

岛礁环境波浪传播、雍水及越浪量 2D 模型试验研究

李玉龙, 夏运强, 柳玉良

(海军研究院, 山东 青岛 266001)

摘要: 岛礁与大陆沿海地区的不同之处在于, 它们与深水相邻, 暴露于非常大的台风波浪中, 并且大多数包括边缘珊瑚礁, 地形变化急剧, 水深由几十甚至上百米突变到 1~2 m。外海波浪在礁盘边缘处发生破碎, 并沿着礁盘行进, 波浪形态发生重大变化, 传至岛礁上的浪涌和波浪产生非线性作用, 且礁坪上地形复杂, 难于建立数值水槽进行研究。国内现有的海岸工程设计规范主要是针对大陆海岸, 但没有针对地形复杂且水深急剧变化的深水岛礁的相关条文, 而这对于确定岛礁上护岸高程、护岸距离礁盘边缘的距离等非常重要。本研究旨在研究岛礁环境中, 外海波浪传递至礁盘上沿程的水动力数据, 并测量距礁盘边缘 400 m 处的护岸越浪量, 为岛礁上水工建筑物设计与应急管理提供设计参考依据。

关键词: 岛礁; 礁坪; 雍水; 越浪量

中图分类号: P731.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2020)02-0119-05

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2020.02.006

引用格式: 李玉龙, 夏运强, 柳玉良. 岛礁环境波浪传播、雍水及越浪量 2D 模型试验研究[J]. 海岸工程, 2020, 39(2): 119-123. LI Y L, XIA Y Q, LIU Y L. 2D Model experimental study of wave transformation, setup and overtopping in island reef environment[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(2): 119-123.

南沙群岛在赤道带, 西沙群岛、中沙群岛在副赤道带, 属热带海洋性季风气候, 长夏无冬, 伴随季风, 每年 10 月至次年 3 月刮东北风, 5 月至 9 月刮西南风, 平均每年发生台风 6~7 次, 台风旺季为 7—10 月。国内现有的海岸工程设计规范主要是针对大陆海岸, 这些海岸通常为缓坡的海滩。岛礁与大陆沿海地区的不同之处在于, 它们与深水相邻, 暴露于非常大的台风波浪中, 大多数为边缘珊瑚礁, 地形变化急剧, 水深由几十甚至上百米突变到 1~2 m。外海波浪在礁盘边缘处发生破碎, 并沿着礁盘行进, 波浪形态发生重大变化。由于外海波浪传入礁盘上, 使水位增加, 而水位的增加使波浪能破坏更远的岛上陆地, 这进一步增加了岛礁海岸线上的径流和洪水泛滥。浪涌和波浪之间的相互作用是非线性的, 从而导致对热带气旋浪潮造成最大淹没的可靠估算更为复杂, 而这对于确定岛礁上护岸高程、护岸距离礁盘边缘的距离等非常重要。

由于海浪与水位之间存在非线性相互作用, 而且难以描述珊瑚礁的地形, 因此对礁盘上的海浪进行数值模拟仍然是一项艰巨的沿海工程挑战。早期尝试礁盘上的波浪模拟依赖于对模型的简化, 从而限制了在具有复杂形态的粗糙礁盘上应用数值波浪模型的成功。另外, 通常公认非线性波波相互作用会导致靠近海岸线的水位发生强烈的低频(次重力)^[1-2]振荡, 与礁石型地形上的低频振荡相关的波径估计可能明显高于平原海滩。例如, 在美国夏威夷考艾岛上的伊尼基飓风期间, 某些地方的水位上升到 6~8 m^[3-5]。国内对于岛礁海岸的越浪量计算方法尚缺乏相关规范, 护岸的前沿水深取礁盘上水位的高度设计将导致其高程偏低。

本文采用了一个简化的毗邻深水岛礁地形二维物理模型, 对周期固定波高变化的外海波浪条件作用于岛礁开展研究。旨在研究岛礁环境中外海波浪传递至礁盘上沿程的水动力数据, 并测量距礁盘边缘 400 m 处的护岸的越浪量, 为岛礁上水工建筑物设计与应急管理提供设计参考依据。

收稿日期: 2019-12-19

作者简介: 李玉龙(1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事港口航道及近海工程方面研究. E-mail: 904633679@qq.com

(王佳实 编辑)

1 二维物理模型试验研究方案

断面试验地形礁盘边缘斜坡剖面选取典型的陡变地形剖面, 礁坪上高程约 0 m, 0~-6.0 m 等深线间地形坡度相对较缓约 1:9, 从-6.0 m 至更深礁盘边坡坡度变化加快。礁盘边缘平均坡度约 1:3, 远海岛礁这种特殊的地形与近大陆的海岸地形差异较大。

1.1 试验设备和仪器

本研究在军用港湾与岛礁工程实验室波浪水槽内进行, 水槽长 84.0 m、高 2.6 m、宽 1.4 m。有效试验宽 0.6 m。波浪水槽布置见图 1。礁盘 0 m 高程边缘布置在离造波机 45 m 处, 边缘处水槽一端安装有低惯量直流电机式不规则造波机, 造波机由计算机控制; 水槽另一端安装有消能设施, 其反射率满足试验规程要求; GA1~GA10 浪高仪的布置情况为, 礁盘 0 m 高程边缘处为 GA6 传感器, 此处水深根据水位不同而有变化, 1[#]~5[#] 传感器间距 100 m(原型值, 下同), GA5~GA7 间距 50 m, GA7~GA10 间距 100 m。

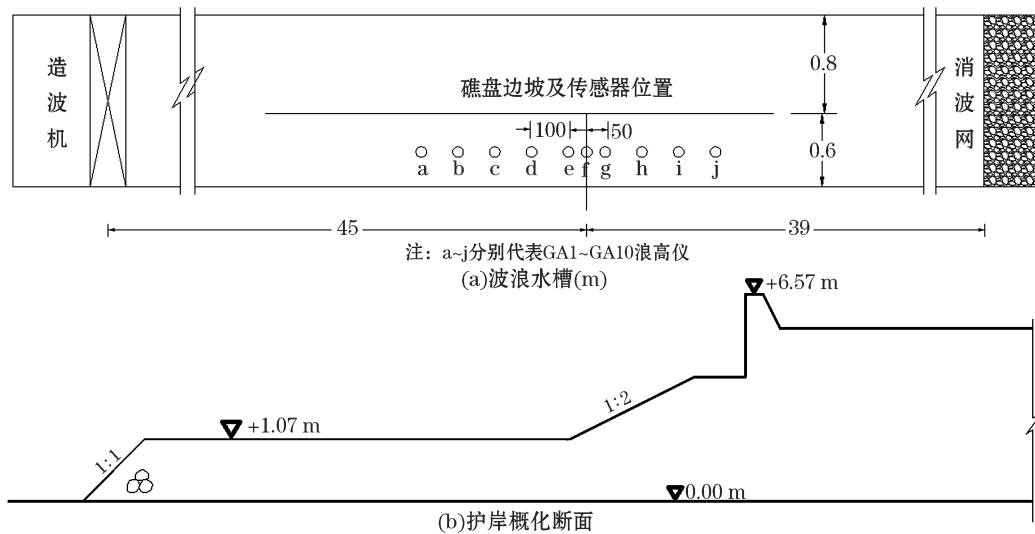


图 1 波浪水槽及护岸概化断面结构

Fig.1 A sketch map of the wave flume and the revetment generalized section

1.2 模型设计

模型设计遵照《波浪模型试验规程》(JTJ/T 234-2001)^[6] 的相关规定进行。模型比尺的确定综合考虑礁盘突变地形、水深波浪条件、试验研究内容、试验水槽规模和造波机性能等因素取几何比尺 $\lambda = 60$ 。在现有条件下尽可能模拟更深的水深, 以便更好地体现岛礁波浪的水动力特性, 综合考虑模拟水深底高程为 -60 m。试验采用不规则波, 谱型为 JONSWAP 谱, 率定波浪的位置在 GA4 测点处。平均 1 个波列 100 个波, 采样间隔为 0.021 s, 采样长度 8 192 次。

1.3 试验条件

1.3.1 水位(当地理论最低潮位起算)

所涉项目海域潮差较小, 根据前期测量数据, 试验水位取 3 个, 分别为极端高水位 2.09 m, 设计高水位 1.32 m, 设计底水位 0.04 m。

1.3.2 波浪条件

波浪周期取 \bar{T} (s) = 11.8 s, 平均波高 \overline{H} 分别为 5.5, 6.1, 6.7, 7.3, 8.0, 8.6 和 9.2 m, 共 7 个, 且 3 个水位

的波浪条件相同。

1.3.3 研究内容

本研究内容共分两部分:1)在 $\bar{T}(s)=11.8\text{ s}$, $\bar{H}=6.7\text{ m}$, 礁盘上无建筑物时,研究礁盘 0 m 等深线前后波浪条件以及雍水^[7]情况;2)在距离礁盘 0 m 等深线 400 m 处有直墙建筑物(高程+6.57 m)时,测量 $\bar{H}=5.5, 6.1, 6.7, 7.3, 8.0, 8.6$ 和 9.2 m 的越浪量,给出外海波浪与越浪量的对应关系。

2 试验结果

2.1 波高及雍水试验结果

由于礁盘毗邻深水,边坡坡度变化快,外海波浪遇礁盘产生强烈的破碎波流,波高势能转化为动能,与一般海岸带波浪破碎形态差异较大。波浪传播上礁盘后沿礁坪传播发生显著转变,在传播过程中,由于礁坪上的水深较外海水深浅,水体短时间无法排泄产生明显的雍水,并且波浪在浅滩和岸礁处发生破碎产生急剧的白浪花。

在水槽中测量礁盘边缘 0 m 等深线附近沿程 10 个传感器的平均波高(\bar{H})和雍水高度(h)(浪高仪配套数据分析软件可分析出 1 个波列雍水的平均水位即为雍水高度),所测数据列表如表 1 所示,并将数据做图(图 2,篇幅关系只给出极端高水位)。试验过程中观察到,礁盘边缘外 GA5 测点的 \bar{H} 略有下降,上礁坪后 GA6 测点的波高增高,然后 GA7~GA9 测点波高值大幅下降。在低水位时,浅滩现象更加明显,且雍水高度(h)较高水位大。

表 1 礁盘沿程的波高和雍水
Table 1 The wave height and setup on the reef plate

项 目	参 数	传感器编号									
		GA1	GA2	GA3	GA4	GA5	GA6	GA7	GA8	GA9	GA10
\bar{H}/m	设低	6.0	5.6	6.1	5.9	5.7	7.1	3.4	1.8	1.5	1.2
	设高	6.2	5.9	6.1	6.1	5.8	7.1	3.9	2.2	1.9	1.6
	极高	6.5	6.4	6.5	6.4	6.1	7.3	4.5	2.4	1.9	1.8
h/m	设低	-0.02	-0.03	-0.02	0.05	-0.10	0.24	1.48	2.10	2.40	2.00
	设高	-0.01	-0.01	-0.01	0.14	0.01	-0.07	0.94	1.64	1.71	1.60
	极高	0.01	-0.01	-0.02	-0.04	-0.09	-0.16	0.67	1.47	1.51	1.52

在实验过程中,礁盘边缘观察到了强劲的回流,该水流会延伸到礁石坡度的外侧,类似于堰流。由于礁坪上的波流速度较高,因此预期在外海波浪周期越长的回流强度越大。此外,礁坪涵盖了很长一段很浅的距离,其回流强度比在内陆典型沿海海滩沿岸冲浪区的大。本节试验礁盘模型上未放置护岸模型,为原始礁盘。

2.2 越浪试验结果

试验测量了距离礁盘 0 m 等深线 400 m 处直立建筑物(高程+6.57 m)单位宽度的越浪量,并按下式换算成原型值,计算单宽平均越浪量:

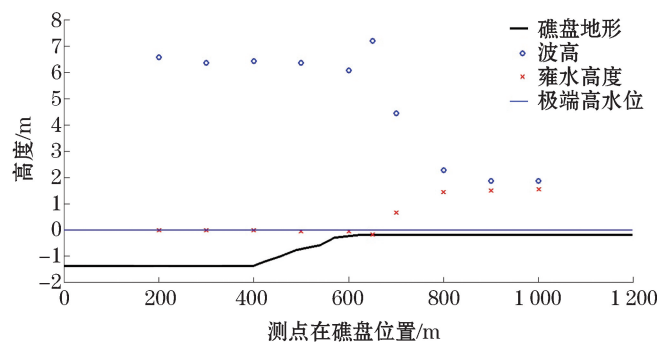


图 2 极端高水位 $\bar{T}(s)=11.8\text{ s}$, $\bar{H}=6.7\text{ m}$ 波浪的传播变形
Fig.2 Transformation of the waves with $\bar{T}(s)=11.8\text{ s}$, $\bar{H}=6.7\text{ m}$ at extremely high water level

$$q = \frac{V}{bt}, \quad (1)$$

式中: q 为单宽平均越浪量, 单位为 $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$; V 为 1 个波列即 100 个波浪作用下的总越浪水量, 单位为 m^3 ; b 为收集越浪量的接水宽度, 单位为 m ; t 为 1 个波列作用的持续时间, 单位为 s 。

根据所测越浪量数据列表 2, 因波能($\overline{H}^2 \cdot T_p$)与平均波高(\overline{H})成平方关系, 并且与波周期正相关, 为更好地体现其与越浪量的关系, 将越浪量(q)与外海谱峰周期(T_p)内波浪能量关系作图(图 3), 图中 R^2 为相关系数, 表示外海波能与越浪量的对应关系。由图 3 可见, 外海波浪输入较小时波能与越浪量的关系相对离散, 因为波浪传至礁盘后在礁坪上传播发生破碎耗散部分能量, 波高较小时破碎耗散的能量占比较波高大时大, 导致影响了越浪量的大小。

表 2 外海波能和对应越浪量值

Table 2 Wave energy and corresponding wave overtopping in the open sea

项 目	参 数	\overline{H}						
		5.5 m	6.1 m	6.7 m	7.3 m	8.0 m	8.6 m	9.2 m
$q/[\text{m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}]$	设低	0.02	0.05	0.09	—	—	—	—
	设高	0.06	0.12	0.14	—	—	—	—
	极高	0.14	0.16	0.29	0.65	0.90	1.36	1.71
$\overline{H}^2 \cdot T_p/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	设低	740	849	1 124	—	—	—	—
	设高	711	892	1 096	—	—	—	—
	极高	834	962	1 212	1 797	2 190	2 628	2 960

注: “—”代表此处无数据; T_p 代表谱峰周期

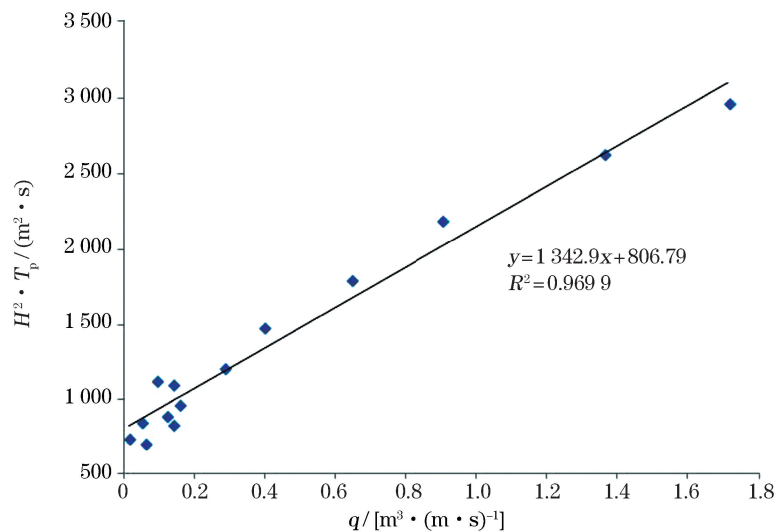


图 3 外海波能和对应越浪量关系

Fig.3 Relation between wave energy and corresponding wave overtopping in the open sea

3 结论及展望

外海波浪传递至礁盘上沿程的水动力十分复杂, 目前难于用数值计算方法进行模拟。本文采用 1 : 60 的模型比尺, 简化礁盘地形的二维物理模型, 测量了 3 种水位 7 个人射波高距礁盘边缘 400 m 处护岸的越浪量并开展了分析, 得出以下结论, 为岛礁上水工建筑物设计与应急管理提供了设计参考依据。

1) 在平均坡度为 1 : 3 的礁盘, 测量了特定波高情况下礁盘沿程平均波高(\overline{H})和雍水高度(h)。礁盘边

缘外的 GA5 测点平均波高略有下降,上礁坪后 GA6 测点平均波高超过 7 m,然后 GA7~GA9 测点波高值大幅下降,礁坪上 3 个水位的雍水高度均超过 1.5 m,设计低水位时甚至超过 2 m。

2)距礁盘边缘 400 m 处护岸越浪量与外海波浪能量呈现良好的正相关关系,相关系数(R^2)达到 0.97。

本文只研究了平均周期为 13.3 s 时不同波高的越浪量,由于岛礁一般处于波浪条件复杂的环境,下一步的研究工作将增加多组周期,预计取波浪周期范围 7~17 s,以及调整护岸与礁缘距离、护岸堤顶高程等,以给出更加符合岛礁环境特征的计算结果,为工程建设和岛礁管理提供更为丰富、实用的依据。

参考文献 (References):

- [1] BATTJES J A. Surf similarity[C]//Proceedings of the 14th Coastal Engineering Conference. Copenhagen, Reston: ASCE, 1974: 466-480.
- [2] NIE Y, LI X Q, ZHU S X, et al. Numerical simulation of surf shoaling and breaking on reefs[J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(3): 374-383. 聂屿, 朱首贤, 李训强, 等. 基于波浪水槽实验建立陡坡—礁盘地形的拍岸浪统计计算模型[J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(3): 374-383.
- [3] BOUWS E, GUNTHER H, ROSENTHAL W, et al. Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water: 1. Spectral form[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(C1): 975-986.
- [4] DEAN R G, DALRYMPLE R A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*[M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1984.
- [5] NIE Y, LI X Q, ZHU S X, et al. A statistical model for surf shoaling and breaking on reefs with steep bathymetry based on flume experiments[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(3): 329-336. 聂屿, 李训强, 朱首贤, 等. 岛礁地形上拍岸浪的数值模拟研究[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(3): 329-336.
- [6] Water Transport Bureau of the Ministry of Transport. *Wave model test regulation: JTJ/T 234—2001*[S]. Beijing: China Communication Press, 2002. 交通运输部水运局. *波浪模型试验规程: JTJ/T 234—2001*[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [7] HARDY T A, YOUNG I R, NELSON R C, et al. Wave attenuation on a coral reefs[J]. *Australian Civil Engineering Transactions*, 1991, CE33(1):17-22.

2D Model Experimental Study of Wave Transformation, Setup and Overtopping in Island Reef Environment

LI Yu-long, XIA Yun-qiang, LIU Yu-liang
(*Naval Research Academy, Qingdao 266061, China*)

Abstract: The interaction between surges and waves on island reefs is nonlinear, and the topography of the reef flats is so complicated that it is difficult to establish a numerical flume for research. The existing design specifications for domestic coastal projects are mainly for the mainland coasts, and no one for the deepwater island reefs which are complex in topography and rapid in water depth change. However, it is the latter that is very important for determining the revetment elevation on the island reefs and the distance between the revetment and the edge of the reef plate. The present experiment is to study the hydrodynamic data of the waves passing from the open sea to the reef plate in the island reef environment, to measure the wave overtopping of the revetment at a distance of 400 m away from the edge of the reef plate and to offer references for the design and emergency management of the hydraulic structures on island reefs.

Key words: island reef; reef flat; setup; wave overtopping

Received: December 19, 2019