

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.010

珊瑚礁地形上胸墙波浪力大水槽试验

陈松贵^{1,2}, 陈汉宝¹, 赵洪波¹, 郑金海², 张弛²

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于大比尺波浪水槽试验, 开展了珊瑚礁地形上的波浪与斜坡堤相互作用试验。在不同水深和波浪条件下测量斜坡堤胸墙的水平力和浮托力, 并与规范值进行对比。试验结果表明: 胸墙的波浪力受波浪破碎后的堤前壅水、破碎波高和水流冲击的共同影响; 胸墙水平力呈矩形分布, 浮托力呈三角形分布; 由于波浪在珊瑚岛礁上传播过程中的能量耗散, 平均水平力和前趾浮托力试验结果均小于采用深水波要素计算的规范值, 所提出的基于胸墙距礁缘的相对距离和礁盘上相对水深的波浪力修正系数, 修正后的公式计算结果与试验值吻合较好。

关键词: 珊瑚礁; 波浪力; 胸墙; 修正系数; 大比尺波浪水槽

中图分类号: TV139.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)01-0065-06

Experimental study of wave forces on the seawall of coral reef in large wave flume

CHEN Songgui^{1,2}, CHEN Hanbao¹, ZHAO Hongbo¹, ZHENG Jinhai², ZHANG Chi²

(1. Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China;

2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Experiments on the interaction forces between waves and seawalls on reefs were conducted in the large wave flume of Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering. Wave forces, including the horizontal and uplift pressure on seawalls, were measured at different water levels and wave conditions. The forces values were compared with those obtained by formulas in Hydrographic code for ports and waterways. The experimental results show that wave forces on seawalls were controlled by wave setup, wave height and wave induced flow after breaking. Horizontal pressure had a rectangular distribution while uplift pressure had a triangular distribution. The experimental values were less than those obtained by formulas using wave conditions in deep water. Correction coefficients based on the relative distance of seawalls and reef edge as well we the relative water depth on reefs were proposed. It has been demonstrated that values of the correction formula were in good agreement with the experimental results.

Key words: coral reefs; wave forces; seawalls; correction coefficients; large wave flume

随着我国海洋强国战略的推进, 珊瑚岛礁的开发和利用日益增多。珊瑚岛礁周边水深一般在百余米至千米, 从地貌上看珊瑚岛礁就如同一个个凸出的平台, 波浪一旦从深海传至岛礁礁坪时, 必然需要经过落差较大的礁坪边缘, 表现出强烈的非线性特征。与此同时, 珊瑚岛礁所处的海洋环境恶劣, 其水深、面宽、热带气旋活跃、季风盛行, 在台风浪、风暴潮浪等极端波浪作用下, 岛礁防浪建筑物不可避免地会受到强烈的冲击作用, 胸墙波浪力直接影响着防浪建筑物的结构安全。虽然我国现行《港口与航道水文规范》^[1] 给出了斜坡堤胸墙波浪力计算公式, 但其应用条件明确规定: “水底坡度 $<1/10$; 建筑物前水深 d 为 $1.5H \sim 5.0H$; 建筑物

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(TKS160108); 国家重点研发计划(2016YFC1402800); 天津市科技服务业科技重大专项(16ZXFVGX00050); 中国博士后科学基金(2017M613320)

作者简介: 陈松贵(1987—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事岛礁波浪水动力研究。E-mail: chensg05@163.com

通信作者: 郑金海, 教授。E-mail: jhzheng@hhu.edu.cn

引用本文: 陈松贵, 陈汉宝, 赵洪波, 等. 珊瑚礁地形上胸墙波浪力大水槽试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 65-70.

CHEN Songgui, CHEN Hanbao, ZHAO Hongbo, et al. Experimental study of wave forces on the seawall of coral reef in large wave flume[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1): 65-70.

前底坡 $i \leq 1/50$ 。”珊瑚礁前坡常为 $1:10 \sim 1:0.5$ 的陡坡,可见现有规范中的水深和底坡不符合珊瑚礁特殊的地形条件,相关标准适用性受到限制。

国内外学者针对珊瑚礁水动力学开展了大量的研究工作,Gourlay^[2-3]通过物理模型试验和理论分析,提出了判断破浪破碎位置的关系式,并定性描述了增水、波生流与无量纲水深、波高间的关系。Yao 等^[4]运用物理模型试验对波浪破碎特征与礁坪水深和礁前坡度的关系进行了研究。赵子丹等^[5]结合珊瑚礁地形,对波浪在台阶式水深剧变地形上传播的研究进展进行了综述。张庆河等^[6]对规则波在台阶地形上的破碎规律进行试验研究,并给出描述波浪临界破碎、破碎带宽及波浪衰减规律的经验公式。但上述研究工作都限于自然岛礁状态,并未对建有防浪建筑物的珊瑚礁水动力进行研究。针对海岸工程防浪建筑物的波浪力,国内外学者开展了大量的研究工作。日本的合田良实^[7]参考了一系列的波浪力试验数据,提出一种计算波浪力的方法,该方法认为波浪力在水面上 1.5 倍波高范围内呈三角形分布,在水面下为四边形的直线分布。Tanimoto^[8]和齐桂萍^[9]利用物理模型的试验结果对合田公式进行修正,使得相对波高较大时的计算结果更加准确。陈汉宝^[10]根据试验数据修正合田公式,并考虑了斜向波的作用力。Martin 等^[11]在一系列试验结果基础上,提出了斜坡堤顶部胸墙的远破波波力计算方法。据烈红^[12]研究发现直立式胸墙迎浪面上的压强分布为非均匀分布,胸墙上受到入射波浪直接冲击的位置压强会出现极大值,并且在极大值附近的一定范围内,压强变化较小。王颖等^[13]将物理模型试验结果与规范计算结果进行对比,发现胸墙波浪力实测结果大于利用规范公式计算得到的结果。柳玉良等^[14]研究了斜坡堤胸墙在有护面块体掩护情况下波浪力的折减情况,发现单层扭王字块体掩护时的折减系数大于规范中的数值(0.6)。郭建平^[15]、杨洪旗等^[16]、郭剑锋^[17]进行了护面肩台的宽度及高度对胸墙波压力的影响研究,发现肩台越宽、越高,胸墙的波压力越小。

上述研究成果已在近岸防浪建筑物的胸墙冲击力计算中得到很好的应用,但珊瑚岛礁的陡变前坡与近岸缓坡地形不同,波浪未经过浅水的变形、反射和衰减直接作用在岛缘的陡坡上,建筑物前水深与波高的关系、底坡坡度等适用条件均不满足,因此还需对珊瑚礁陡变平台地形上胸墙波浪力开展研究。本文首先介绍试验仪器与工况;其次,对珊瑚礁地形上的斜坡堤胸墙波浪力的历时过程和分布进行分析,并通过与现有规范计算公式对比,提出了考虑斜坡堤距礁盘距离和礁盘上水深的修正系数;最后,对研究的主要结论进行了总结。

1 试验设置

试验在交通运输部天津水运工程科学研究院大比尺波浪水槽(图 1)中完成。大水槽长 456 m,宽 5 m,高 12 m。在水槽一端为推板式造波机,最大造波能力为 3.5 m,造波周期为 2~10 s,具备主动吸收造波功能,最大限度地消除二次反射对试验结果的影响。试验模型布置如图 2 所示,主要包括深水区、陡坡区和平台区 3 部分。其中深水区水深 5 m,陡坡坡度 $1:2$,平台上距礁盘边缘 15.2 m 设有斜坡堤,斜坡堤基础顶高程 0.3 m、胸墙顶高程 0.85 m、底宽 0.5 m,如图 2 所示,大浪时有越浪发生。陡坡坡脚距造波机距离 330 m,能够模拟波浪从深水经过珊瑚礁陡变地形变形破碎,再至礁坪上传播的强非线性物理过程。岛礁地形采用方钢管和钢板分段焊接而成,如图 3 所示。

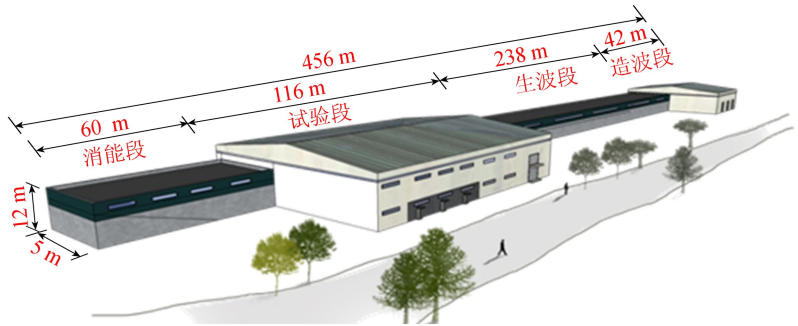


图 1 大比尺波浪水槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the large wave flume

试验时,采用电容式波高传感器记录不同位置的水位过程。为保证试验的准确性,在平台上方对称布置了 2 排传感器,编号为 1~9 和 10~18,量程 60 cm,距水槽边壁 1.5 m,2 排传感器间距 2 m。在深水处布置了 3 根传感器,编号 20~21,量程 2 m,距水槽边壁 2.5 m,距陡坡边缘 33 m。所有电阻式传感器的精度均为 $1/1000$ 。试验中,所有波高传感器通过数据采集系统同步测量,采样频率 50 Hz,自波浪到达 19 号浪高仪时开始采集,每组波浪的采集时间为 130 个波。

胸墙波压力采用 CYG41000T 压力传感器进行测量,量程 ± 20 kPa,采样频率 100 Hz,与浪高仪同步采集。分别在胸墙立面和底面布置 1 排压力传感器,传感器位置如图 4 所示。试验时,选取压强值变化连续一段时

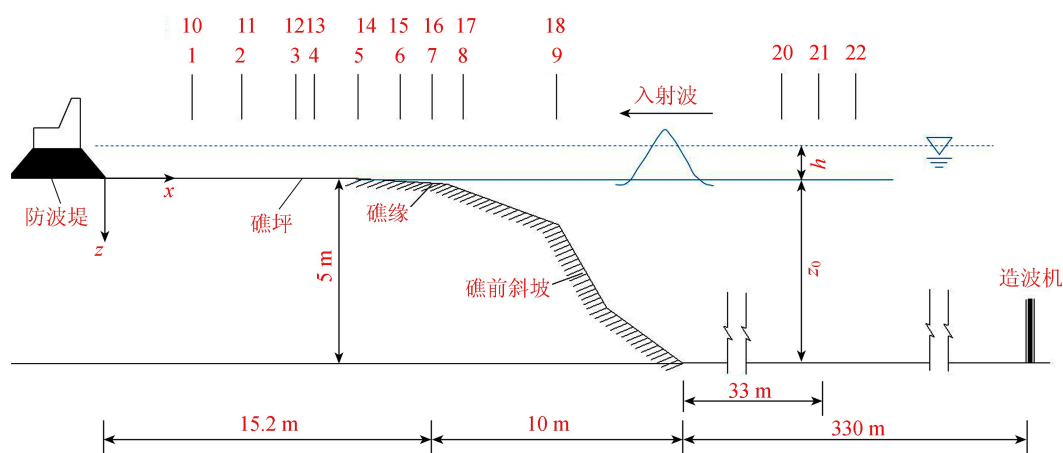


图 2 试验模型及传感器布置

Fig. 2 Sketch of the model layout and wave gauges



图 3 试验中的珊瑚礁地形

Fig. 3 Coral reefs in the test

间的最大值时刻,各点压强取同一时刻值。

本试验共包含 6 组不同的工况(表 1),包括 3 个不同的水位和 2 组不同的波高周期的组合,水位的参考零点为珊瑚礁防浪建筑物坡脚(如图 2 所示)。入射波谱均按 Jonswap 谱率定,谱峰因子 γ 取 3.3。

表 1 试验组次

Table 1 Testing conditions

编号	h/m	$H_{1\%}/\text{m}$	H_S/m	H_{mean}/m	T_{mean}/s
M1	0.23	1.49	0.99	0.62	4.07
M2	0.23	1.23	0.82	0.51	3.59
M3	0.19	1.49	0.99	0.62	4.07
M4	0.19	1.23	0.82	0.51	3.59
M5	0.03	1.49	0.99	0.62	4.07
M6	0.03	1.23	0.82	0.51	3.59

注: h 为平台水深, $H_{1\%}$ 为不规则波 1% 波高, H_S 为有效波高, H_{mean} 为平均波高, T_{mean} 为平均周期。

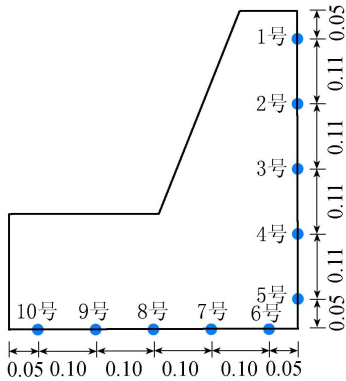


图 4 压力传感器布置示意图(单位:m)

Fig. 4 Layout of wave pressure cells

2 试验结果与分析

2.1 压强随时间的变化

组次 M1 中胸墙堤脚处的压力随时间的变化如图 5 所示,对比图 6 外海波高过程线(与压力过程线非完全同步)可以发现,胸墙上波压力与入射波高直接相关,且随着波群呈周期变化。当波群中大波到达时,堤前水位增加,波高增大,波压力增加;反之,当波群中小波到达时,堤前水位降低,波高减小,波压力也随着减小。

除堤前水位和波高,波浪在珊瑚礁边缘破碎后的波生流也是影响胸墙波压力大小的主要因素。从图 7 可以发现,波浪在礁盘边缘破碎后,产生了较大的波生流,水流会在礁盘上向胸墙运动,当传至胸墙前方时,

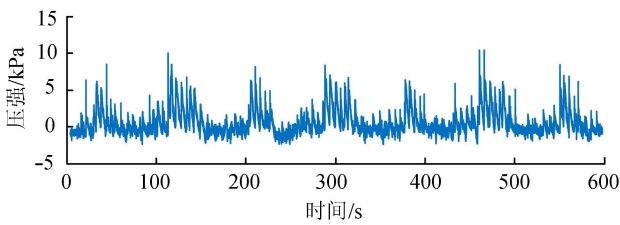


图5 组次 M1 中 5 号压力传感器的采集值
Fig.5 Duration of pressure at cell 5 in the test M1

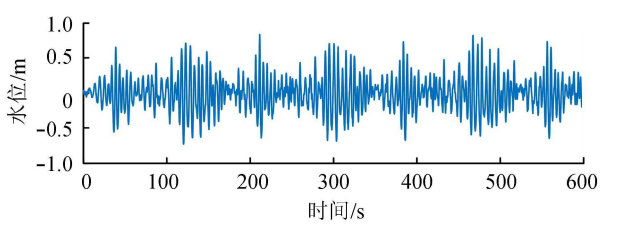


图6 组次 M1 入射波浪过程线
Fig.6 Elevation of water surface in the test M1

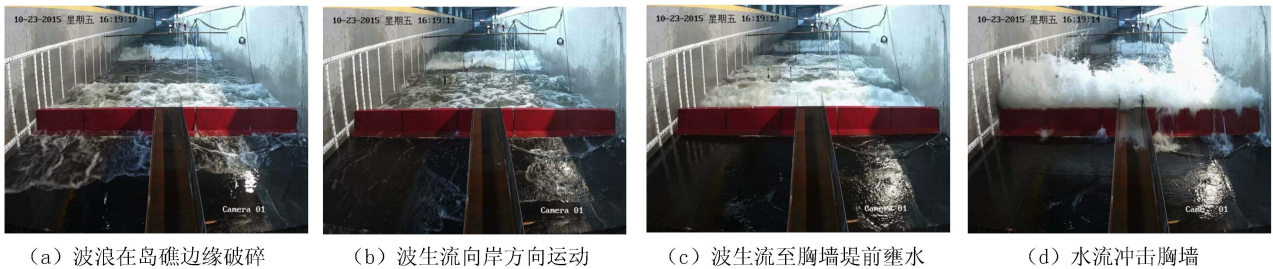


图7 波浪在礁盘上的破碎传播过程
Fig.7 Wave breaking and transformation on coral reefs

胸墙前水位明显增加(如图7(c)(d)所示),最后冲击水流直接作用在胸墙上,产生较大的冲击压力。一部分水体越过胸墙形成越浪,另外的水体会向离岸方向运动。

2.2 压强分布

不同组次的水平力最大时刻的压强分布如图8所示。从试验结果可以发现,整个胸墙立面的水平力基本呈矩形分布,而近岸防波堤胸墙的波浪水平力大多为三角形分布^[7,18]。此外,水平力从上到下呈增大、减小、再增大的趋势,也就是说立面上出现2处波压力较大的位置,一是中上部,二是最底部。水平力分布呈上述现象主要是由于在陡变的珊瑚礁地形上,波浪在礁盘边缘破碎后主要以水流的形式向前传播,且该冲击水流流速沿水深方向基本一致,因此使胸墙上的压强呈矩形分布。同时,对于压强最大值出现的位置有如下规

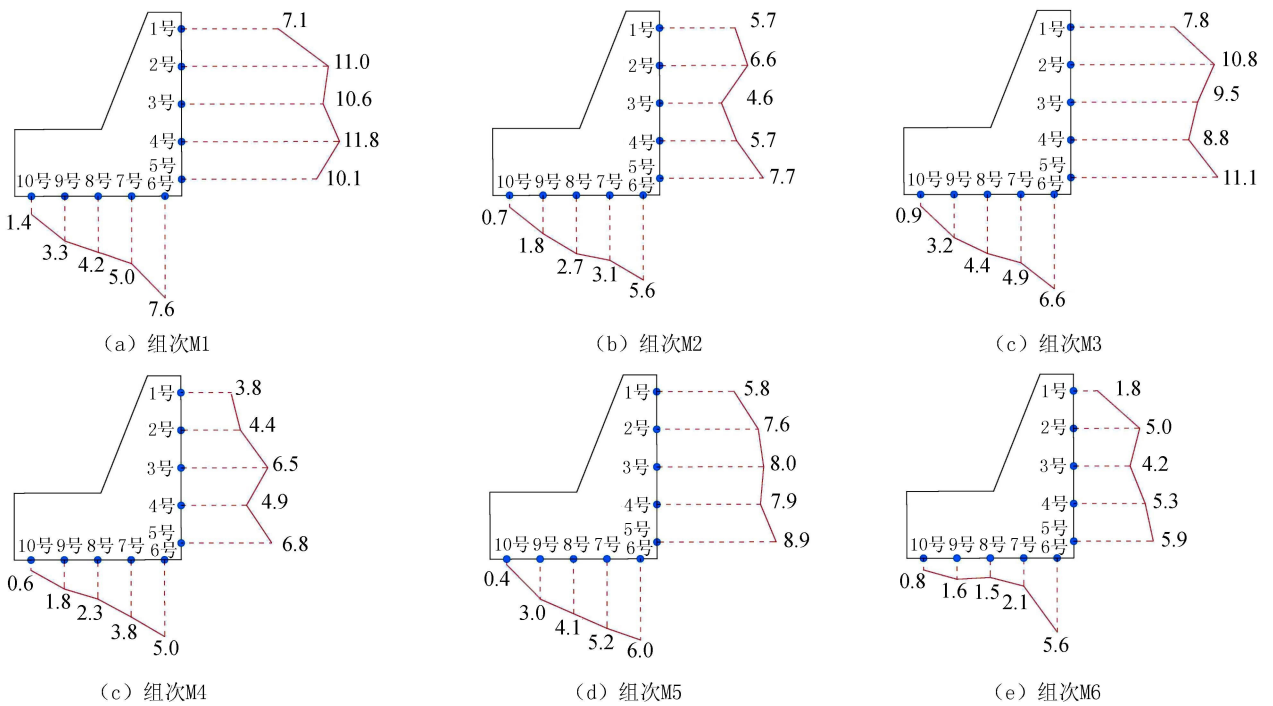


图8 不同组次的胸墙最大压强分布(单位:kPa)
Fig.8 Dstribution of the maximum wave pressure (units: kPa)

律:第一个压强大值出现的主要原因是破波水流的冲击点,该位置的高低主要受静水位和堤前壅水的影响,水位越高,冲击点越靠上,外海入射波高越大,堤前壅水越高,冲击点也越高;第二个压强大值出现的主要原因是静水压力的影响,由于堤脚处水深最大,因此会出现压力局部大值。同时,试验结果表明,整个胸墙底面的浮托力基本呈三角形分布,与近岸防波堤胸墙的波浪力分布近似^[18]。

2.3 试验结果与规范的比较分析

《港口与航道水文规范》^[1]给出缓坡地形斜坡堤胸墙波压力的计算公式如下:

$$\bar{p} = 0.24\rho gHK_p \tag{1}$$

式中: ρ ——水的密度; g ——重力加速度; H ——建筑物前波高,对于本文的不规则波计算采用 H_1 ; K_p ——与无因次参数 ξ 和波坦 L/H 有关的平均压强系数(L 为波长)。

根据规范公式,采用入射波的波高和波长计算胸墙水平力和浮托力,分别将规范值、试验值列于表 2 中。试验值中的水平力和浮托力分别为等效平均水平力 $\bar{p}_h$ 和等效底趾处波压力 p_{utoe} ,根据实测值按矩形分布和三角形分布按式(2)、式(3)计算得到。

$$\bar{p}_h = \frac{\sum p_{hi}l_{hi}}{\sum l_{hi}} \tag{2}$$
$$p_{utoe} = \frac{2\sum p_{ui}l_{ui}}{\sum l_{ui}} \tag{3}$$

式中: p_{hi} 、 p_{ui} ——实测的水平 and 竖直点压强; l_{hi} 、 l_{ui} ——水平和竖直点压力传感器的有效影响范围。

可以发现,实测水平力和浮托力均小于采用外海入射波要素得到的计算值,主要原因是波浪在珊瑚岛礁的破碎和传播过程中能量会发生耗散。对比不同入射波要素的情况,发现入射波周期越短,其传播的相对距离 s/L_0 越长(s 为防浪堤距礁盘边缘的距离, L_0 为深水波长),能量耗散越大,试验值与规范值偏差越大。同时,水位越低,礁盘底部的摩擦影响越大,能量耗散越多,偏差越大。

通过上述分析,可采用 2 个无量纲系数 K_s 和 K_h 对平均水平力的规范值进行修订:

$$K_s = f\left(\frac{s}{L_0}\right) \tag{4}$$

$$K_h = f\left(\frac{h}{H_0}\right) \tag{5}$$

式中: s 、 h ——防浪墙距礁盘边缘的距离和礁盘上水深; L_0 、 H_0 ——深水波长和波高,对于不规则波分别对应平均波长和有效波高。

通过分析和最小二乘法拟合,可得到 K_s 和 K_h 的表达式,即

$$K_s = 1.41e^{-1.7\left(\frac{s}{L_0}\right)^2} \quad 0 \leq s/L_0 < 1 \tag{6}$$

$$K_h = 0.43 \frac{h}{H_0} + 0.8 \quad 0 \leq h < H_0/2 \tag{7}$$

从式(6)可知,距礁盘边缘的距离越近,胸墙波浪力修正系数越大。当 $s=0$,即胸墙位于礁盘边缘时,胸墙所受的波浪力会大于规范计算值;当胸墙位于 1 倍深水波长位置时, $K_s=0.26$ 。因此,为减小胸墙波浪力,防浪堤应尽可能修建到距礁盘边缘 1 倍深水波长以外的位置。根据式(7)可以发现,礁盘底摩阻对胸墙波浪力主要起到折减效应,水深越浅,折减越大,当 $h>0.5H_0$ 时,底摩阻对波浪力的折减效应将不再明显。

对于胸墙底趾处最大竖向压强,可参考规范,按平均水平力乘以折减系数 μ ,根据试验结果, μ 可取 0.92,大于规范推荐的 0.7。主要原因是,胸墙在冲击水流的作用下 有倾转趋势,使胸墙底趾出现轻微抬动,因此水压力更容易传递至胸墙底面,产生更大的浮托力。

修正后波浪力的规范计算值和试验值列于表 3 中。可以发现,修正值与试验值吻合良好,其中平均水平力偏差在 5% 以内,底趾浮托力的偏差在 10% 以内,说明采用修正后的计算公式能够很好地得到珊瑚岛礁地形上的胸墙波浪力。

表 2 波浪力试验值和规范值对比
Table 2 Comparison of wave forces between experimental values and formula values

组次	$\bar{p}_h/\text{kPa}$		p_{utoe}/kPa		偏差/%	
	试验值	规范值	试验值	规范值	$\bar{p}_h$	p_{utoe}
M1	10.17	14.31	8.63	10.02	41	16
M2	6.06	11.90	5.28	8.33	96	58
M3	9.60	13.78	8.02	9.64	43	20
M4	5.28	11.46	5.17	8.02	117	55
M5	7.64	12.46	7.50	8.72	63	16
M6	4.47	10.19	4.30	7.13	128	66

3 主要结论

- a. 在珊瑚礁陡变地形上,胸墙波浪力不仅受堤前壅水和波高的影响,还受波浪破碎后的冲击水流影响。
- b. 胸墙实测水平力呈矩形分布,从上到下呈增大、减小、再增大的趋势,越靠近水流冲击点和胸墙底部,水平力越大。胸墙实测浮托力呈三角形分布。
- c. 对规范的胸墙波浪力计算公式进行修正,提出了与距礁盘边缘相对距离和礁盘上相对水深有关的修正系数,并推荐最大竖向压强的折减系数取 0.92。

参考文献:

[1] 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:JTS 145—2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015.

[2] GOURLAY M R. Wave set-up on coral reefs 1: set-up and wave-generated flow on an idealised two dimensional horizontal reef [J]. Coastal Engineering, 1996(3/4):161-193.

[3] GOURLAY M R. Wave set-up on coral reefs 2: set-up on reefs with various profiles[J]. Coastal Engineering,1996(1):17-55.

[4] YAO Yu, HUANG Zhenhua, MONISMITH S G, et al. Characteristics of monochromatic waves breaking over fringing reefs[J]. Journal of Coastal Research, 2012 (1):94-104.

[5] 赵子丹, 张庆河, 刘海青. 波浪在珊瑚礁及台阶式地形上的传播[J]. 海洋通报, 1995,14(4):1-10. (ZHAO Zidan, ZHANG Qinghe, LIU Haiqing. Wave transformation on coral reefs and submerged steps[J]. Marine Science Bulletin,1995,14(4):1-10. (in Chinese))

[6] 张庆河, 刘海青. 波浪在台阶地形上的破碎[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 1999,32(2):204-207. (ZHANG Qinghe, LIU Haiqing. Wave breaking on a submerged step [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),1999,32(2):204-207. (in Chinese))

[7] 合田良实. 港工建筑物的防浪设计[M]. 北京:海洋出版社,1984.

[8] TANIMOTO K. Design and construction of caisson breakwaters;the Japanese experience[J]. Coastal Engineering, 1994, 22(1/2): 57-77.

[9] 齐桂萍. 直墙前破波波浪力[J]. 海岸工程, 1995,14(3):1-7. (QI Guiping. Wave forces on vertical wall[J]. Coastal Engineering, 1995,14(3):1-7. (in Chinese))

[10] 陈汉宝. 斜向波与直立式防波堤相互作用研究[D]. 天津:天津大学, 2004.

[11] MARTIN F L, LOSADA M A, MEDINA R. Wave loads on rubble mound breakwater crown walls[J]. Coastal Engineering, 1999, 37(2):149-174.

[12] 据烈红. 典型胸墙的波浪力和越浪量物理模型试验与分析[D]. 南京:南京水利科学研究院, 2004.

[13] 王颖, 薛雷平, 刘桦. 弧形防浪墙波浪力的试验研究[J]. 水道港口, 2007, 28(2):81-85. (WANG Ying, XUE Leiping, LIU Hua. The study of the wave force of the wall anti-surf wall[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007, 28(2):81-85. (in Chinese))

[14] 柳玉良, 韩炳辰, 李玉龙. 斜坡式防波堤护面对胸墙波浪力的影响[J]. 水运工程, 2010(8):36-38. (LIU Yuliang, HAN Bingchen, LI Yulong. Influence of armor of inclined breakwater on wave force on parapet[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(8): 36-38. (in Chinese))

[15] 郭健平. 波高取值对斜坡堤胸墙结构设计影响的探讨[J]. 水运工程, 2002(11):14-16. (GUO Jianping. Influence of wave height value on mound breakwater crown wall structural design[J]. Port & Waterway Engineering, 2002(11):14-16. (in Chinese))

[16] 杨洪旗, 柳玉良, 陈兆林. 斜坡堤胸墙波压力的试验与分析[J]. 海岸工程, 2004, 23(4):1-7. (YANG Hongqi, LIU Yuliang, CHEN Zhaolin. Test and analysis of wave pressure on parapet on sloping breakwater[J]. Coastal Engineering, 2004, 23(4):1-7. (in Chinese))

[17] 郭剑峰. 斜坡堤护面肩台宽度优化的试验研究[J]. 中国港湾建设, 2008,28(2):41-43. (GUO Jianfeng. Testing and study on optimization of width of berme to armour rubble mound break water[J]. China Harbour Engineering, 2008,28(2):41-43. (in Chinese))

[18] 苏耀. 深水防波堤胸墙波浪力计算方法研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011.

表 3 波浪力试验值和修正值对比

Table 3 Comparison of wave forces between experimental and correctioned formula values

组次	试验值/kPa		修正值/kPa		偏差/%	
	$\bar{p}_h$	p_{utoe}	$\bar{p}_h$	p_{utoe}	$\bar{p}_h$	p_{utoe}
M1	10.17	8.63	10.08	9.28	-1	8
M2	6.06	5.28	5.85	5.38	-4	2
M3	9.60	8.02	9.52	8.76	-1	9
M4	5.28	5.17	5.50	5.06	4	-2
M5	7.64	7.50	7.93	7.30	4	-3
M6	4.47	4.30	4.44	4.08	-1	-5