

文章编号:1005-9865(2019)05-0001-09

扭王字块体护面斜坡堤越浪量试验研究

孙大鹏¹, 修富义¹, 王 键², 董 胜³, 赵沛泓¹, 刘 飞¹

(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. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222; 3. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100)

摘 要:针对现行规范中缺少扭王字块体护面斜坡堤越浪量的计算方法, 考虑波陡、相对水深、相对堤顶超高、相对坡肩宽度、相对胸墙高度和相对块体尺寸等影响因素, 通过波浪水槽物模试验, 运用多元回归方法, 给出了扭王字块体斜坡堤越浪量中护面结构影响系数和平均越浪量的计算公式。与试验值和其它计算公式进行了验证对比, 结果基本吻合, 具有一致性的规律。研究成果丰富了规范内容, 对斜坡堤工程设计具有重要参考意义。

关键词:不规则波; 斜坡堤; 越浪量; 扭王字块体; 护面结构影响系数

中图分类号: TV139.2

文献标志码: A

DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2019.05.001

Experimental investigation on mean overtopping rate of sloping breakwater with accropode armor blocks

SUN Dapeng¹, XIU Fuyi¹, WANG Jian², DONG Sheng³, ZHAO Peihong¹, LIU Fei¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 3. Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In view of the lack of the calculation method for the mean overtopping rate of sloping breakwater with accropode armor blocks in the current code, through two-dimensional physical model experiment in the wave-current flume, systematical analysis and study on the calculation method for the mean overtopping rate of sloping breakwater with accropode armor blocks have been carried out and the influence factors including the wave steepness, the relative water depth, the relative superelevation of embankment, the relative shoulder platform width, the relative shoulder platform height and the relative block size are considered. The formula for the influence coefficient of the revetment structure of the slope breakwater with accropode armor blocks and the formula for calculating the mean overtopping rate are given by means of the multiple regression method. The research result enriches the content of the code and is of great reference significance to the design of slope embankment engineering.

Keywords: irregular wave; sloping breakwater; mean overtopping rate; accropode blocks; the influence coefficient of revetment structure

越浪量是斜坡堤设计的控制性指标, 关系着工程的安全性和经济性。自 20 世纪 50 年代开始, 众多学者就对越浪量的计算公式进行了大量研究。范红霞^[1]通过物理模型试验讨论了块体种类、胸墙高度和坡肩宽度等因素对斜坡堤平均越浪量的影响, 运用多元线性回归方法得出平均越浪量的计算公式, 可公式只适用于坡度为 1:2 的情况; 章家昌等^[2]和王红等^[3]通过物理模型试验, 分别给出了不规则波作用下斜坡堤堤顶有

收稿日期: 2019-01-17

基金资助: NSFC-山东联合基金(U1706226); 国家自然科学基金资助项目(51279027)

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: 修富义。E-mail: 18642656720@163.com

胸墙和无胸墙的越浪量计算公式,相关的研究结果已经被纳入《港口与航道水文规范》^[4],但该公式无法计算扭王字块体护面斜坡堤的越浪量;陈国平等^[5-6]考虑波浪爬高和堤顶超高两个主要因子,提出了不规则波越浪量的计算公式,可未考虑块体尺寸等因素对越浪量的影响;王键等^[7]、杨锦凌等^[8]和王鹏等^[9]均借助于 FLUENT 软件,数值模拟斜坡堤越浪过程,对规范中越浪量的计算公式进行有益研究,但他们均考虑在光滑混凝土板护面情况下的计算公式,未研究扭王字块体护面斜坡堤越浪量的计算公式。扭王字块体在斜坡堤的设计施工中,有着广泛的工程应用,但从前人工作中看出,关于扭王字块体护面斜坡堤越浪量的研究较少,且各家公式都有自己的适用范围和局限性,因此深入开展扭王字块体护面斜坡堤越浪量问题的研究,具有重要意义。现行《港口与航道水文规范》^[4]中关于块体护面斜坡堤越浪量通常采用如下的方式进行计算:

$$Q = 0.07^{H_c/H_{1/3}} \exp\left(0.5 - \frac{b_1}{2H_{1/3}}\right) BK_A \frac{H_{1/3}^2}{T_p} \left[\frac{0.3}{\sqrt{m}} + \text{th}\left(\frac{d}{H_{1/3}} - 2.8\right) \right]^2 \ln \sqrt{\frac{gT_p^2 m}{2\pi H_{1/3}}} \quad (1)$$

式中: Q 为单位时间单位堤宽的越浪量, $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$; H_c' 为胸墙墙顶在静水面以上的高度, m ; $H_{1/3}$ 为有效波高, m ; b_1 为胸墙前坡肩, m ; T_p 为谱峰周期, s ; m 为斜坡坡度系数; d 为建筑物前水深, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; B 为经验系数; K_A 为护面结构影响系数,当斜坡堤护面为混凝土板时, K_A 取 1.00。

规范中越浪量计算公式只适用于混凝土板、抛石、扭工字块体和四脚空心方块四种护面结构型式,缺少扭王字块体护面斜坡堤越浪量的计算方法。有鉴于此,这里综合考虑波陡、相对水深、相对堤顶超高、相对坡肩宽度、相对胸墙高度和相对块体尺寸等影响因素,通过物理模型试验,给出了扭王字块体斜坡堤越浪量公式中护面结构影响系数和平均越浪量的计算公式。

1 试验概况

1.1 试验条件

物模试验在波浪水槽中进行,试验水槽尺寸为 $50\text{ m}\times 3\text{ m}\times 1\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),造波端配备液压伺服不规则造波机系统,水槽沿宽度方向隔成宽 2.2 m 和 0.8 m 两部分,模型布置在 0.8 m 宽的一侧,水槽末端铺设缓坡消能网装置。本试验采用不规则波,不规则波的波谱为 JONSWAP 谱($\gamma=3.3$)。

波浪水槽中的斜坡堤结构断面试验模型如图 1 所示。图中, d 表示堤前水深; H_c' 表示堤顶超过静水面的距离(后文简称“堤顶超高”); m 表示斜坡坡比,本次物模实验取 $m=1.5$; b_1 表示坡肩宽度; P 表示胸墙高度。

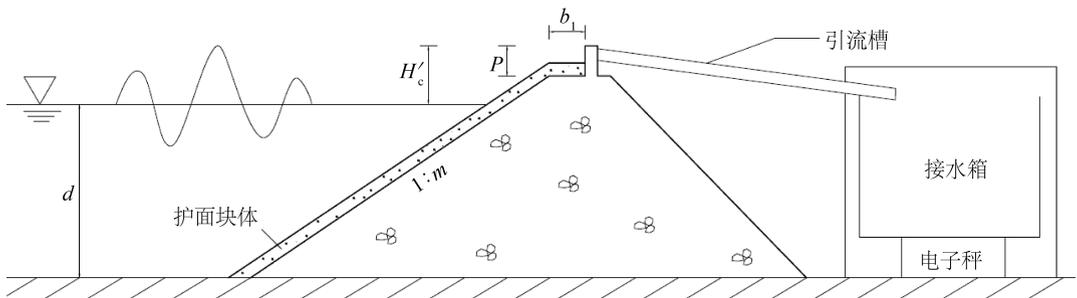


图 1 试验断面示意

Fig. 1 Sketch of experimental model

试验在平底水槽中进行,设计断面为坡度 $m=1.5$ 的斜坡堤。在波浪基本不破碎的情况下,波陡 H_s/L 取 $0.02\sim 0.06$,相对水深 d/H_s 取 $2.2\sim 8.0$,相对堤顶超高 H_c'/H_s 取 $0.8\sim 1.6$,相对坡肩宽度 b_1/H_s 取 $0.6\sim 2.0$,相对胸墙高度 P/H_c' 取 $0.4\sim 1.0$,扭王字块体相对块体尺寸 h/H_s 取 $0.37\sim 0.69$ (物模试验中采用满足稳定要求的四种重量扭王字块体,文中以扭王字块体尺寸 h 区分块体重量,扭王字块体尺寸 h 如图 2 所示, h 依次是 4.2 、 6.0 、 6.5 及 7.8 cm)。扭王字块体的摆放形式为随机安放,摆放密度满足规范要求。

试验过程中,首先开展混凝土板护面斜坡堤越浪量试验,试验工况见表 1。采用相同试验工况组合,再依次开展 h 为 4.2 、 6.0 、 6.5 和 7.8 cm 的扭王字块体护面斜坡堤越浪量试验。共计试验 $16\times 5=80$ 组次,每组试验至少重复 3 次,取均值。

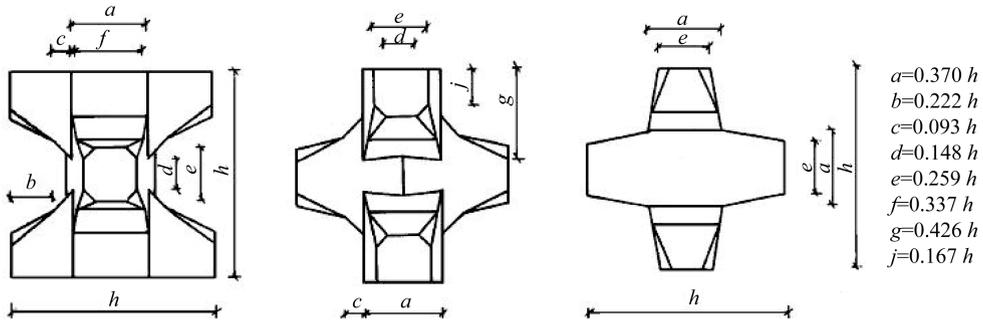


图 2 扭王字块体尺寸示意

Fig. 2 Shape of accropode blocks

表 1 试验工况组合

Tab. 1 Combinations of experimental conditions

试验顺序	水深 d/cm	有效波高 H_s/cm	谱峰周期 T_p/s	堤顶超高 H'_c/cm	堤顶高程 /cm	坡肩宽度 b_1/cm	胸墙高度 P/cm
1	51.78	12.95	1.66	12.95	64.73	7.77	12.95
2	49.31	12.33	1.62	12.33	61.64	7.4	9.86
3	47.07	11.77	1.59	11.77	58.84	7.06	7.06
4	47.07	7.85	1.29	7.85	54.92	7.85	3.14
5	48.17	6.02	1.13	6.02	54.19	6.02	2.41
6	45.03	11.26	1.55	18.01	63.04	11.26	11.26
7	45.03	11.26	1.55	13.51	58.53	11.26	6.75
8	45.03	11.26	1.20	11.26	56.28	11.26	4.50
9	45.03	11.26	1.55	11.26	56.28	11.26	4.50
10	45.03	11.26	1.90	11.26	56.28	11.26	4.50
11	45.03	11.26	2.69	11.26	56.28	11.26	4.50
12	45.03	11.26	1.55	11.26	56.28	15.76	4.50
13	45.03	11.26	1.55	11.26	56.28	6.75	4.50
14	45.03	11.26	1.55	11.26	56.28	22.51	4.50
15	45.03	11.26	1.55	9.01	54.03	11.26	2.25
16	40.88	18.17	1.97	18.17	59.05	18.17	7.27

1.2 试验数据采集

物模试验中, $T_p < 2.0$ s 的不规则波波列持续时间为 164 s, $T_p > 2.0$ s 的不规则波波列持续时间为 328 s, 保证每组波列的波数大于 100 个。越浪量的测量装置如图 1 所示, 堤后接水箱下置的电子秤通过传输线与电脑相连, 采样频率为 200 Hz, 得到越过斜坡堤水体重量的时间过程线, 量测接水箱的水体重量得到每组试验的总越浪量。使用前越浪量的测量装置经过反复测试, 读数稳定, 性能可靠。

2 混凝土板护面斜坡堤越浪量试验结果及分析

循现行规范中块体护面斜坡堤的越浪量以混凝土板越浪量为计算基准的的编制思路, 物模试验先期开展混凝土板越浪量的试验研究。综合考虑混凝土板护面斜坡堤越浪量与波陡、相对水深、相对堤顶超高、相

对坡肩宽度及相对胸墙高度等影响因素,运用 π 定理得到光滑混凝土板越浪量的无因次表达式:

$$\frac{Q_{\text{板}}}{\sqrt{gH_s^3}} = f\left(\frac{H_s}{L}, \frac{d}{H_s}, \frac{H'_c}{H_s}, \frac{b_1}{H_s}, \frac{P}{H'_c}\right) \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{板}}$ 表示混凝土板护面斜坡堤的越浪量, $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

2.1 波陡 H_s/L 对 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 的影响

在保持 d/H_s 、 H'_c/H_s 、 b_1/H_s 、 P/H'_c 等影响因素不变的情况下,仅改变 H_s/L ,其试验结果如图 3 所示,表明 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 随波陡 H_s/L 增加而减小,采用指数函数拟合。

2.2 相对水深 d/H_s 对 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 的影响

在保持 H_s/L 、 H'_c/H_s 、 b_1/H_s 、 P/H'_c 等影响因素不变的情况下,仅改变 d/H_s ,其试验结果如图 4 所示。从图中看出,当 $2.2 \leq d/H_s \leq 4.0$ 时, $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 波动幅度较大,原因是当相对水深处在这个范围时,波浪发生破碎现象,而当 $4.0 \leq d/H_s \leq 8.0$ 时,相对水深 d/H_s 对 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 影响不显著,故在计算公式中予以忽略。

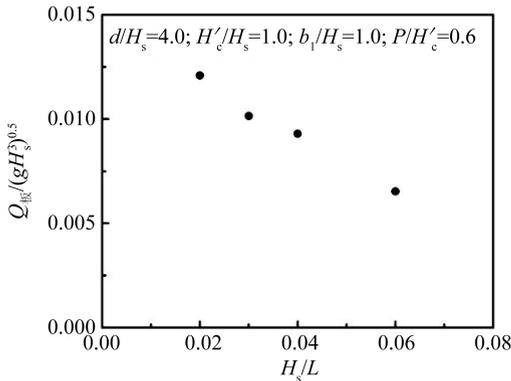


图 3 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 与 H_s/L 关系

Fig. 3 Relational graph of $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ versus H_s/L

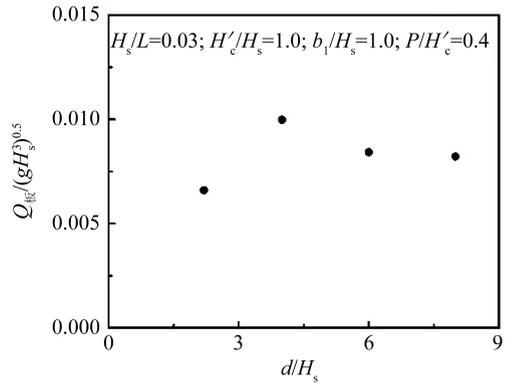


图 4 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 与 d/H_s 的关系

Fig. 4 Relational graph of $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ versus d/H_s

2.3 相对堤顶超高 H'_c/H_s 对 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 的影响

在保持 H_s/L 、 d/H_s 、 b_1/H_s 、 P/H'_c 等影响因素不变的情况下,仅改变 H'_c/H_s ,其分析结果如图 5 所示,表明 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 随相对堤顶超高 H'_c/H_s 增加而减小,呈指数衰减趋势。

2.4 相对坡肩宽度 b_1/H_s 对 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 的影响

在保持 H_s/L 、 d/H_s 、 H'_c/H_s 、 P/H'_c 等影响因素不变的情况下,仅改变 b_1/H_s ,其分析结果如图 6 所示,表明 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 随相对坡肩宽度 b_1/H_s 增加而减小,文中采用指数函数拟合。

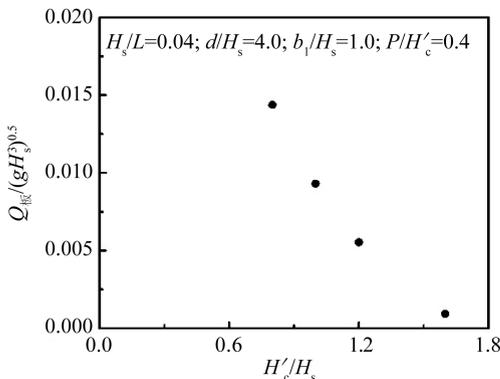


图 5 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 与 H'_c/H_s 的关系

Fig. 5 Relational graph of $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ versus H'_c/H_s

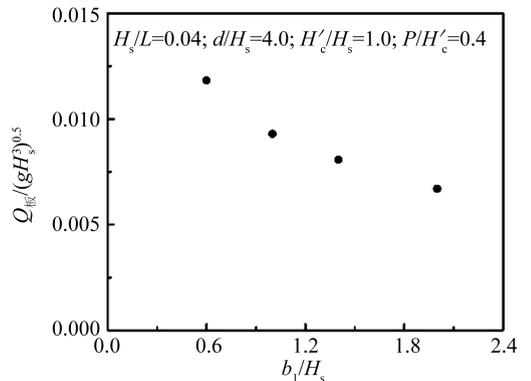


图 6 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 与 b_1/H_s 关系

Fig. 6 Relational graph of $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ versus b_1/H_s

2.5 相对胸墙高度 P/H'_c 对 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 的影响

在保持 $H_s/L, d/H_s, H'_c/H_s, b_1/H_s$ 等影响因素不变的情况下,仅改变 P/H'_c , 试验分析结果如图 7 所示。由图可知,当 $0.4 \leq P/H'_c \leq 1.0$ 时, $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 随着相对胸墙高度 P/H'_c 增加呈线性递减。

2.6 混凝土板护面斜坡堤越浪量计算关系式

根据上述单因素分析,采用非线性拟合,当 $0.02 \leq H_s/L \leq 0.06, 4.0 \leq d/H_s \leq 8.0, 0.8 \leq H'_c/H_s \leq 1.6, 0.6 \leq b_1/H_s \leq 2.0, 0.4 \leq P/H'_c \leq 1.0$ 时,给出坡度 $m = 1.5$ 的混凝土板护面斜坡堤越浪量计算关系式:

$$\frac{Q_{\text{板}}}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.18 \exp\left(-6.45 \frac{H_s}{L} - 2.19 \frac{H'_c}{H_s} - 0.45 \frac{b_1}{H_s}\right) - 0.002 \frac{P}{H'_c} \quad (m = 1.5) \quad (3)$$

上式相关系数 $R > 0.90$, 满足拟合方程的相关性要求。式(3)和规范公式(1)的计算值与物模试验值的比较如图 8 所示。从图中可以看出,式(3)的计算值与物模试验值吻合较好。

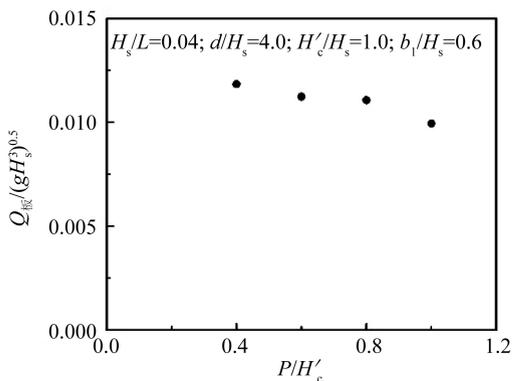


图 7 $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ 与 P/H'_c 的关系

Fig. 7 Relational graph of $Q_{\text{板}}/(gH_s^3)^{0.5}$ versus P/H'_c

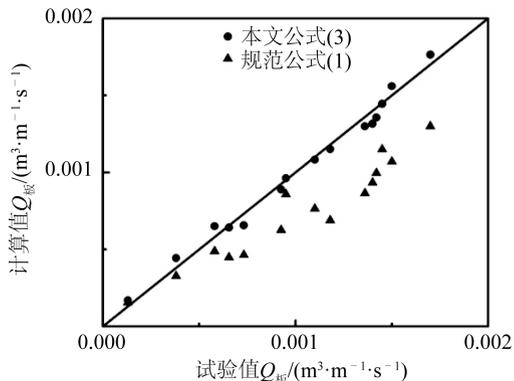


图 8 $Q_{\text{板}}$ 计算值与试验值对比

Fig. 8 Comparison between predicted and measured $Q_{\text{板}}$ values

3 扭王字块体斜坡堤护面结构影响系数的试验结果及分析

综合考虑波陡、相对水深、相对堤顶超高、相对坡肩宽度、相对胸墙高度及相对块体尺寸这些因素,运用 π 定理得到扭王字块体斜坡堤越浪量公式中护面结构影响系数的无因次表达式:

$$K_{\text{AW}} = f\left(\frac{H_s}{L}, \frac{d}{H_s}, \frac{H'_c}{H_s}, \frac{b_1}{H_s}, \frac{P}{H'_c}, \frac{h}{H_s}\right) \quad (4)$$

式中: K_{AW} 表示扭王字块体斜坡堤越浪量公式中护面结构影响系数,是相同工况下,扭王字块体护面斜坡堤越浪量与混凝土板护面斜坡堤越浪量的比值。

3.1 波陡 H_s/L 对 K_{AW} 的影响

在保持 $d/H_s, H'_c/H_s, b_1/H_s, P/H'_c$ 等影响因素不变的情况下,仅改变 H_s/L , 其试验结果如图 9, 表明 K_{AW} 随波陡 H_s/L 增加而减小, 采用指数函数进行拟合。

3.2 相对水深 d/H_s 对 K_{AW} 的影响

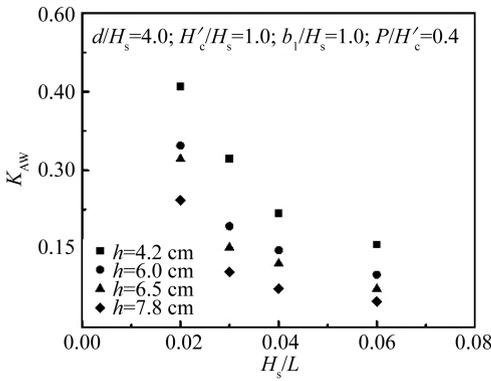
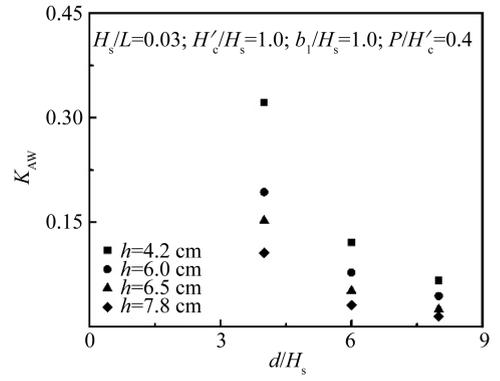
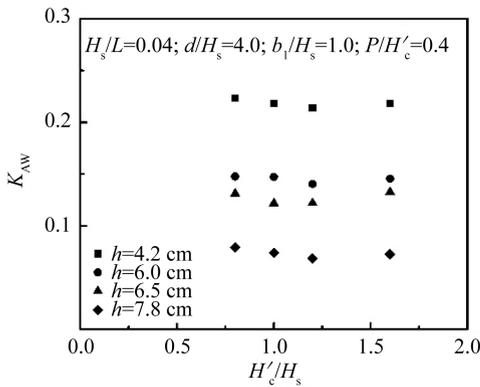
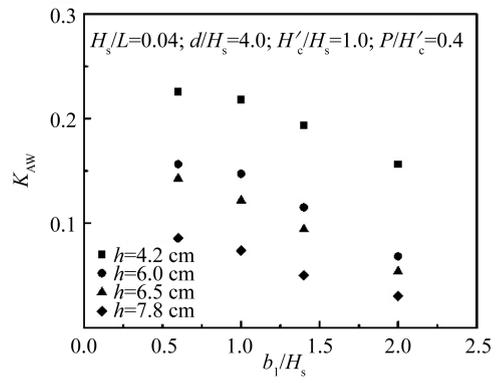
在保持 $H_s/L, H'_c/H_s, b_1/H_s, P/H'_c$ 等影响因素不变的情况下,仅改变 d/H_s , 其试验结果如图 10, 表明 K_{AW} 随相对水深 d/H_s 增加而减小, 采用指数函数进行拟合。

3.3 相对堤顶超高 H'_c/H_s 对 K_{AW} 的影响

在保持 $H_s/L, d/H_s, b_1/H_s, P/H'_c$ 等影响因素不变的情况下,仅改变 H'_c/H_s , 其分析结果如图 11 所示。由图可知,当 $0.8 \leq H'_c/H_s \leq 1.6$ 时, 相对堤顶超高 H'_c/H_s 对 K_{AW} 影响不显著, 故在计算公式中予以忽略。

3.4 相对坡肩宽度 b_1/H_s 对 K_{AW} 的影响

在保持 $H_s/L, d/H_s, H'_c/H_s, P/H'_c$ 等影响因素不变的情况下,仅改变 b_1/H_s , 其试验结果如图 12, 表明 K_{AW} 随相对坡肩宽度 b_1/H_s 增加呈线性关系递减。

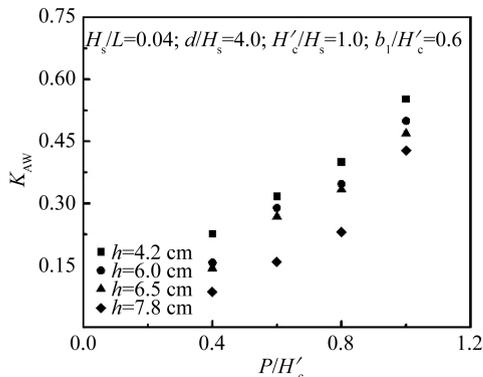
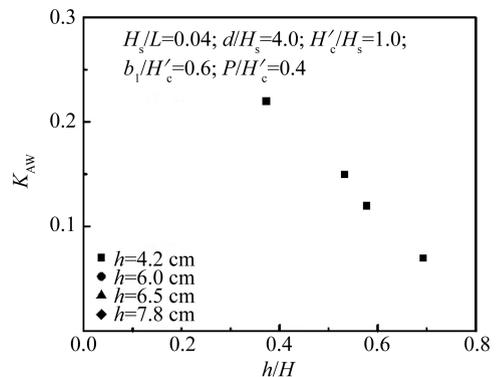
图 9 K_{AW} 与 H_s/L 的关系Fig. 9 Relational graph of K_{AW} versus H_s/L 图 10 K_{AW} 与 d/H_s 的关系Fig. 10 Relational graph of K_{AW} versus d/H_s 图 11 K_{AW} 与 H'_c/H_s 的关系Fig. 11 Relational graph of K_{AW} versus H'_c/H_s 图 12 K_{AW} 与 b_1/H_s 的关系Fig. 12 Relational graph of K_{AW} versus b_1/H_s

3.5 相对胸墙高度 P/H'_c 对 K_{AW} 的影响

在保持 H_s/L 、 d/H_s 、 H'_c/H_s 、 b_1/H_s 等影响因素不变的情况下,仅改变 P/H'_c ,其试验结果如图 13,表明 K_{AW} 随 P/H'_c 增加而增加,本文采用指数函数拟合。

3.6 相对块体尺寸 h/H_s 对 K_{AW} 的影响

在保持 H_s/L 、 d/H_s 、 H'_c/H_s 、 b_1/H_s 、 P/H'_c 等影响因素不变的情况下,仅改变 h/H_s ,试验结果如图 14 所示。由图可知, K_{AW} 随相对块体尺寸 h/H_s 增加呈线性关系递减。

图 13 K_{AW} 与 P/H'_c 的关系Fig. 13 Relational graph of K_{AW} versus P/H'_c 图 14 K_{AW} 与 h/H_s 的关系Fig. 14 Relational graph of K_{AW} versus h/H_s

对于相同块体,其护面结构影响系数在现行《港口与航道水文规范》^[4]中推荐取为定值。但从图 14 中看出,对于扭王字块体斜坡堤,护面结构影响系数 K_{AW} 随着块体尺寸增大而减小,并非是一个不变的常数。这是本文通过物模试验,对扭王字块体护面斜坡堤护面结构影响系数的新认知。

3.7 扭王字块体斜坡堤护面结构影响系数计算关系式

根据上述单因素试验分析,采用非线性拟合,给出坡度 $m = 1.5$ 的扭王字块体斜坡堤越浪量公式中护面结构影响系数 K_{AW} 计算关系式:

$$K_{AW} = 0.65 \exp \left(- 12.23 \frac{H_s}{L} - 0.03 \frac{d}{H_s} + 0.68 \frac{P}{H_c} \right) - 0.08 \frac{b_1}{H_s} - 0.41 \frac{h}{H_s} \quad (m = 1.5) \quad (5)$$

上式相关系数 $R > 0.90$, 满足拟合方程的相关性要求。式(5)的计算值和本次物模试验值对比如图 15 所示。从图中可以看出,所有点都均匀分布在直线 $y = x$ 两侧,表明式(5)的计算值与物模试验值吻合较好。

4 扭王字护面块体斜坡堤越浪量计算公式

图 8 已表明,对于坡度 $m = 1.5$ 的混凝土板护面斜坡堤,式(3)的越浪量计算值与物模试验值吻合较好,因此,后文的混凝土板护面斜坡堤越浪量采用式(3)计算,进而沿用规范编制思路,得到多种影响因素下坡度 $m = 1.5$ 的扭王字护面块体斜坡堤越浪量计算公式:

$$\frac{Q}{\sqrt{gH_s^3}} = K_{AW} \left[0.18 \exp \left(- 6.45 \frac{H_s}{L} - 2.19 \frac{H_c}{H_s} - 0.45 \frac{b_1}{H_s} \right) - 0.002 \frac{P}{H_c} \right] \quad (m = 1.5) \quad (6)$$

式中: Q 表示扭王字块体护面斜坡堤单位时间单位堤宽的越浪量, $m^3 / (m \cdot s)$; 护面结构影响系数 K_{AW} 采用式(5)计算。

为验证本文提出的计算式(6)的精确性,将式(6)的计算值和物模试验值进行比较,结果如图 16 所示。从图中可以看出,所有点都均匀分布在直线 $y = x$ 两侧,计算值与物模试验值吻合较好,表明式(6)具有较好的计算精度。

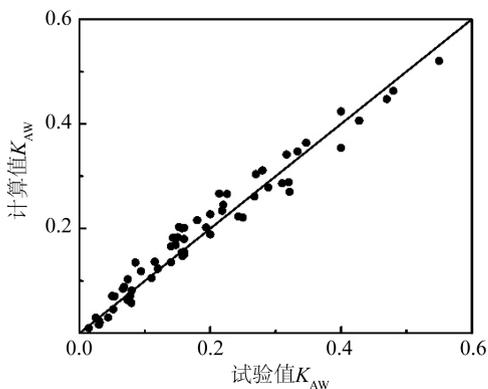


图 15 K_{AW} 计算值与试验值对比

Fig. 15 Comparison between predicted and measured K_{AW} values

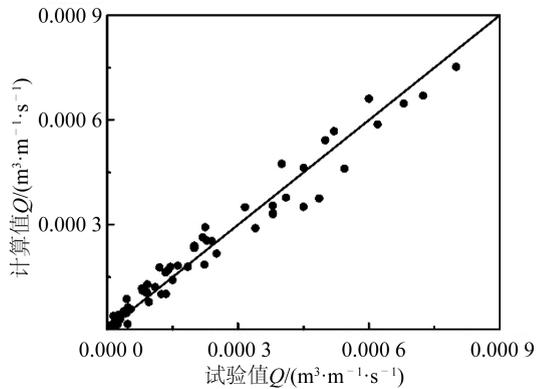


图 16 Q 计算值与试验值对比

Fig. 16 Comparison between predicted and measured Q values

对于块体斜坡堤越浪量的计算方法,陈国平等^[6]考虑波浪爬高和堤顶超高两个主要因子,提出了不规则波越浪量的计算公式:

$$\frac{Q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.055 \frac{R_s}{H_s} \exp \left(- 3.5 \frac{H_c}{H_s} - 0.9 \frac{P}{H_c} \right) \quad (7)$$

式中: Q 为平均越浪量; H_c 为防浪墙顶超高; R_s 为累积率 13% 的波浪爬高(计算方法参照文献[5]); p 为防浪墙高度,对于堤顶未设置防浪墙斜坡, $p = 0$ 。

为验证计算式(6)的适用性,针对周雅等^[10]物模试验工况($m = 1.5$),应用式(6)和陈国平等^[6]式(7),给出相应工况下越浪量的计算值,并与周雅等^[10]物模试验值进行对比,对比结果见表 2。

表 2 本文公式(6)、陈国平等^[6]公式(7)计算值与周雅等^[10]物模值的对比(坡度 $m=1.5$)Tab. 2 Comparisons between results of this paper, Chen^[6] and Zhou et al^[10]

试验组 次编号	相对水深 d/H_s	相对块体尺寸 h/H_s	相对堤顶超高 H_c/H_s	相对胸墙高度 P/H_c	相对坡肩宽度 b_1/H_s	有效波高 H_s/m	平均周期 T/s
case 1	2.26	0.44	0.74	0.63	0.85	6.63	9.7
case 2	2.26	0.44	1.08	0.43	0.85	6.63	9.7
case 3	2.26	0.44	1.20	0.41	0.85	6.63	9.7
case 4	2.43	0.48	0.85	0.60	0.95	6.08	9.2
case 5	2.43	0.48	1.20	0.42	0.95	6.08	9.2
case 6	2.43	0.48	1.28	0.39	0.95	6.08	9.2
case 7	2.43	0.48	1.35	0.37	0.95	6.08	9.2
case 8	2.43	0.48	0.70	1.34	3.16	6.08	9.2
case 9	2.43	0.48	0.70	1.34	4.02	6.08	9.2
case 10	2.43	0.48	0.70	1.34	4.83	6.08	9.2

试验组 次编号	越浪量 $Q/(m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$				
	周雅等 ^[10] 物模值	陈国平 ^[6] 公式		本文公式(6)	
		计算值	相对误差/(%)	计算值	相对误差/(%)
case 1	0.444	0.156	-65	0.330	-26
case 2	0.096	0.063	-34	0.107	12
case 3	0.091	0.040	-56	0.078	-14
case 4	0.310	0.100	-68	0.190	-39
case 5	0.052	0.036	-31	0.047	-9
case 6	0.033	0.028	-15	0.037	13
case 7	0.028	0.022	-21	0.030	8
case 8	0.113	0.079	-30	0.082	-28
case 9	0.066	0.079	20	0.032	-51
case 10	0.056	0.079	41	0.008	-86

文中提出的式(6)较为全面地考虑了越浪量的影响因素,体现在表2 case1~case7中,式(6)的越浪量计算值与周雅等^[10]物模试验值更趋吻合;由于陈国平等^[6]式(7)未考虑坡肩宽度对越浪量的影响,使得表2中的 case8~case10采用陈国平等^[6]式(7)的越浪量计算值相同,而式(6)的 case8~case10计算值误差偏大,其原因是周雅等^[10]物模试验中的相对坡肩宽度超出式(6)的适用范围,但式(6)的越浪量随相对坡肩宽度增加而减小,与周雅等^[10]物模试验值具有一致的规律性。

5 结 语

1) 现行《港口与航道水文规范》^[4]中关于块体护面斜坡堤越浪量公式中未列出扭王字块体护面斜坡堤越浪量的计算方法。本文综合考虑波陡、相对水深、相对堤顶超高、相对坡肩宽度、相对胸墙高度和相对块体

尺寸等因素,采用物模试验和多元回归分析方法,给出不规则波作用下扭王字块体护面结构影响系数和扭王字块体护面斜坡堤越浪量的计算公式,通过与物模试验值及周雅等^[7]物模试验值对比,证明本文提出的计算公式具有较好的精确性和适用性,研究成果丰富了规范内容。

2)对于相同块体,其护面结构影响系数在现行《港口与航道水文规范》^[4]中推荐取为定值。通过讨论扭王字块体斜坡堤越浪量公式中护面结构影响系数与各影响因素之间的关系,发现护面结构影响系数并非一个常数,其值随着块体尺寸增大而减小,且受堤身结构和波浪要素的影响。研究结果对斜坡堤越浪的基础研究和工程设计应用具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 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.(FAN Hongxia. Experimental study on the overtopping discharge and overtopping flow of the sloped[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [2] 章家昌,周家宝,王红.单坡堤上越浪量[J].水运工程,1993(6):1-7.(ZHANG Jiachang, ZHOU Jiabao, WANG Hong. Overtopping quantities on a single sloping breakwater[J].Port and Waterway Engineering,1993(6):1-7. (in Chinese))
- [3] 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. Estimating of irregular wave overtopping quantities on single slopings[J]. Journal of Hydro-Science and Engineering,1996(1):58-63.(in Chinese))
- [4] JTS145-2015,港口与航道水文规范[S].2015.(JTS145-2015, Code of hydrology for harbor and waterway[S]. 2015. (in Chinese))
- [5] 陈国平,王铮,袁文喜.不规则波作用下波浪爬高计算方法[J].水运工程,2010(2):23-30.(CHEN Guoping, WANG Zheng, YUAN Wenxi. Calculation of wave run-up under the irregular wave action[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(2): 23-30. (in Chinese))
- [6] 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.(CHEN Guoping, ZHOU Yiren, YAN Shichang. Test study on wave overtopping under irregular wave action[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(3):1-6. (in Chinese))
- [7] 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(4):138-146.(WANG Jian, SUN Dapeng, WU Hao. Numerical study on overtopping of sloping breakwater with crown-wall[J].The Ocean Engineering, 2018, 36(4):138-146. (in Chinese))
- [8] 杨锦凌,孙大鹏,吴浩,等.斜坡堤波浪爬高和越浪数值模拟[J].海洋工程,2013,31(2):45-52.(YANG Jinling, SUN Dapeng, WU Hao, et al. Numerical simulation wave run-up and overtopping on sloping seawall[J].The Ocean Engineering, 2013, 31(2):45-52. (in Chinese)).
- [9] 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))
- [10] 周雅,林登荣,李庆银,等.不规则波作用下斜坡堤越浪量试验研究[J].水道港口,2016(4):331-335.(ZHOU Ya, LIN Dengrong, LI Qingyin, et al. Experimental research of wave overtopping on sloping dike under irregular waves[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2016(4):331-335. (in Chinese))