

文章编号:1005-9865(2022)02-0015-11

扭王字块体斜坡堤越浪量的数值研究

孙大鹏¹, 孙文豪², 修富义³, 刘 飞⁴

(1. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 水发规划设计有限公司, 山东 临沂 276037; 3. 沈阳吉天置业有限公司, 辽宁 沈阳 110165; 4. 长春中海地产有限公司, 吉林 长春 130117)

摘 要: 鉴于《港口与航道水文规范》(JTS145—2015)中缺少扭王字块体斜坡堤越浪量的计算方法, 因此开展相关的试验研究对规范发展和工程设计具有重要意义。在基于 FLUENT 软件的数值模型中, 通常采用多孔介质区中的系数 C 来模拟斜坡上扭王字块体的消浪作用, 而确定每种工况系数 C 的取值是实现数值模拟斜坡堤越浪量的关键。借助物模试验率定出所有工况的系数 C , 通过单一变量分析, 发现 C 值随波陡、相对水深、相对坡肩宽度及相对块体尺寸的增大而增大, 随相对堤顶超高及相对胸墙高度的增大而减小, 综合以上影响因素, 得出不同坡度下系数 C 的计算关系式。研究成果不仅丰富了规范内容, 还为相关的工程设计提供了参考。

关键词: 坡度; 扭王字块体; 斜坡堤; 越浪量; FLUENT

中图分类号: TV139.2 **文献标志码:** A DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2022.02.002

Numerical investigation on overtopping of sloping breakwaters with accropode armor blocks

SUN Dapeng¹, SUN Wenhao², XIU Fuyi³, LIU Fei⁴

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Shuifa Planning and Design Co., Ltd., Linyi 276037, China; 3. Shenyang Jitian Real Estate Co., Ltd., Shenyang 110165, China; 4. Changchun China Overseas Estate, Changchun 130117, China)

Abstract: In view of the lack of calculation methods for the overtopping of sloping breakwaters with accropode armor blocks in the *Hydrological Code for Ports and Channels* (JTS145—2015), it is of great significance to carry out relevant experimental research for the development of code and engineering design. In the numerical model based on the FLUENT software, the coefficient C of the porous media area is usually used to simulate the wave-eliminating effect of the accropode armor blocks, and how to determine the value of the coefficient C for each working condition is the key to numerically simulating the overtopping of sloping breakwaters. The coefficient C of all working conditions is calibrated by the physical model test. Through single variable analysis, it is found that the C increases with the increase of wave steepness, relative depth of water, relative width of shoulder and relative size of block, and decreases with the increase of relative superelevation of embankment top and relative height of parapet. Based on the above influence factors, the calculating formula of inertial resistance coefficients under different slopes are given. The research results not only enrich the content of the code, but also provide a reference for related engineering design.

Keywords: slope; accropode armor blocks; sloping breakwaters; overtopping; FLUENT

收稿日期: 2021-06-02

基金资助: NSFC-山东联合基金项目 (U1706226)

作者简介: 孙大鹏 (1964-), 男, 辽宁大连人, 教授, 主要从事海岸和近海工程研究。E-mail: dpsun@dlut.edu.cn

通信作者: 孙文豪 (1996-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生。E-mail: 767460858@qq.com

由于数值模拟的研究方法相比物模试验具有很多优势,对于斜坡堤越浪量的数值研究,许多学者进行了大量探索。Losada 等^[1]和 Guanche 等^[2]基于 COBRAS-UC 模型,开展了海堤波浪的数值模拟和计算,通过和试验值比较来证明模型的有效和准确。曾冬^[3]使用 DualSPHysics 模型模拟了规则和不规则波入射时斜坡堤的越浪。王鹏等^[4]采用了线性波理论,二次开发 FLUENT 软件并实现了质量源造波,通过建立多孔介质模型数值模拟了块体护面斜坡堤的越浪。王键等^[5]在 FLUENT 软件中开发了二维不规则波的波浪水槽,模拟了单波的斜坡堤越浪量。李东洋等^[6]基于 OpenFOAM 软件进行三维数值水槽中水体在斜坡堤内流动情况的研究。修富义^[7]结合物模试验开展了基于 FLUENT 软件的二维扭王字块体护面斜坡堤越浪量的数值模拟,模型中引入了系数 C ,并给出了坡度系数 $m = 1.5$ 的系数 C 的计算关系式。

鉴于《港口与航道水文规范》(JTS145—2015)^[8]缺少扭王字块体斜坡堤越浪量的计算关系式,且目前有关扭王字块体斜坡堤越浪量的数值研究很少,虽然修富义^[7]给出了考虑因素相对全面的研究成果,但所给 C 值的计算关系式仅适用于 $m = 1.5$ 的情况。基于修富义^[7]的数值构想,并结合前期的物理模型试验^[9],继续进行 $m = 2.0、2.5$ 的扭王字块体斜坡堤越浪量数值模拟研究,并且分别给出系数 C 的计算关系式,以方便供实际工程应用。

1 数值水槽的建立与模拟工况

1.1 控制方程

采用二维黏性流体的连续性方程、动量方程作为基本控制方程,采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型模拟湍流效应,流体自由表面的捕捉采用流体体积 (VOF) 方法。基本控制方程为:

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

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + F_x \tag{2}$$

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

式中: ρ 为流体密度; u 和 w 分别为 x 和 z 方向的速度; μ 为黏性系数; p 为压强; F_x 和 F_y 分别为附加源项。

1.2 数值水槽的概况

采用唐蔚等^[10]与王键等^[11]构建的数值波浪水槽,造波方式为主动吸收式造波,其原理为:在造波边界前部安放两个浪高仪用于采集波浪数据,将数据通过滤波变换得到造波修正信号,根据修正信号在造波端会产生额外速度来吸收掉反射波,达到消除二次反射的目的。水槽的具体尺寸和装置设置见图 1。

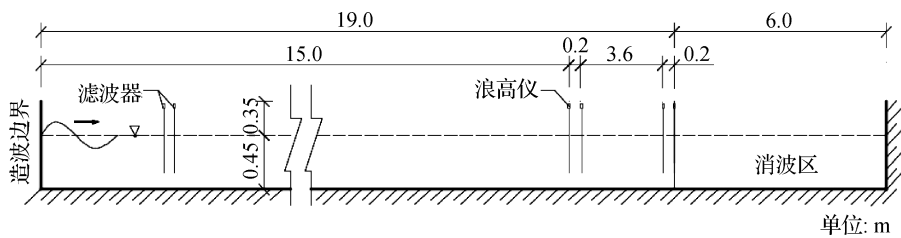


图 1 数值波浪水槽
Fig. 1 Numerical wave flume

1.3 数值水槽的验证

不规则波的波浪谱选用 Jonswap 谱,用于数值水槽验证的波浪参数为: $H_s = 0.112\ 6\text{ m}$ (有效波高), $T_p = 1.55\text{ s}$ (谱峰周期), $d = 0.45\text{ m}$ (水深)。选取距离造波板 15.0 m 及 19.0 m 处的两个位置对波浪数据进行监测及收集,处理收集波浪数据后绘制出模拟波浪谱,通过与目标波浪靶谱的对比,从而鉴定文中采用的数值水槽所造波浪的准确性。波浪参数的统计值如表 1 所示,模拟波浪谱与目标靶谱的对比见图 2。

表 1 波浪参数
Tab. 1 Wave elements

距造波端距离/m	模拟值		目标值	
	H_s/m	T_p/s	H_s/m	T_p/s
15.0	0.113 4	1.55	0.112 6	1.55
19.0	0.112 1	1.56	0.112 6	1.55

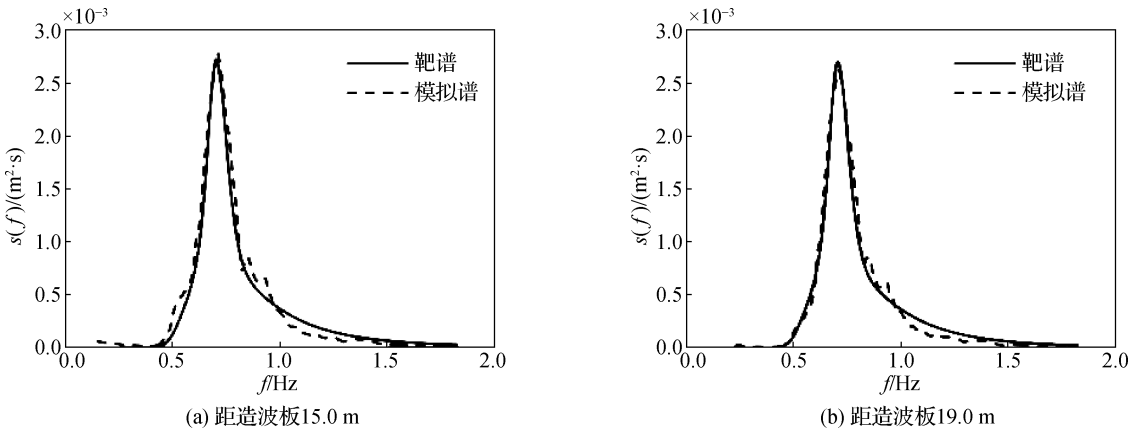


图 2 模拟谱与目标靶谱
Fig. 2 Simulated spectrum and target spectrum

1.4 数值模拟的工况

文中斜坡堤越浪数值模拟的试验工况采用与前期物模试验^[9]相同的工况,见表 2。为使所产生波浪的个数大于 100 个,数值造波时长为 180 s。在 FLUENT 软件中,将斜坡堤模型上铺设扭王字块体的区域设置为多孔介质区,并采用多孔介质中的系数 C 来表示块体在斜坡堤模型上的消波作用。

表 2 数值试验工况
Tab. 2 The numerical experimental conditions

编号	水深 d/m	有效波高 H_s/m	谱峰周期 T_p/s	堤顶超高 H'_e/m	堤顶高程/m	坡肩宽度 b_1/m	胸墙高度 P/m
01	0.517 8	0.129 5	1.66	0.129 5	0.647 3	0.077 7	0.129 5
02	0.493 1	0.123 3	1.62	0.123 3	0.616 4	0.074 0	0.098 6
03	0.470 7	0.117 7	1.59	0.117 7	0.588 4	0.070 6	0.070 6
04	0.470 7	0.078 5	1.29	0.078 5	0.549 2	0.078 5	0.031 4
05	0.481 7	0.060 2	1.13	0.060 2	0.541 9	0.060 2	0.024 1
06	0.450 3	0.112 6	1.55	0.180 1	0.630 4	0.112 6	0.112 6
07	0.450 3	0.112 6	1.55	0.135 1	0.585 3	0.112 6	0.067 5
08	0.450 3	0.112 6	1.20	0.112 6	0.562 8	0.112 6	0.045 0
09	0.450 3	0.112 6	1.55	0.112 6	0.562 8	0.112 6	0.045 0
10	0.450 3	0.112 6	1.90	0.112 6	0.562 8	0.112 6	0.045 0
11	0.450 3	0.112 6	2.69	0.112 6	0.562 8	0.112 6	0.045 0
12	0.450 3	0.112 6	1.55	0.112 6	0.562 8	0.157 6	0.045 0
13	0.450 3	0.112 6	1.55	0.112 6	0.562 8	0.067 5	0.045 0
14	0.450 3	0.112 6	1.55	0.112 6	0.562 8	0.225 1	0.045 0
15	0.450 3	0.112 6	1.55	0.090 1	0.540 3	0.112 6	0.022 5

斜坡堤模型的边界设置为固壁边界,不具有渗透性;斜坡堤模型上铺设的块体采用满足稳定性要求的 3 种扭王字块体($h=0.042\text{ m}$ 、 0.060 m 、 0.078 m),扭王字块体尺寸^[12]如图 3 所示。

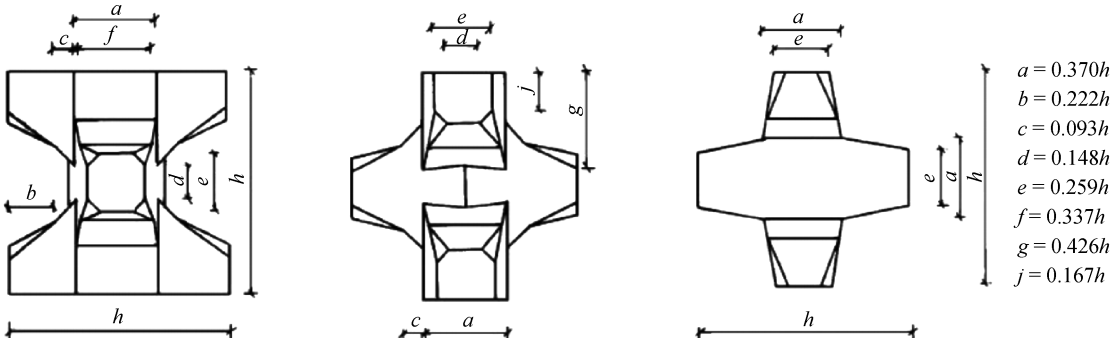


图 3 扭王字块尺寸示例
Fig. 3 The size of accropode armor blocks

2 系数 C 的率定方法

以坡度 $m=2.0$ 、块体尺寸 $h=0.042\text{ m}$ 、表 2 中编号为 01 的试验工况为例来说明系数 C 的率定方法: 第一步,假定一组 C 值(文中取 0.1、0.5、1.0、2.0、5.0),分别输入 FLUENT 软件中可数值计算出每个假定的 C 值对应的越浪量值;第二步,采用上一步得出的数值计算结果绘制出一条 01 试验工况的越浪量与 C 值之间的关系曲线,如图 4(编号 01)所示;第三步,采用 01 试验工况的物模试验^[9]越浪量值从曲线(编号 01)上反查得到 01 试验工况系数的率定值 $C_{\text{率定}}$ 。重复上述率定方法步骤,图 4 给出了 $m=2.0$ 、 $h=0.042\text{ m}$ 的 15 种工况越浪量与 C 之间关系曲线的率定结果。表 3、表 4 分别为 $m=2.0$ 、2.5 的 3 种尺寸扭王字块体系数 C 的率定值。

表 3 $m=2.0$ 的 $C_{\text{率定}}$ 值
Tab. 3 Calibrated C results with $m=2.0$

编号	系数 $C_{\text{率定}}$		
	$h=0.042\text{ m}$	$h=0.060\text{ m}$	$h=0.078\text{ m}$
01	0.15	0.26	0.43
02	0.23	0.35	0.84
03	0.30	0.50	1.26
04	13.45	14.60	15.62
05	19.67	22.35	24.70
06	0.23	0.59	1.00
07	1.10	2.15	3.29
08	10.81	11.74	13.10
09	5.00	6.21	7.47
10	2.82	3.27	4.56
11	0.20	0.55	3.05
12	10.26	11.06	11.83
13	0.39	0.72	2.14
14	17.28	18.25	19.58
15	10.89	12.71	14.38

为了验证 $C_{\text{率定}}$ 值的准确性,再将 $C_{\text{率定}}$ 值输入 FLUENT 软件中进行数值计算,并把数值计算所得越浪量值与物模试验^[9]越浪量值进行对比,如图 5 所示。图 5 中可知,数模值与试验值^[9]吻合较好,表明文中给出的 $C_{\text{率定}}$ 值较为准确。

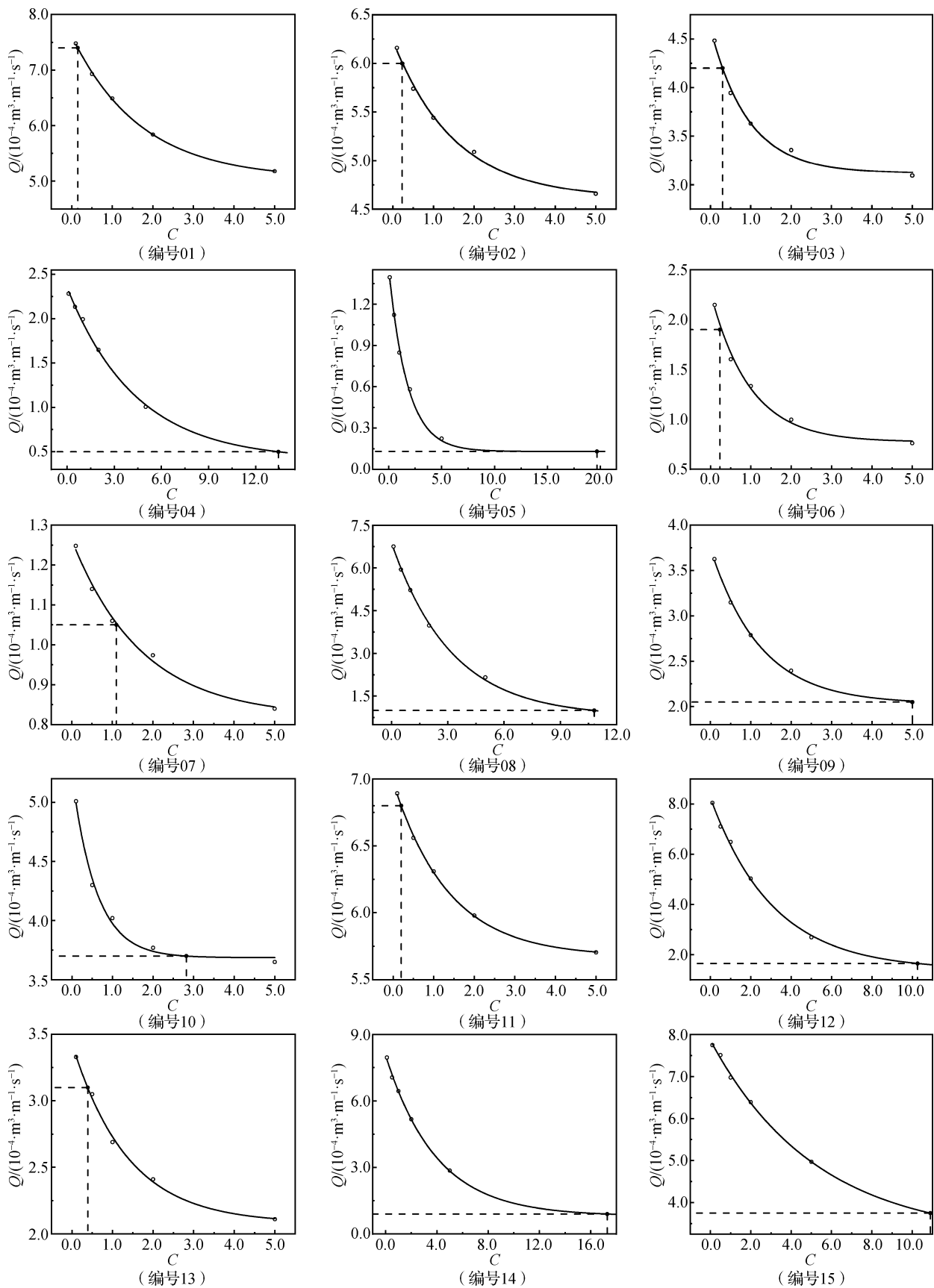


图 4 $m=2.0, h=0.042 \text{ m}$ 的 C 值曲线
Fig. 4 Curve C of $m=2.0$ and $h=0.042 \text{ m}$

表 4 $m=2.5$ 的 $C_{\text{率定}}$ 值
Tab. 4 Calibrated C results with $m=2.5$

编号	系数 $C_{\text{率定}}$		
	$h=0.042\text{ m}$	$h=0.060\text{ m}$	$h=0.078\text{ m}$
01	0.42	0.50	1.30
02	3.70	4.00	4.24
03	6.98	7.31	8.24
04	21.90	22.34	23.61
05	27.38	28.45	29.76
06	0.76	1.50	2.65
07	7.61	8.74	9.61
08	15.70	16.16	16.98
09	11.49	12.81	13.83
10	9.62	10.81	12.67
11	8.93	9.42	11.86
12	16.90	17.20	18.22
13	10.33	10.79	11.42
14	22.23	23.40	24.53
15	17.53	20.57	20.98

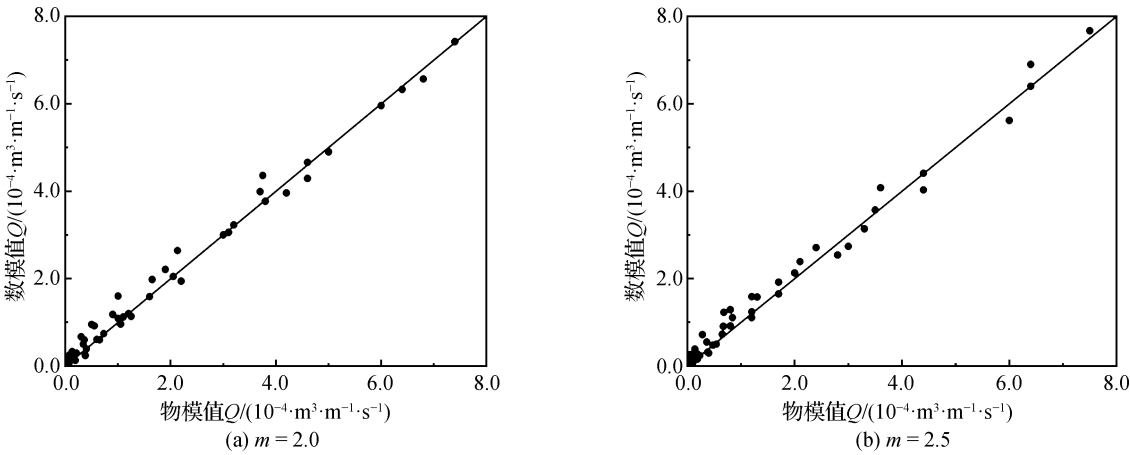


图 5 物模值 Q 与数模值 Q
Fig. 5 Measured and numerical values of Q

3 系数 C 计算关系式

修富义^[7]曾给出坡度系数 $m=1.5$ 的系数 C ,其计算关系式为:

$$C=1.12\exp\left(61.68\frac{H_s}{L}-3.73\frac{H'_c}{H_s}+1.18\frac{b_1}{H_s}+1.85\frac{h}{H_s}\right)-1.12\frac{P}{H'_c}+1.18\frac{d}{H_s}-4.72$$

(4)

式中: d/H_s 为相对水深, H_s/L 为波陡, b_1/H_s 为相对坡肩宽度, H'_c/H_s 为相对堤顶超高, h/H_s 为相对块体尺寸, P/H'_c 为相对胸墙高度。

基于文中数模成果的分析可知:越浪量对 C 值比较敏感;不同坡度系数 m 对应的 C 值与各影响因素之间的函数关系差异较大。为确保数值模拟成果有较高的计算精度,可供实际工程的设计应用,这里延续修富义^[7]的数值模拟思路及分析方法,在相同工况下,将分别给出坡度系数 $m=2.0、2.5$ 的 C 值计算关系式。

基于 π 定理,得出 C 值的无因次计算关系式为:

$$C=f\left(\frac{H_s}{L},\frac{d}{H_s},\frac{H'_c}{H_s},\frac{b_1}{H_s},\frac{P}{H'_c},\frac{h}{H_s}\right)$$

(5)

3.1 坡度系数 $m=2.0$ 的 C 值计算关系式

3.1.1 C 随 H_s/L 的变化趋势

仅改变 H_s/L 的取值,图 6 给出了 C 值随波陡变化的趋势。在图 6 所示范围内, H_s/L 增大时 C 也逐渐增大,呈线性函数关系。

3.1.2 C 随 d/H_s 的变化趋势

仅改变 d/H_s 的取值,图 7 给出了 C 值随相对水深变化的趋势。在图 7 所示范围内, d/H_s 增大时 C 也逐渐增大,呈对数函数关系。

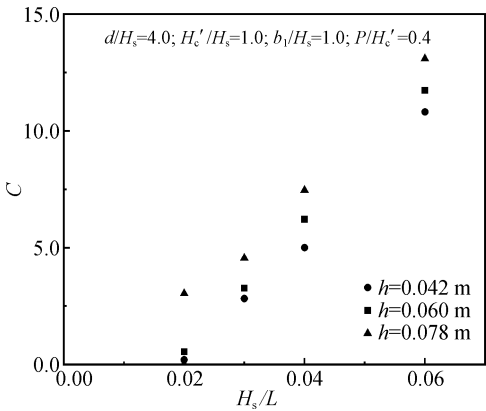


图 6 C 随 H_s/L 的变化趋势

Fig. 6 The changing trend of C with H_s/L

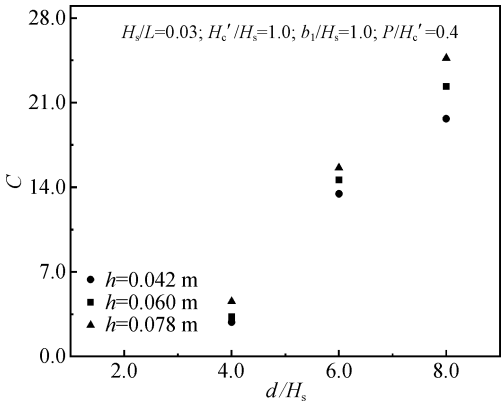


图 7 C 随 d/H_s 的变化趋势

Fig. 7 The changing trend of C with d/H_s

3.1.3 C 随 H'_c/H_s 的变化趋势

仅改变 H'_c/H_s 的取值,图 8 给出了 C 值随相对堤顶超高变化的趋势。在图 8 所示范围内, H'_c/H_s 增大时 C 逐渐减小,呈指数函数关系。

3.1.4 C 随 b_1/H_s 的变化趋势

仅改变 b_1/H_s 的取值,图 9 给出了 C 值随相对坡肩宽度变化的趋势。在图 9 所示范围内两者呈线性函数关系。

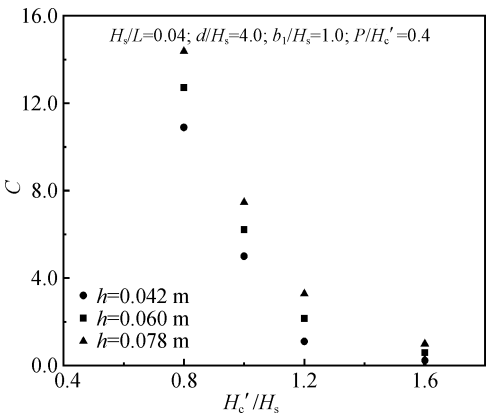


图 8 C 随 H'_c/H_s 的变化趋势

Fig. 8 The changing trend of C with H'_c/H_s

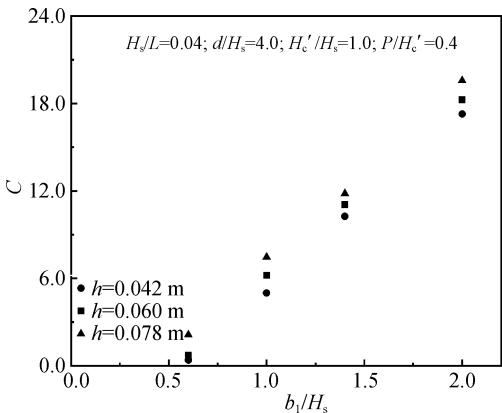


图 9 C 随 b_1/H_s 的变化趋势

Fig. 9 The changing trend of C with b_1/H_s

3.1.5 C 随 P/H'_c 的变化趋势

仅改变 P/H'_c 的取值,图 10 给出了 C 值随相对胸墙高度变化的趋势。在图 10 所示范围内, P/H'_c 增大时 C 逐渐减小,呈线性函数关系。

3.1.6 C 随 h/H_s 的变化趋势

仅改变 h/H_s 的取值,图 11 给出了 C 值随相对块体尺寸变化的趋势。在图 11 所示范围内, h/H_s 增大时 C 也逐渐增大,呈指数函数关系。

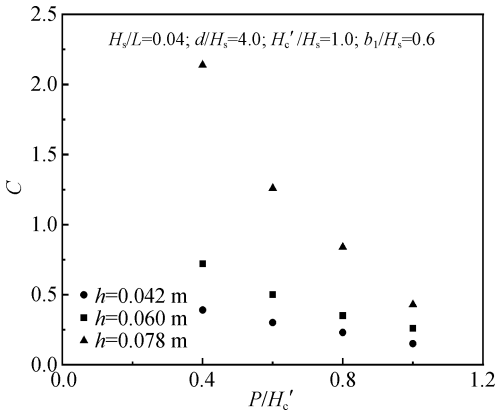


图 10 C 随 P/H'_c 的变化趋势

Fig. 10 The changing trend of C with P/H'_c

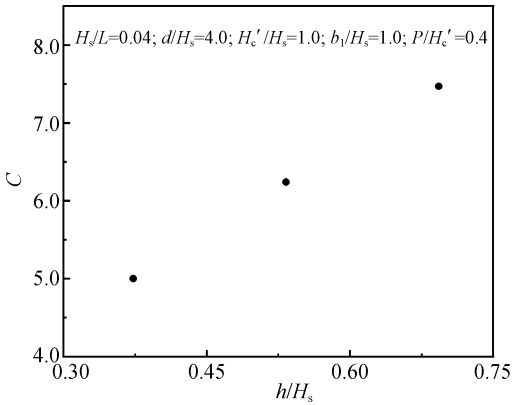


图 11 C 随 h/H_s 的变化趋势

Fig. 11 The changing trend of C with h/H_s

3.1.7 C 值计算关系式 ($m=2.0$)

采用表 3 的 $C_{\text{率定}}$ 值,基于非线性拟合法,给出坡度系数 $m=2.0$ 时系数 C 的计算关系式为:

$$C = \left(0.03 - 0.08 \frac{P}{H'_c} \right) \exp \left(5.03 \frac{h}{H_s} \right) + 115.66 \exp \left(-3.39 \frac{H'_c}{H_s} + 0.94 \frac{h}{H_s} \right) + 22.03 \ln \left(\frac{d}{H_s} \right) + 12.32 \frac{b_1}{H_s} + 262.04 \frac{H_s}{L} - 53.43$$

(6)

3.2 坡度系数 $m=2.5$ 的 C 值计算关系式

3.2.1 C 随 H_s/L 的变化趋势

仅改变 H_s/L 的取值,图 12 给出了 C 值随波陡变化的趋势。在图 12 所示范围内, H_s/L 增大时 C 也逐渐增大,呈指数函数关系。

3.2.2 C 随 d/H_s 的变化趋势

仅改变 d/H_s 的取值,图 13 给出了 C 值随相对水深变化的趋势。在图 13 所示范围内, d/H_s 增大时 C 也逐渐增大,呈对数函数关系。

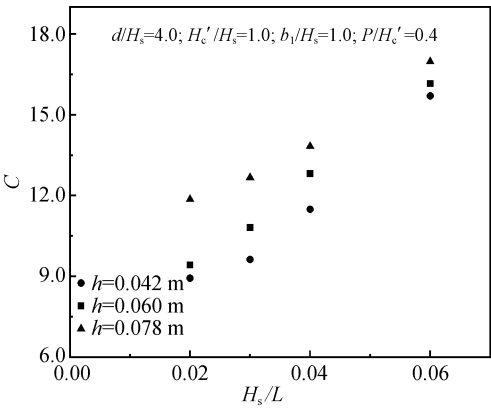


图 12 C 随 H_s/L 的变化趋势

Fig. 12 The changing trend of C with H_s/L

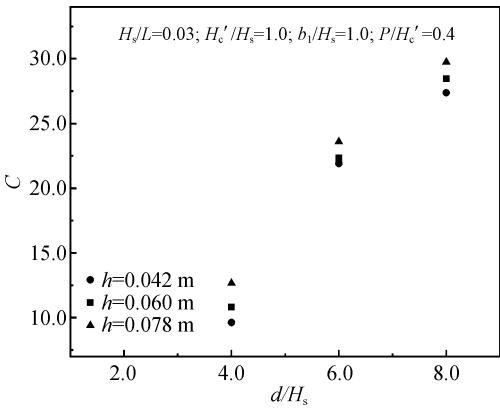


图 13 C 随 d/H_s 的变化趋势

Fig. 13 The changing trend of C with d/H_s

3.2.3 C 随 H'_c/H_s 的变化趋势

仅改变 H'_c/H_s 的取值,图 14 给出了 C 值随相对堤顶超高变化的趋势。在图 14 所示范围内, H'_c/H_s 增

大时 C 逐渐减小, 呈对数函数关系。

3.2.4 C 随 b_1/H_s 的变化趋势

仅改变 b_1/H_s 的取值, 图 15 给出了 C 值随相对坡肩宽度变化的趋势。在图 15 所示范围内, b_1/H_s 增大时 C 也逐渐增大, 呈指数函数关系。

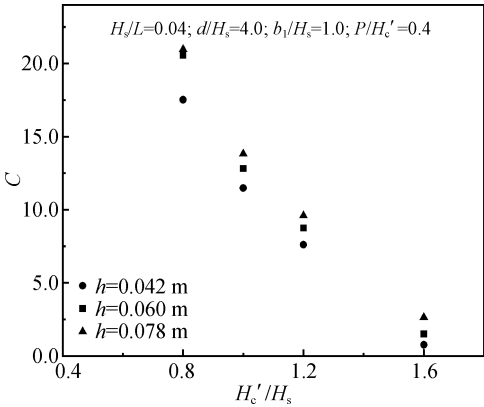


图 14 C 随 H'_c/H_s 的变化趋势

Fig. 14 The changing trend of C with H'_c/H_s

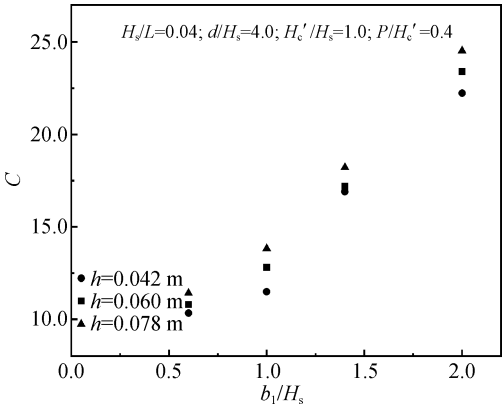


图 15 C 随 b_1/H_s 的变化趋势

Fig. 15 The changing trend of C with b_1/H_s

3.2.5 C 随 P/H'_c 的变化趋势

仅改变 P/H'_c 的取值, 图 16 给出了 C 值随相对胸墙高度变化的趋势。在图 16 所示范围内, P/H'_c 增大时 C 逐渐减小, 呈线性函数关系。

3.2.6 C 随 h/H_s 的变化趋势

仅改变 h/H_s 的取值, 图 17 给出了 C 值随相对块体尺寸变化的趋势。在图 17 所示范围内, h/H_s 增大时 C 也逐渐增大, 呈指数函数关系。

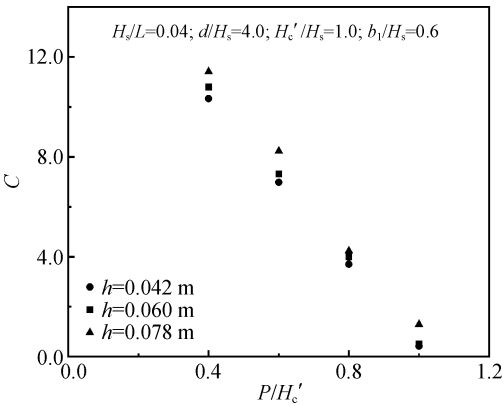


图 16 C 随 P/H'_c 的变化趋势

Fig. 16 The changing trend of C with P/H'_c

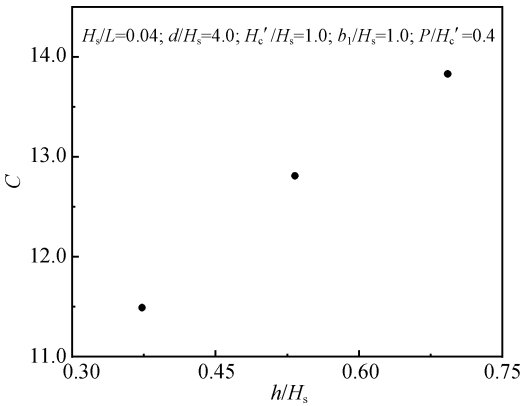


图 17 C 随 h/H_s 的变化趋势

Fig. 17 The changing trend of C with h/H_s

3.2.7 C 值计算关系式 ($m=2.5$)

采用表 4 的 $C_{\text{率定}}$ 值, 基于非线性拟合法, 给出坡度系数 $m=2.5$ 时系数 C 的计算关系式为:

$$C = \left[23.39 \ln \left(\frac{d}{H_s} \right) - 19.42 \ln \left(\frac{H'_c}{H_s} \right) \right] \exp \left(-0.1 \frac{h}{H_s} \right) + 12.85 \exp \left(5.92 \frac{H_s}{L} + 0.32 \frac{b_1}{H_s} + 0.32 \frac{h}{H_s} \right) - 14.94 \frac{P}{H'_c} - 37.93$$

(7)

3.3 C 值计算关系式的验证

3.3.1 计算关系式的准确性验证

为验证文中给出的式(6)、(7)准确性, 将公式计算出的 C 值记为 $C_{\text{计算}}$ 值, 两种坡度 $m=2.0、2.5$ 下的

$C_{\text{计算}}$ 值与 $C_{\text{率定}}$ 值对比如图 18 所示,可以看出两者吻合较好,表明式(6)、(7)能较准确计算出每个工况系数 C 的值。

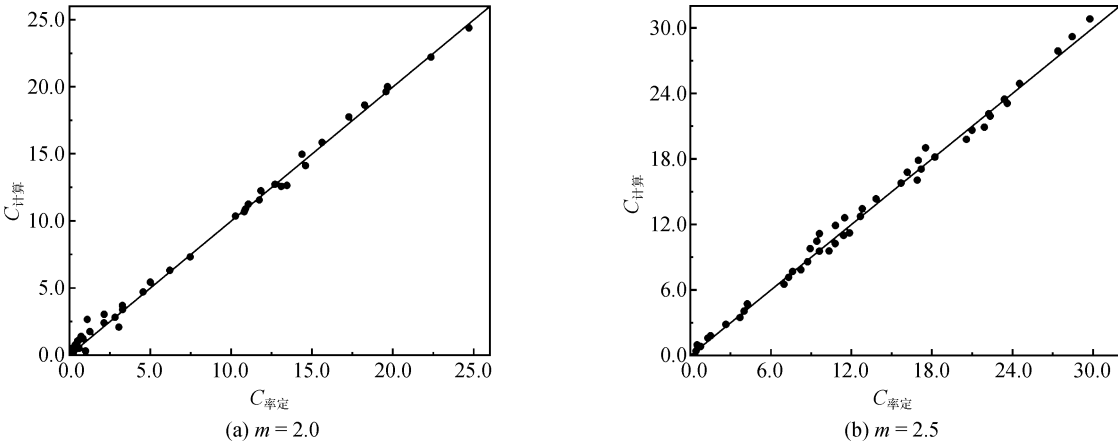


图 18 $C_{\text{率定}}$ 值与 $C_{\text{计算}}$ 值
Fig. 18 Calibration and calculated values of C

3.3.2 计算关系式的有效性验证

为验证文中给出的式(6)、(7)系数 $C_{\text{计算}}$ 值的有效性,将公式计算出的 $C_{\text{计算}}$ 值带入 FLUENT 软件中数值模拟出的越浪量 Q 值与相同工况下的物模试验^[9]越浪量 Q 值进行对比,如图 19 所示,可以看出 $C_{\text{计算}}$ 值可有效数值模拟出相应工况下的越浪量,这表明了式(6)、(7)可有效应用于扭王字块体斜坡堤越浪量的数值模拟计算,继而可供实际工程的设计应用。

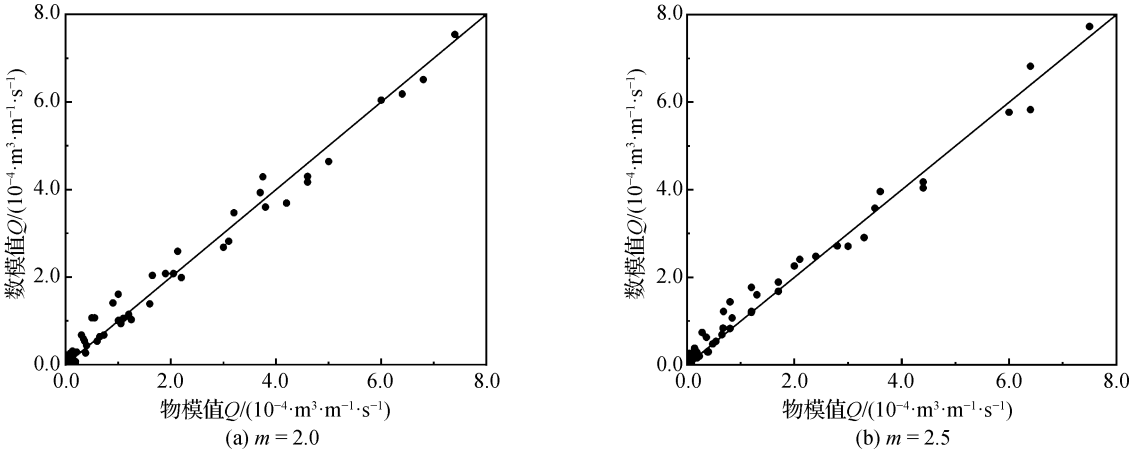


图 19 物模值 Q 和数模值 Q
Fig. 19 Measured and numerical values of Q

4 结 语

由于规范^[8]中缺少计算扭王字块体斜坡堤越浪量的关系式,基于 FLUENT 平台建立了具有主动吸收式造波功能的数值波浪水槽,引入多孔介质区中的系数 C ,进行了扭王字块体斜坡堤越浪量的数值模拟,得到如下结论:

- 1) 结合前期试验成果^[9],确定了每种工况对应的系数 C 值,通过多元回归分析拟合,综合考虑多种越浪量的影响因素,给出了 $m=2.0$ 、 2.5 的系数 C 的计算关系式,并进行了有效性验证。
- 2) 研究发现 C 值受波陡、相对水深、相对坡肩宽度及相对堤顶超高的影响较大,且随波陡、相对水深及相对坡肩宽度的增加而增加,随相对堤顶超高的增加而减小。
- 3) 结合修富义^[7]的数值模拟成果($m=1.5$),研究给出了 3 个常用坡度的扭王字块体斜坡堤系数 C 的计

算关系式。研究成果既丰富了规范的内容,也为实际工程设计提供了重要的参考。

参考文献:

- [1] LOSADA I J, LARA J L, GUANCHE R, et al. Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound seawalls[J]. Coastal Engineering, 2008, 55(1): 47-62.
- [2] GUANCHE R, LOSADA I J, LARA J L. Numerical analysis of wave loads for coastal structure stability[J]. Coastal Engineering, 2009, 56(5/6): 543-558.
- [3] 曾冬. 基于 DualSPHysics 模型的越浪数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2017. (ZENG Dong. Numerical simulation of surging waves based on DualSPHysics model[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese))
- [4] 王鹏, 孙大鹏, 吴浩. 海堤上波浪爬高与越浪计算分析[J]. 海洋工程, 2011, 29(4): 97-102. (WANG Peng, SUN Dapeng, WU Hao. Numerical simulation of wave runup and overtopping over seawalls[J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(4): 97-102. (in Chinese))
- [5] 王键, 孙大鹏, 吴浩. 带胸墙斜坡堤单波越浪量的数值研究[J]. 水道港口, 2018, 39(5): 536-543. (WANG Jian, SUN Dapeng, WU Hao. Numerical study on single wave overtopping of sloping breakwater with crown-wall[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(5): 536-543. (in Chinese))
- [6] 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. (LI Dongyang, ZHANG Qinghe, JIAO Fangqian. Numerical simulation of overtopping of sloping breakwater under the action of irregular waves[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(1): 25-30. (in Chinese))
- [7] 修富义. 扭王字块体护面斜坡堤越浪量的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019. (XIU Fuyi. Investigation on mean overtopping rate of sloping breakwater with accropode armor blocks[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [8] JTS145—2015, 港口与航道水文规范[S]. 2015. (JTS145—2015, Hydrological code for ports and channels[S]. 2015. (in Chinese))
- [9] 孙大鹏, 孙文豪, 王红, 等. 不同坡度下扭王字块体护面斜坡堤越浪量的试验研究[J]. 水道港口, 2021, 42(1): 13-21. (SUN Dapeng, SUN Wenhao, WANG Hong, et al. Experimental investigation on overtopping of sloping breakwaters with accropode armor blocks under different slopes[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2021, 42(1): 13-21. (in Chinese))
- [10] 唐蔚, 孙大鹏, 吴浩. 不规则波与开孔沉箱相互作用数值模拟[J]. 海洋工程, 2017, 35(4): 44-52. (TANG Wei, SUN Dapeng, WU Hao. Numerical research of irregular waves acting on perforated caisson[J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(4): 44-52. (in Chinese))
- [11] 王键, 孙大鹏, 吴浩. 带胸墙斜坡堤越浪量的数值试验研究[J]. 海洋工程, 2018, 36(7): 138-146. (WANG Jian, SUN Dapeng, WU Hao. Numerical study on overtopping of sloping breakwater with crown-wall[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(7): 138-146. (in Chinese))
- [12] JTS154-1—2011, 防波堤设计与施工规范[S]. 2011. (JTS154-1—2011, Code of design and construction of breakwaters[S]. 2011. (in Chinese))