{sh}^4(kd)} \sin[2k(x-ct)] \tag{6}$$

式中： H 为波高； T 为周期； L 为波长； d 为水深； c 为波速； k 为波数； z 为垂直方向坐标； t 为时间。

1.2 数值波浪水槽建立

在近海区域，相对波高 H/d 对波浪的非线性起决定性作用，相对波高越大，波浪的非线性表现越明显，当非线性作用开始增强，采用线性波模拟已不再适用，因此本文采用二阶斯托克斯非线性波进行模拟。建立长 90 m、高 20 m 的二维数值水槽，造波源设置在水槽的左端，水槽右端设置 20 m 长的阻尼消波区，水槽顶部为压力出口边界，底部为无滑动壁面边界，水槽布置如图 1。其中水深 $d = 0.75$ m，波高 $H = 0.075$ m，周期 $T = 2.51$ s。1[#]、2[#]、3[#]、4[#] 浪高仪所监测的位置分别在距离造波边界 30、50、75 和 85 m 处。

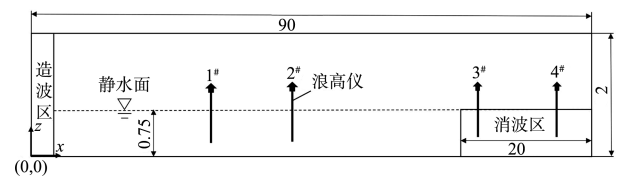


图 1 波浪水槽 (单位: m)

1.3 数值波浪水槽验证

为验证数值波浪水槽模拟波浪传播的有效性，将水槽不同监测点的波面数值解与理论解进行对比，见图 2。由图 2a) 可看出，从造波开始，波

浪到达 1#浪高仪用时 9.86 s, 在 17.73 s 之后波面稳定, 与理论计算完全吻合。结合图 2b), 对比 2#浪高仪与 1#浪高仪处的波幅, 可得波浪沿程衰减率小于 2%, 在允许范围内。图 2c)、d) 为水槽右侧消波区内监测点的波面历时曲线, 波浪进入消波区后, 3#浪高仪处波幅有明显消减, 当波浪传播到 4#浪高仪处波面历时曲线趋于直线, 由此说明消波区的消浪性能良好。通过以上对比验证, 说明此数值波浪水槽合理有效, 可为斜坡堤越浪量数值模拟提供可靠的保障。

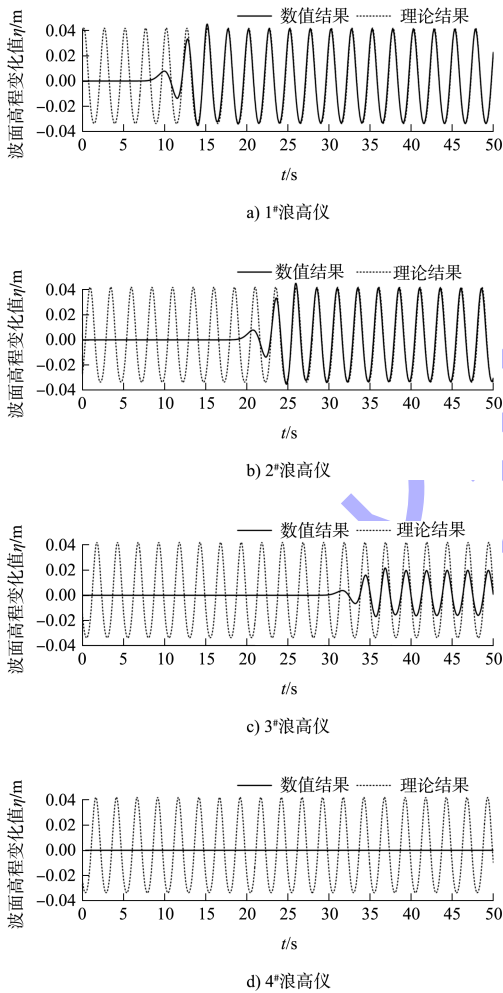


图 2 不同位置波面高程变化值历时曲线

2 斜坡堤越浪量数值模拟

2.1 斜坡堤模型建立

基于上述数值波浪水槽建立斜坡堤模型, 如图 3 所示。堤趾位于 50 m 处, 为得到越浪量且防止水体倒流在堤顶与临岸侧坡交接处对流量进行监测。根据舟山嵎山海洋站所测数据^[13] 台风时期的

$H_{1/10}$ 在 5.0~12.6 m, 平均周期 \bar{T} 在 11.7~15.3 s, 近岸区域水深在 20~30 m。斜坡堤临海侧坡度 m 在 1/6~1/3, 堤底宽为 2.6 m。

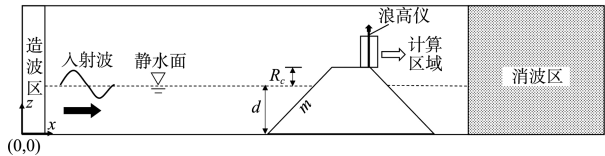


图 3 斜坡堤模型

2.2 越浪量数值模拟验证

结合舟山某实际工程, 对各参变量采用如下变化范围: 相对堤顶超高 $R_c/L=0\sim1.5$ 、相对波陡 $H/L=0\sim0.08$ 、相对堤前水深 $d/H=3\sim11$ 。本文越浪量结果与 Schüttrumpf^[14] 物理模型试验结果对比见图 4。可以看出, 数值波浪水槽所得的越浪量计算结果与试验结果吻合良好, 均匀分布于 $y=x$ 参照线两侧, 离散性较小, 两者相对误差均小于 17.3%。当越浪量小于 5 L/(m·s) 时, 散点位于参照线以下, 数值解较大, 分析原因为波浪破碎和越过堤顶过程中水体混入气泡, 故所测结果大于试验值; 当越浪量较大时, 此因素不作为造成误差的主导因素, 故散点在参照线两侧均匀分布。在数值模拟前, 为减小误差, 对斜坡堤堤身边界网格进行边界层处理, 通过雷诺数和斯特劳哈尔数确定贴体网格厚度, 缓解了越浪量历时曲线出现锯齿形波动, 一定程度上减少了数值误差。

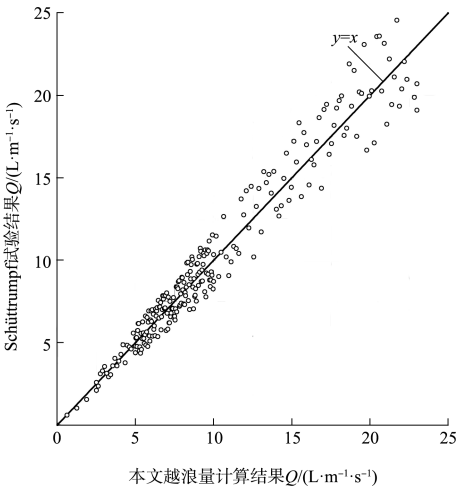


图 4 越浪量计算值与试验值对比

3 结果分析

在波浪作用下, 二维模型所测得单宽斜坡堤越浪量 Q 主要与下列因素有关: 堤顶超高 R_c 、堤前波高 H 、波长 L 、堤前水深 d 、向海面斜坡堤坡度 m , 关系式为:

$$Q=f(R_c, H, L, d, m) \quad (7)$$

按微波理论计算波浪的单位宽度水体体积 V_A , 得到:

$$V_A = 2 \int_0^{\frac{L}{4}} \frac{H}{2} \cos(kx) dx = \frac{HL}{2\pi} \quad (8)$$

可得:

$$Q=\mu' V_A \quad (9)$$

式中: Q 为单位时间单位堤宽的越浪量; μ' 为越浪量系数。

结合式(8)(9), 并参照贺朝敖等^[15]、李社生等^[16]、倪琦等^[17]的关于越波量的经验公式, 式(7)可改写为下列无因次关系式:

$$\mu' = \frac{2\pi Q}{HL} = f\left(\frac{R_c}{H}, \frac{H}{L}, \frac{d}{H}, m\right) \quad (10)$$

式中: H/L 为波陡; R_c/H 为相对堤顶超高; d/H 为相对水深; m 为坡度。

为建立以上 4 个变量与 Q 的关系式, 将 H/L 作为基础变量, x_i 作为参变量, 采用二变量的关系式, 分析单个因素的影响, 则有:

$$\mu' = f_2\left(\frac{H}{L}, x_i\right) \quad (11)$$

3.1 波陡对越浪量的影响

为了求得波陡与越浪量的定量关系, 模拟中选取 $R_c/H=0$ 、 $d/H=9.9$ 、 $m=1/6$ 。仅对 H/L 取不同的值得到越浪量的值。此时, 由于堤前相对水深, 相对堤顶超高均为常数, 故式(11)中的越浪量系数 μ' 仅是波陡的函数:

$$\mu' = f\left(\frac{H}{L}\right) \quad (12)$$

根据最小二乘法原理, 采用二变量的关系式进行线性回归, 图 5 中可见数据点与拟合线离散性较小, 可得如下关系式:

$$\mu' = 0.5 \exp\left[\left(-17.32 \frac{H}{L} + 3.2\right)\right] \quad (13)$$

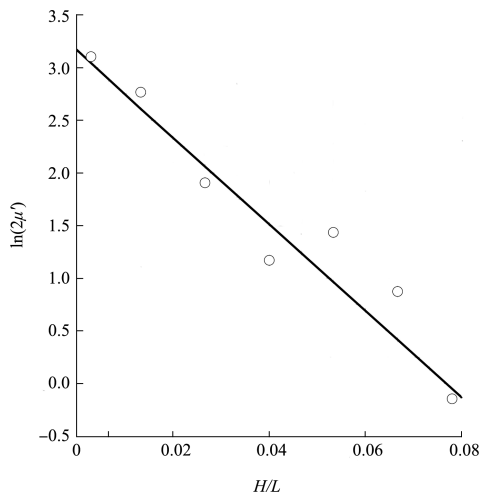


图 5 $\mu'-H/L$ 关系曲线

3.2 堤顶超高对越浪量的影响

为了求得堤顶超高与越浪量系数的定量关系, 控制变量 $d/H=9.9$ 、 $m=1/6$, 设置 3 组相对堤顶超高不同的工况 ($R_c/H=0, 0.68, 1.45$), 所得结果见图 6。

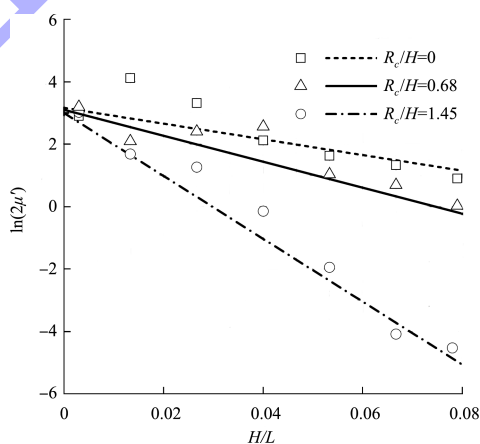


图 6 $\mu'-H/L$ 、 R_c/H 关系曲线

由图 6 可以看出, 不同的相对堤顶超高只改变了 $\ln(2\mu')-H/L$ 的线性关系中直线斜率, 通过 3 组 k 、 R_c/H 的值, 求得关系式为:

$$k = -9.0397 \cdot \frac{R_c}{H} - 1.9684 \quad (14)$$

式中: k 为直线斜率, 根据 Owen 提出的指数关系式:

$$\mu' = ae^{bx} \quad (15)$$

则有: $\ln\mu' = \ln a + bx$ (16)

式中: b 为直线斜率, 故可得:

$$b=-9.039\,7\frac{R_c}{H}-1.968\,4\tag{17}$$

将其代入式(13)中, 可得:

$$\mu=0.5\exp\left[-17.32\left(\frac{H}{L}+0.185\right)\left(0.521\frac{R_c}{H}+0.113\right)\right]\tag{18}$$

3.3 相对水深对越浪量的影响

为探究 μ' - H/L 、 d/H 的函数关系, 将 $R_c/H=0$ 、 $m=1/6$ 变量作为常数, 设置 3 组相对水深不同的工况($d/H=4.52$ 、 8.87 、 9.90), 所得结果如图 7 所示。将相对水深对越浪量系数的影响结合式(18), 可得:

$$\mu'=0.5\exp\left[-17.32\left(\frac{H}{L}+0.185\right)\cdot\left(0.521\cdot\frac{R_c}{H}+0.113\right)\left(0.57\cdot\frac{d}{H}-3.61\right)\right]\tag{19}$$

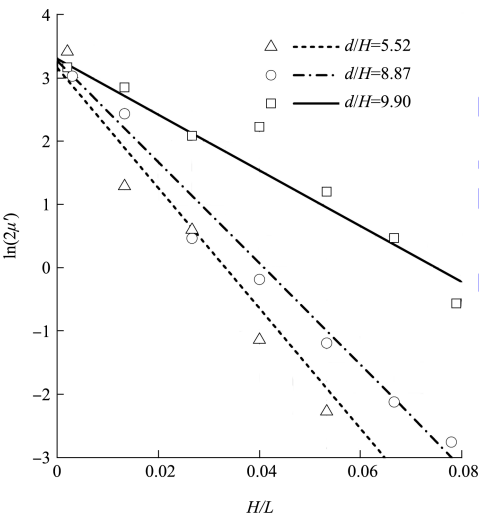


图 7 μ' - H/L 、 d/H 关系曲线

3.4 临海侧坡度的影响

将 $H/L=0.014$ 、 $R_c/H=1.25$ 、 $d/H=8.75$ 作为常数。根据 Owen 公式, 当其他变量为常数时, 越浪量系数 μ' 只是坡度 m 的函数。如图 8 所示, μ' - m 之间具有线性关系为:

$$\frac{2\pi Q}{HL}=32.69-10.446m\tag{20}$$

将临海侧坡度对越浪量系数的影响加入式(19)中, 可得:

$$\mu'=0.5(27.24-8.7m)\exp\left[-17.32\left(\frac{H}{L}+0.185\right)\cdot\right]$$

$$\left(0.521\cdot\frac{R_c}{H}+0.113\right)\left(0.57\cdot\frac{d}{H}-3.61\right)\right]\tag{21}$$

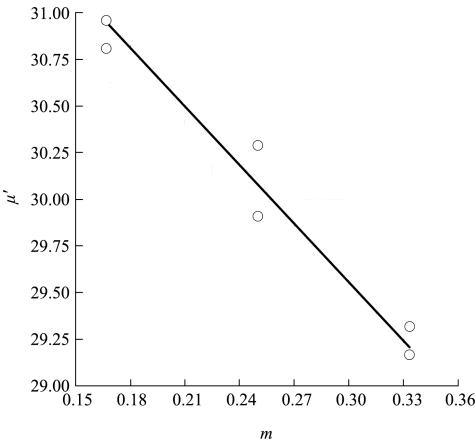


图 8 μ' - m 关系曲线

3.5 所得经验公式有效性验证

本文所提出的经验公式对斜坡堤越浪量进行计算, 所得无量纲越浪量结果与《港口与航道水文规范》越浪量计算公式结果对比, 结合实际工程中波浪为不规则波^[18-19], 采用有效波高 H_s 代入经验公式。验证结果如图 9 所示, 国内外计算越浪量的公式一般控制在 10 倍误差范围内, 即一个量级以内。可以看出, 本文经验公式所求得的越浪量值与规范法较为吻合, 误差在合理范围内。

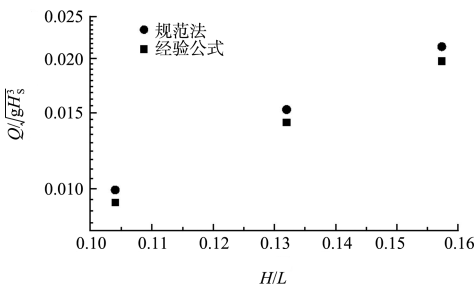


图 9 越浪量计算结果对比

4 结论

1) 本文考虑堤顶超高、堤前波高、波长、堤前水深、临海侧坡度对越浪量的影响, 设置多组工况在数值波浪水槽中进行不透水斜坡堤越浪量模拟, 采用多元回归分析方法, 确定越浪量系数的经验公式, 所求得越浪量的值与规范法较为吻合, 误差在合理范围内。

2) 本文数值波浪水槽所得的越浪量计算结果与试验值结果吻合良好, 均匀分布于参照线两侧,

离散性较小，两者相对误差均小于 17.3 %。

3) 本文经验公式相对波高对越浪量系数影响最为显著，该公式表达能够突出波陡与越浪量的对数关系，相对水深越大，相对堤顶超高越大， μ' 值越小，越浪量越小。当斜坡堤结构、波浪及水深等相关参数在模拟条件范围内，利用该计算公式具有较好的适用性和实际应用价值，可为工程设计提供参考。

参考文献：

[1] 水利部水利水电规划设计总院, 广东省水利水电科学研究院, 浙江省水利水电勘测设计院. 海堤工程设计规范: GB/T 51015—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

[2] SAVILLE T J R. Laboratory data on wave run-up and overtopping on shore structures[R]. Washington: US Army Corps of Engineers, 1955.

[3] 合田良实. 港口建筑物的防浪设计[M]. 刘大中, 孙巨才, 译. 北京: 海洋出版社, 1984.

[4] OWEN M W. Design of seawalls allowing for wave overtopping[R]. Wallingford: Hydraulics Research, 1980.

[5] DEWAAL J P, VANDEER MEER J W. Wave run-up and overtopping on coastal structures[C]//American Society of Civil Engineers. Proceedings of the Twenty-third International Conference on Coastal Engineer. Washington DC: ASCE, 1992: 1758-1771.

[6] MEER J W V D. Wave run-up and wave overtopping at dikes[R]. Delft: Technical Advisory Committee on Flood Defence, 2002.

[7] 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.

[8] 朱嘉玲, 王震, 陈凌彦, 等. 斜向波作用下斜坡堤平均越浪量的试验研究[J]. 水运工程, 2016(5): 9-13, 18.

[9] 陈国平, 周益人, 严士常. 不规则波作用下海堤越浪量试验研究[J]. 水运工程, 2010(3): 1-6.

[10] ESTEBAN M, ROUBOS J J, IIMURA K, et al. Effect of bed roughness on tsunamibore propagation and overtopping[J]. Coastal engineering, 2020, 157: 1-33.

[11] PILLAI K, ETEMAD-SHAHIDI A, LEMCKERT C. Wave overtopping at berm breakwaters: experimental study and development of prediction formula[J]. Coastal engineering, 2017, 130: 85-102.

[12] WANG Z L, YIN Z G, CHEN Y J, et al. Numerical study on the effects of submerged break-water on wave overtopping[J]. Journal of coastal research, 2017, 79(S1): 264-268.

[13] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTJ 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[14] SCHÜTTRUPF H. Wave overtopping flow on seadikes-experimental and theoretical investigation [D]. Braunschweig: Tecnical University of Braunschweig, 2001.

[15] 贺朝敖, 任佐皋. 带胸墙斜坡堤越浪量的试验研究[J]. 海洋工程, 1995, 5(2): 62-70.

[16] 李社生, 陈家渺. 国内外斜坡式防波堤越浪量计算方法比较[J]. 水运工程, 2019(8): 34-40.

[17] 倪琦, 范红霞, 刘涛, 等. 海堤越浪量的物理模型试验及人工智能算法模型预测[J]. 水运工程, 2020(10): 28-33.

[18] 李东洋, 张庆河, 焦方骞. 不规则波作用下斜坡堤越浪的数值模拟[J]. 水道港口, 2018, 39(1): 25-30.

[19] 李东洋. 斜坡堤越浪的三维数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2018. (本文编辑 王璁)

~~~~~

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费，所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。