

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.009
刘清君,张晋勋,孙天霆,等. 岛礁地形抛石护岸稳定性试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2019(5): 69-75. (LIU Qingjun, ZHANG Jinxun, SUN Tianting, et al. Experimental studies on stability of riprap revetment on fringing reefs[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(5): 69-75. (in Chinese))

岛礁地形抛石护岸稳定性试验研究

刘清君^{1,2},张晋勋³,孙天霆¹,徐 华¹,王登婷¹,李 秦³

(1. 南京水利科学研究院 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室,江苏 南京 210029; 2. 河海大学 港口海岸及近海工程学院,江苏 南京 210098; 3. 北京城建集团有限责任公司,北京 100088)

摘要: 岛礁地形是一种特殊的海岸形式,国内外学者对波浪在岛礁地形上的传播变形研究较多,但对于岛礁地形上的护岸工程研究较少,缺乏对关键设计参数的研究。以马尔代夫机场岛护岸工程为例,通过比例尺为 1:10 的波浪水槽物理模型试验,分析研究了 3 种不同岸坡宽度、4 种不同水深和波浪组合工况下的护面块石稳定性。结果表明,前沿岸坡宽度,即护岸坡脚至礁缘之间的距离是影响抛石护岸稳定性的重要因素。在同样水深、波况及护岸块石质量条件下,护面块石的失稳率随岸坡宽度的增加而减小。进一步分析发现,为保障护岸安全,抛石护岸外坡坡脚宜布置于波浪破碎点之后,且与破碎点之间距离不应小于浅水波长的 26%,即 $0.26T/\sqrt{gh_c}$ 。

关 键 词: 岛礁; 抛石护岸; 稳定性; 岸坡宽度; 模型试验

中图分类号: TV139.2+5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2019)05-0069-07

岛礁是一种特殊的海岸形式,与常规海岸相比,通常由陡峭的礁前斜坡和相对平坦的礁坪组成。礁前斜坡坡比一般在 1:10 的量级^[1],有时可达 1:4.5 甚至更大^[2]。不同岛礁的礁坪宽度也会存在一定变化,有的礁坪宽度可达几千米,例如澳大利亚 Warraber 岛^[3]的礁坪宽度约 5 km,有的礁坪宽度仅为几十米,例如马尔代夫机场岛。

马尔代夫机场岛位于马尔代夫中部,紧邻其首都马累,属于珊瑚岛礁地形。马尔代夫机场岛护岸工程是马尔代夫机场改扩建工程的一部分。根据位置和地形的不同,护岸形式分为抛石式和板桩式。本文对抛石护岸稳定性进行研究。抛石护岸分布于机场西北侧,设计使用寿命为 50 年,总长度 865 m,断面形式如图 1 所示。现场地形测量资料显示:机场西北侧岸段岸坡较陡,坡度约为 1:1.5~1:3.0,礁坪宽度较窄,约为 20 m,高水位时礁坪水深为 2~3 m。对于此类岛礁地形,波浪从深海传播至礁前斜坡时,水深急剧变浅,波浪变形严重,较大的波浪会在礁缘附近发生剧烈破碎,且大部分能量在破碎过程中得以消耗。因此这一区域的流态和动力条件十分复杂,会对护岸稳定性产生不利影响。

目前对于岛礁地形波浪动力特性的研究,多关注于波浪在礁坪上的传播^[4-6]、破碎^[7-9]、增水^[2,10-11]、波生流^[12-14]等方面;而对岛礁地形上护岸工程稳定性的研究较少,尤其对于此类前沿岸坡较短的情况更是鲜有报道,对关键设计参数的认识较为缺乏。针对这一现状,以马尔代夫机场岛护岸工程为例,通过二维物理模

收稿日期: 2018-12-13
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0407503);国家自然科学基金面上项目(51579156);南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重大项目(Y218006);南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目(Y218005)
作者简介: 刘清君(1986—),男,河南商丘人,博士研究生,主要从事波浪及其与建筑物相互作用研究。
E-mail: liuqingjun121@126.com

型试验,对岛礁地形上抛石护岸稳定性进行研究,以期为今后同类工程设计提供借鉴参考。

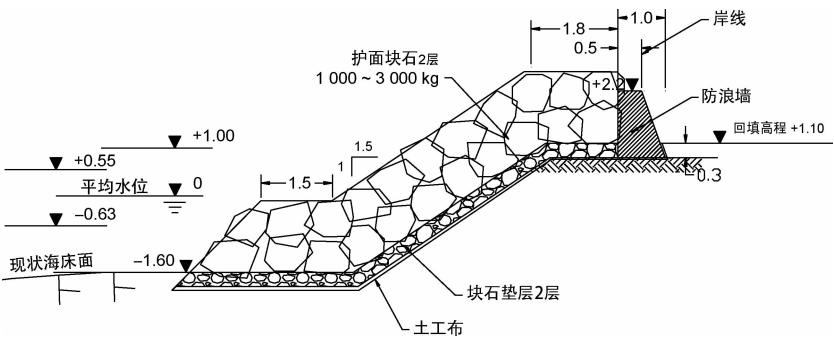


图 1 斜坡式护岸断面(单位:m)

Fig.1 Slope revetment section (unit: m)

1 试验设计

1.1 模型布置

试验在南京水利科学研究院波浪水槽中进行,水槽长 60 m,宽 1.8 m。水槽一端配有推板式造波机,并安装了二次反射波浪吸收装置。此外,在水槽两端均配有消浪缓坡及消浪设施,以减少波浪反射。试验水槽布置如图 2 所示。试验采用正态模型,按 Froude 数相似律设计,模型比尺为 1:10。

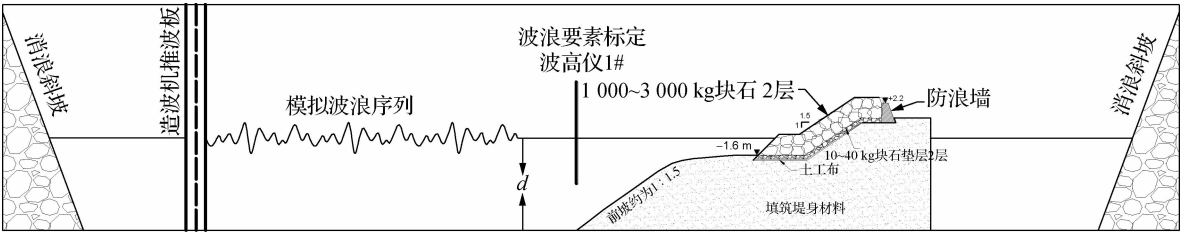


图 2 波浪水槽和模型布置

Fig.2 Wave flume and model layout

1.2 试验水深和波浪要素

试验波浪要素采用本工程《设计波浪要素推算报告》^[15]提供的计算结果。试验考虑了 4 种工况,工况 1 为 50 年一遇波浪 + 高水位(1.00 m);工况 2 为 50 年一遇波浪 + 设计高水位(0.55 m);工况 3 为 50 年一遇波浪 + 平均水位(0 m);工况 4 为 50 年一遇波浪 + 设计低水位(−0.63 m)。各工况下原型和模型的波浪要素如表 1 所示。由表 1 可知,各水位下波浪要素相差不大。由于水槽水深限制,模型中礁前最大水深为 1.4 m,即礁前地形从 −13.0 m 起算。为减少水深的影响,在试验结果分析阶段可将入射波高按线性理论换算成等效深水波高 H_0 ,具体换算方法可参考《港口与航道水文规范》(JTS 145—2015)。^[16]

1.3 试验方法

试验中为得到目标波浪要素(表 1),在正式试验前,需要先对波浪要素进行标定。标定过程中水槽内不摆放任何模型,仅在礁前斜坡坡脚处摆放 1 根波高仪(见图 2),用于标定入射波浪要素大小。标定过程中,遵照《波浪模型试验规程》(JTJ/T 234—2001)^[17],控制波普参数在误差范围以内,同时波高和周期模拟值与设计值的误差控制在 ±3% 以内。在正式试验阶段,按标定的参数输入造波机控制系统进行造波。造波机每次连续造波个数不少于 120 个。

表1 试验水深和波浪要素

Tab.1 Water depths and wave parameters for experimental studies

项目	工况	d/m	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{4\%}/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	$\overline{H}/\text{m}$	T/s
原型值	1	14.00	3.09	2.61	2.53	2.11	1.33	5.61
	2	13.55	3.07	2.60	2.51	2.10	1.33	5.60
	3	13.00	3.04	2.57	2.49	2.07	1.30	5.53
	4	12.37	2.93	2.48	2.39	2.00	1.26	5.46
模型试验值	1	1.400	0.309	0.261	0.253	0.211	0.133	1.77
	2	1.355	0.307	0.260	0.251	0.210	0.133	1.77
	3	1.300	0.304	0.257	0.249	0.207	0.130	1.75
	4	1.237	0.293	0.248	0.239	0.200	0.126	1.73

注:本工程《设计波浪要素推算报告》^[15]中计算点处高程-19.0 m。表中 d 为水深, $H_{i\%}$ 为累计频率为 $i\%$ 的波高, $\overline{H}$ 为平均波高, T 为平均波周期。

在波浪要素标定过程中,不规则波频谱采用 JONSWAP 谱,谱密度函数为:

$$S(f)=\frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4} \frac{1}{f^5} \exp\left[-1.25\left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right] r \exp\left[\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right]$$

(1)

式中: α 为无因次常数; f_p 为谱峰频率; r 为谱峰升高因子,参照 Yoshimi^[18]、俞聿修^[19]和柳淑学等^[7-8]的研究结果, r 取3.3; σ 为峰形参数量, $f\leq f_p$ 时, $\sigma=0.07$, $f>f_p$ 时, $\sigma=0.09$ 。

完成波浪要素标定后,再在水槽内制作地形和摆放护岸模型。地形模拟采用等高线法进行圈围,偏差控制在±1 mm之内。护面块石质量经严格挑选,满足质量要求。模型检查无误后开始试验。每一工况累计试验持续时间不小于原型3 h,为保证试验结果的可靠性,每组试验至少重复3次。当3次重复试验的结果差别较大时,则增加重复次数。

1.4 关于护面块石稳定性的判别标准

护面结构失稳判别标准以《防波堤与护岸设计规范》(JTS 154—2018)^[20]中推荐的容许失稳率为标准。根据此规范护面块石抛填两层容许失稳率为1%~2%,即当滚动块石的个数超过护面块石总个数的2%时认为护面结构失稳。

2 断面稳定分析

试验考虑3种不同的岸坡宽度(见图3),即岸坡宽度取14.5、19.5和24.5 m。岸坡宽度为岸线至礁缘(-2.0 m高程)之间的距离。为方便表述,以下内容对上述3种岸坡宽度对应的断面分别称为试验断面1、试验断面2和试验断面3。

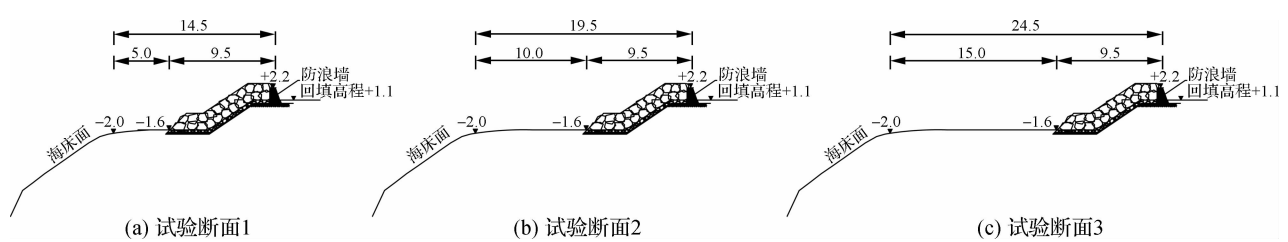


图3 试验模型断面(单位:m)

Fig.3 Test model sections (unit: m)

2.1 试验断面 1

对于试验断面 1,工况 1 试验测得 7% 左右块石发生明显滚动,滚动块石的质量为 1 200 ~2 500 kg。失稳位置位于底部坡脚 1.5 m 宽平台附近。失稳原因为波浪在护岸坡脚附近发生破碎,水体直接冲击护面块石,冲击后的回流以及卷破波浪带动块石向外海滚动。工况 2 的护面块石失稳率为 7%,失稳位置和失稳原因与工况 1 基本相同。与工况 1 和 2 相比,尽管工况 3 和 4 的波浪条件相差不大,但其水深有所减小,波浪破碎点向前(海侧)转移,卷破波对坡脚块石的冲击减弱,故未发生块石明显滚动。各工况的护面块石稳定情况见表 2。

表 2 护面块石稳定情况汇总
Tab.2 Stability of armor blocks

工况	试验断面 1			试验断面 2			试验断面 3		
	护面块石滚动个数/个	失稳率/%	是否满足稳定性要求	护面块石滚动个数/个	失稳率/%	是否满足稳定性要求	护面块石滚动个数/个	失稳率/%	是否满足稳定性要求
1	7	7	否	3	3	否	无	0	是
2	7	7	否	2	2	临界稳定	无	0	是
3	无	0	是	无	0	是	无	0	是
4	无	0	是	无	0	是	无	0	是

注:试验中护面块石总数为 98 个,所有块石均经严格挑选,满足质量要求。

2.2 试验断面 2

对于试验断面 2,工况 1 试验测得 3% 左右块石发生明显滚动,滚动块石的质量为 1 200 ~2 500 kg。失稳位置及原因与试验断面 1 基本相同。工况 2 试验测得外坡坡脚处有 2 个块石发生滚动,占块石总数的 2%。工况 3 和 4 的护面块石均无明显滚动。试验断面 2 在各工况下护面块石的稳定性如表 2 所示。

相对于试验断面 1,试验断面 2 的失稳块石数量有所减少。这主要是由于护岸前沿平台宽度有所增加,卷破波卷起的水体在传播过程中消耗了部分能量,对护面块石的冲击有所减弱。波浪在坡脚前沿的破碎情况如图 4 所示。



图 4 波浪在坡脚前沿的破碎
Fig.4 Wave breaking near slope toe

2.3 试验断面 3

对于试验断面 3,工况 1 和 2 时护面块石无明显滚动,整体稳定无变形。工况 3 和 4 时护面块石无滚动,稳定。试验断面 3 在各工况下护面块石的稳定性如表 2 所示。

相对于试验断面 1 和 2,断面 3 护面块石满足稳定性要求。这主要是由于护岸前沿平台宽度进一步增加,卷破波在传播过程中,能量进一步消耗,且部分大波的主要破碎过程在到达护岸坡脚前已基本完成,故对护面块石的冲击进一步减弱。

3 护岸稳定影响因素分析

对比以上 3 个试验断面可知,岸坡宽度是影响护面块石稳定的重要因素之一。在同一工况下,岸坡宽度越宽对护面块石的稳定性越有利,因此,护岸断面应尽量靠后布置。但由于岛礁上空间有限(如本工程),护岸布置过于靠后,势必会压缩岛礁空间资源;故还需探寻合理的平衡点,既可保证护岸工程的安全又可最大限度地释放岛礁空间资源。

4 结 语

岛礁地形不同于常规海岸地形,由于其陡峭的外坡,外海或深水入射波浪在礁缘附近发生剧烈破碎,对抛石护岸的稳定性产生不利影响。其中,岸坡宽度是影响护岸稳定的重要因素。当护岸前沿岸坡宽度较宽时,护岸宜尽量靠后,布置于破碎点之后 1 倍浅水波长之外;当护岸前沿岸坡宽度较窄时,护岸宜布置于破碎点之后,且护岸坡脚与破碎点之间的距离不小于浅水波长的 26%。

本文仅对护岸工程进行二维水槽模型试验研究。由于实际沿护岸长度方向的地形存在一定变化,同时还可能存在波浪斜向入射的问题,二维水槽试验不能反映沿岸地形变化,以及波浪斜向入射对护岸稳定性的影响,因此,可通过三维模型做进一步试验研究。另外,破碎波高、礁前斜坡坡度和长度也是影响岛礁地形上抛石护岸稳定的重要因素,建议今后亦可对此类问题进行深入研究。

参 考 文 献:

- [1] 姚宇, 杜睿超, 袁万成, 等. 珊瑚岸礁破碎带附近波浪演化实验研究[J]. 海洋学报, 2015, 37(12): 66-73. (YAO Yu, DU Ruichao, YUAN Wancheng, et al. Experimental study of wave transformation around the surf zone over fringing reefs[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(12): 66-73. (in Chinese))
- [2] MASSEL S R, GOURLAY M R. On the modelling of wave breaking and set-up on coral reefs[J]. Coastal Engineering, 2000, 39(1): 1-27.
- [3] BRANDER R W, KENCH P S, HART D. Spatial and temporal variations in wave characteristics across a reef platform, Warraber Island, Torres Strait, Australia[J]. Marine Geology, 2004, 207(1): 169-184.
- [4] SHEREMET A, KAIHATU J M, SU S F, et al. Modeling of nonlinear wave propagation over fringing reefs[J]. Coastal Engineering, 2011, 58(12): 1125-1137.
- [5] YU Y, BECKER J M, FORD M R, et al. Modeling wave processes over fringing reefs with an excavation pit[J]. Coastal Engineering, 2016, 109: 9-19.
- [6] 梅弢, 高峰. 波浪在珊瑚礁坪上传播的水槽试验研究[J]. 水道港口, 2013, 34(1): 13-18. (MEI Tao, GAO Feng. Flume experiment research on law of wave propagation in reef flat[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2013, 34(1): 13-18. (in Chinese))
- [7] 柳淑学, 刘宁, 李金宣, 等. 波浪在珊瑚礁地形上破碎特性试验研究[J]. 海洋工程, 2015, 33(2): 42-49. (LIU Shuxue, LIU Ning, LI Jinxuan, et al. Experimental researches on wave propagation characteristics on reefs terrain[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(2): 42-49. (in Chinese))
- [8] 柳淑学, 魏建宇, 李金宣, 等. 三维波浪在岛礁地形上破碎特性试验研究[J]. 海洋工程, 2017, 35(3): 1-10. (LIU Shuxue, WEI Jianyu, LI Jinxuan, et al. Experimental study on characteristics of 3D waves broken on the reefs terrain[J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(3): 1-10. (in Chinese))
- [9] JENSEN M S, BURCHARTH H F, BRORSEN M. Wave energy dissipation of waves breaking on a reef with a steep front slope [C]//The International Symposium on Ocean Wave Measurements and Analysis, 2005.
- [10] GOURLAY M R. Wave set-up on coral reefs: 2 Set-up on reefs with various profiles[J]. Coastal Engineering, 1996, 28(1): 17-55.
- [11] 姚宇, 唐政江, 杜睿超, 等. 潮汐流影响下珊瑚岛礁附近波浪传播变形和增水试验[J]. 水科学进展, 2017, 28(4): 614-621. (YAO Yu, TANG Zhengjiang, DU Ruichao, et al. Laboratory study of wave transformation and wave-induced setup over reef islands under the effect of tidal current[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(4): 614-621. (in Chinese))
- [12] 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, 27(3): 161-193.
- [13] GOURLAY M R, COLLETER G. Wave-generated flow on coral reefs: an analysis for two-dimensional horizontal reef-tops with steep faces[J]. Coastal Engineering, 2005, 52(4): 353-387.

- [14] SYMONDS G, BLACK K. Predicting wave-driven currents on surfing reefs[J]. Journal of Coastal Research, 2001, 29: 102-114.
- [15] 王红川, 杨汎. 马尔代夫国际机场改扩建工程设计波浪要素推算报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016. (WANG Hongchuan, YANG Fan. Maldives international airport reconstruction and expansion project design wave elements calculation report[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2016. (in Chinese))
- [16] JTS 145—2015 港口与航道水文规范[S]. (JTS 145—2015 Code of hydrology for harbour and waterway[S]. (in Chinese))
- [17] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S]. (JTJ/T 234—2001 Wave model test regulation [S]. (in Chinese))
- [18] YOSHIMI G. 随机波浪和海港工程设计[M]. 3版. 黄海龙, 冯中华, 王驰, 等译. 南京: 河海大学出版社, 2016: 13-15. (YOSHIMI G. Random wave and harbor engineering design [M]. 3rd ed. Translated by HUANG Hailong, FENG Zhonghua, WANG Chi, et al. Nanjing: Hohai University Press, 2016: 13-15. (in Chinese))
- [19] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2000: 148-152. (YU Yuxiu. Random wave and its applications for engineering[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2000: 148-152. (in Chinese))
- [20] JTS 154—2018 防波堤与护岸设计规范[S]. (JTS 154—2018 Code of design for breakwaters and revetments [S]. (in Chinese))
- [21] YAO Y, HUANG Z, MONISMITH S G, et al. Characteristics of monochromatic waves breaking over fringing reefs[J]. Journal of Coastal Research, 2013, 286(1): 94-104.
- [22] 刘清君, 孙天霆, 王登婷. 岛礁陡坡地形上波浪破碎试验研究[J]. 水运工程, 2018(12): 43-46. (LIU Qingjun, SUN Tianting, WANG Dengting. Experimental research on wave breaking on steep reef terrain[J]. Port and Waterway Engineering, 2018(12): 43-46. (in Chinese))
- [23] GOURLAY M R. Wave transformation on a coral reef[J]. Coastal Engineering, 1994, 23(1-2): 17-42.

Experimental studies on stability of riprap revetment on fringing reefs

LIU Qingjun^{1,2}, ZHANG Jinxun³, SUN Tianting¹, XU Hua¹, WANG Dengting¹, LI Qin³

(1. Key Laboratory of Port, Waterway & Sedimentation Engineering of MOT, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: The fringing reef is a special coastal topography. Many scholars at home and abroad have studied the propagation and deformation of waves on the fringing reefs, but few have studied the revetment engineering on the fringing reefs, hence lack of understanding of the key design parameters. For this reason, taking the revetment project of the Maldives Airport island as an example, some analyses and studies of the stability of the armor blocks under the conditions of three different bank widths, four different water depths and wave combinations are carried out through the physical model test in a 1:10 scale wave flume. The test results show that the bank width, that is, the distance between the toe of the riprap revetment slope and the reef edge, is an important factor affecting the stability of the riprap revetment. Under the same water depth, wave condition and weight of the revetment blocks, the instability rate of the revetment blocks decreases with the increase of the width of the bank slope. Further analysis of the test results shows that in order to ensure the safety of revetment, the toe of slope outside the riprap revetment should be placed behind the breaking point of wave, and the distance between the toe of the slope and the breaking point is recommended not to be less than 0.26 times the shallow water wave length of reef flat $T/\sqrt{gh_c}$. This key design parameter has important guiding significance for the design of similar bank protection works in the future.

Key words: fringing reef; riprap revetment; stability; bank slope width; model test