



随机波浪作用下的防波堤三维 稳定性及越浪量试验研究*

高峰¹, 雷华², 张慈珩¹, 戈龙仔¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456;

2. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 对于防波堤和护岸工程设计, 三维随机波试验已开始广泛应用于防波堤研究中, 因为相对于传统的二维随机波试验, 三维随机波试验对于波浪绕射、越堤水量、三维稳定性、透浪以及它们之间的相互影响等问题均可以给出更好的解释。本研究在不同波向及重现期波浪作用下, 对包含堤头、堤身与堤根的全尺寸防波堤进行三维稳定性与越浪量测试, 试验中各段护面块体 (12、18、24 t 双联块体) 均可保持稳定, 而各水位重现期 50 a 最大越浪量为 10 L/(m·s)。与二维波浪水槽试验结果进行对比, 稳定性结论一致, 但越浪量存在较为明显的差异, 在设计高水位时, 二维断面试验的越浪量比三维试验中的要大 10% ~ 30% 不等, 与日本 PARI 相关研究得到的三维不规则波的越浪量约要比二维不规则波时低 20% ~ 30% 结论较为接近, 而在极端高水位时其差距变得更大, 甚至达到了 50% ~ 60%。由于二维断面试验中采用正向浪作用, 且无法模拟波能沿堤传输扩散等实际现象, 加之易出现堤前壅水情况, 因此其越浪结果有所偏大, 而采用三维稳定性试验更接近真实情况。

关键词: 防波堤; 三维; 稳定性; 越浪量; 模型试验

中图分类号: U 656.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)10-0050-07

Three-dimensional stability and overtopping test of breakwater under random wave action

GAO Feng¹, LEI Hua², ZHANG Ci-hen¹, GE Long-zai¹

(1. Key Laboratory of Engineering Sediment, Ministry of Transport, Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering,

Tianjin 300456, China; 2. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: For the design of breakwater and revetment engineering, the 3-D random wave test has been widely applied to the research on the breakwater, because problems concerning the wave diffraction, overtopping, three dimensional stability, wave permeability and their mutual influences can be given a better explanation compared with the traditional 2-D random wave test. Under the action of waves with different wave directions and return periods, the 3-D stability and overtopping test for the full-size breakwater which includes the head, trunk and root is carried on, in which the armor block (12 t, 18 t and 24 t double-link block) can remain stable, and the largest wave overtopping rate is about 10 L/(m·s) of 50 years' recurrence period. The conclusion on stability is the same of that by the 2-D wave flume, but there as an obvious difference for the overtopping. For the design high water level, the overtopping is about 10% ~ 30% of 2-D model test than 3-D, which is close to the research law of PARI, Japanese. But for the extreme high water level, the gap becomes larger, and even reaches about 50% ~ 60%. Since the 2-D section experiment adopts the positive wave, and it can't simulate the phenomenon of actual oblique waves, wave energy transport along the breakwater and dissipation, etc., the wave overtopping will be larger than the real value, but the result from the 3-D stability test is closer to the real situation.

Keywords: breakwater; 3-D; stability; wave overtopping; model test

收稿日期: 2015-03-05

*基金项目: 交通运输应用基础研究 (重点平台) 项目 (2013329224230)

作者简介: 高峰 (1978—), 男, 高级工程师, 从事港口航道及海岸工程水动力试验研究。

防波堤的主要作用是抵御波浪对堤后建筑及海岸带的侵袭, 是海岸和近海工程中常见的经典防护形式, 其护面块体是海岸工程中常用的结构形式, 用来衰减波浪并保护防波堤等结构主体的安全。波浪与防波堤等海岸工程中的结构物相互作用的过程, 是流体、固体和气体共同参与的能量传递过程。对于新建港区, 当设计确定采用某一种形式的防波堤前, 必须通过波浪物理模型试验、数值模拟计算或现场观测试验等手段, 对方案的可行性与合理性进行验证。因此, 波浪水槽进行防波堤稳定性验证试验成为一种常规而普遍的研究检验方法, 历经多年的完善和改进, 至今已形成一套完整的相似理论、试验方法和观测技术, 并应用在实际工程中。波浪作为其中重要的作用动力要素之一, 一直以来都是国内外学者研究的重点内容, 由于波浪运动本身的复杂性, 准确有效地模拟波浪运动是一件十分有挑战性的任务。随着对海洋动力条件研究的不断深入, 对于波浪试验的研究, 也相继经历了规则波、二维(水槽单向)随机波、三维(水池多向)随机波的发展过程^[1]。目前, 对于防波堤和护岸工程设计, 三维随机波试验也逐渐开始应用于防波堤研究中。

1 国内外研究现状

目前, 采用三维模型解决波浪与建筑物相互作用的问题在国外已成为常规的研究手段, 正得到学术界与工程界的广泛认可。不同方向波浪对防波堤堤头段护面块体稳定的影响很大^[2]。Gamot (1969 年) 即通过试验研究了斜向规则波作用下四脚锥体的稳定性, 表明其稳定性随波向角增大, 但一旦护面有所损坏, 斜向波作用时损坏速度就会加快。1995 年, 在第 26 届国际水力研究协会 (IAHR) 大会上, 有多篇论文和报告述及三维不规则波对海工建筑物的作用问题, 特别是欧盟介绍了他们的海洋科技研究计划 (MAST 计划) 有

关三维不规则波的越浪量以及波浪荷载等方面的研究成果。此外, IAHR 下属的海洋水力学专业委员会筹组国际性的“三维不规则波对防波堤作用”工作小组, 以协同开展此项工作。所有这些都表明三维不规则波对海工建筑物作用的研究和应用已经提到日程。此后, 日本运输省港湾技术研究所 (PARI) 对三维不规则波作用下海堤越浪量的研究结果表明: 由于方向谱中斜向分量的作用导致越浪量将比二维不规则波作用下小, 并根据三维与二维不规则波越浪量试验的对比, 阐述三维不规则波的越浪量要比二维不规则波时低 20% ~ 30% 的观点^[3]。荷兰 Delft 水力研究所的三维不规则波对直立堤的越浪量试验结果表明, 由于波浪入射角、方向分布函数以及波陡等的影响, 可在二维不规则波作用时的无因次越浪量计算式中引入折减系数, 与二维波相比三维波约减少 10%^[4]。英国规范 (BS6349)、国际航运协会 (PIANC) 的港口设计师手册中对防波堤三维稳定性试验的比尺选择也做了明确规定^[5-6]。受这一趋势的影响, 我国港工研究领域也逐渐接受三维波浪物理模型试验的理念, 并通过模拟护面块体和块石级配等复演防波堤或护岸在不同方向波浪和水位组合下的稳定性、越浪以及堤后次生波等现象, 并在斜坡式防波堤稳定性研究领域得到快速发展和应用, 传统的防波堤波浪水槽二维稳定性试验正在逐步被三维局部整体乃至三维整体试验所代替。俞聿修等^[7]研究了波浪斜度对于 Hudson 公式中的块体稳定系数的影响, 董国海等^[8]应用三维波浪物模试验验证了斜向波浪作用下混凝土消浪块体稳定性, 姜云鹏等^[9]在沿海景观护岸工程研究中应用三维波浪稳定性试验对比了人工块体规则摆放与不规则摆放的防护效果, 张慈珩等^[10]采用三维物理模型试验模拟了沿防波堤传播形成的 STEM 波效应, 这种波浪在沿结构物传播过程中能量迅速集中, 沿程波高及范围增大, 并易在结构物边缘及突出部分发生破碎, 破碎波浪

及破波水流对结构形成强烈冲击,可对护面块体稳定性造成威胁。

2 模型试验

试验依托工程位于印尼爪哇岛南岸,属于南半球赤道无风带,波浪表现为长周期涌浪,根据实测结果,平均周期在 14 s 左右,主要来浪方向集中在 S-SSW。由于波浪条件恶劣,拟通过三维波浪物理模型试验,验证和评价拟建防波堤(图 1)的稳定性、观测波浪越浪情况,并与先前进行的二维断面试验结果进行对比分析,确定设计方案的堤顶越浪量是否满足设计标准,为方案确定提供科学依据。

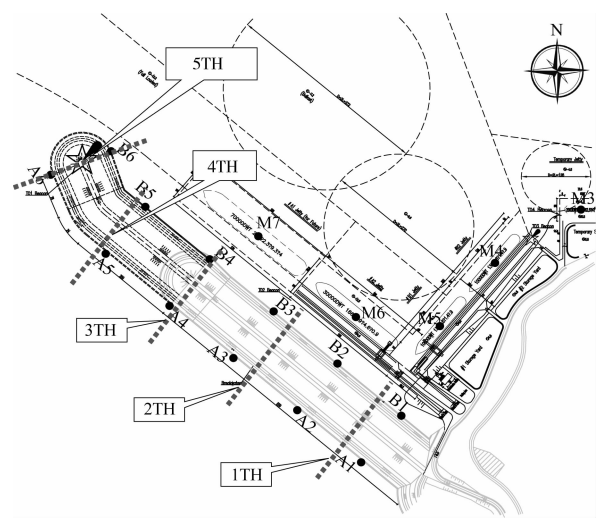


图 1 防波堤试验断面位置分布

2.1 试验条件

模型试验在波浪试验水池中进行。池长 45 m,宽 35 m,深 1.2 m,采用不规则造波机,水池四周均设置有消波设备。主要试验参数如下:

- 1) 试验水深:极端高水位为 2.36 m,设计高水位为 1.85 m,设计低水位为 0.15 m;
- 2) 试验中频谱采用 JONSWAP 谱 ($\gamma=3.3$);
- 3) 波浪的方向选取本海域主要影响浪向,即 SW 和 SSW 向;
- 4) 试验波要素由数学模型推算确定,设定的波高见表 1。

表 1 试验波浪条件

波向	水位/m	重现期/a	一期工程		二期工程	
			$H_{1\%}$ /m	$T_{平均}$ /s	$H_{1\%}$ /m	$T_{平均}$ /s
SSW	2.36	50	8.01	17.77	8.36	17.77
		1	5.89	15.31	6.32	15.31
	1.85	50	7.94	17.77	8.26	17.77
		1	5.83	15.31	6.26	15.31
	0.15	50	7.82	17.77	8.13	17.77
		1	5.75	15.31	6.17	15.31
SW	2.36	50	7.30	17.09	7.36	16.19
		1	5.77	13.67	5.43	13.67
	1.85	50	7.19	17.09	7.23	16.19
		1	5.42	13.67	5.13	13.67
	0.15	50	7.06	17.09	7.12	16.19
		1	5.12	13.67	4.84	13.67

2.2 试验断面结构

工程试验断面位置分布以及各部分断面结构布置如图 1 所示。试验模型按照防波堤工程实施进度分为一期工程(总长 550 m)、二期工程(总长 850 m)两个阶段,均为斜坡式结构,设计坡度 1:1.5。其中,一期工程堤头段(3TH)采用 24 t 双联块体结构,垫层块石尺寸为 1 200 ~ 2 400 kg;堤身部分(2TH)海侧采用 18 t 双联块体,垫层块石尺寸为 900 ~ 1 800 kg;堤根部分采用 12.0 t 双联块体进行护面,下方垫层采用 600 ~ 1 200 kg 块石,各部分断面结构设计如图 2a) ~ 2c) 所示。二期工程堤头部分(5TH)两侧及堤顶均为 27 t 双联块体结构,垫层块石尺寸为 1 350 ~ 2 700 kg;堤身部分(4TH 部分)部分海侧采用 24 t 双联块体,垫层块石尺寸为 1 200 ~ 2 400 kg,各部分断面结构设计如图 3d) ~ 3e) 所示。

2.3 模型设计与布置

模型按重力相似准则设计。根据试验要求,结合试验场地及设备情况,模型选用几何比尺为 39,时间比尺为 6.24。模型水下地形采用桩点法复制,平面尺寸及高程按几何相似原则制作。试验场地平面按 1.2 m × 1.2 m 布设桩点,尺寸偏差控制在 ± 1 cm 以内,用于制作地形的桩点高程用水准仪精确控制,偏差控制在 ± 1 mm 以内。防波堤的护面块体模型中护面块体采用水泥、原子灰与配重铁粉预制,质量偏差与几何尺寸误差均

身护面块体, 堤头处出现破波水体绕流。试验中, 堤身及堤顶护面块体均能维持稳定, 仅堤身港侧 2 000 ~ 2 500 kg 护面块石在越浪水体冲击下, 个别发生滚落, 但失稳率小于 1%。极端高水位与设计高水位试验现象基本相同, 而当低水位时, 上述作用现象有所减弱。SW 和 SSW 向作用下, 一期、二期工程试验情况相似。

3.2 堤顶越浪量

1) SSW 向浪作用。

极端高水位 (2.36 m) 重现期为 50 a 一遇波浪作用下, 一期工程的波浪爬高可越过堤顶形成越浪, 在一个连续波列中, 出现越浪的波浪个数约为 6%, 最大平均越浪量为 10 L/(m·s) (2TH 段), 而在重现期为 1 a 一遇条件下仅有溅

浪、无明显越浪出现 (表 2)。二期工程在一个连续波列中出现越浪个数占 7%, 极端高水位重现期 50 a 最大越浪量为 9.8 L/(m·s) (2TH 段), 而在重现期为 1 a 条件下仅有溅浪、无明显越浪出现。

2) SW 向浪作用。

极端高水位 (2.36 m) 重现期为 50 a 一遇波浪作用下, 一期工程越浪的波浪个数约为 10%, 最大平均越浪量为 7.9 L/(m·s) (2TH 段), 重现期为 1 a 一遇条件下为 0.4 L/(m·s) (2TH 段) (表 2)。二期工程在一个连续波列中出现越浪个数占 7%, 极端高水位下重现期 50 a 最大越浪量为 9.8 L/(m·s), 重现期为 1 a 波浪作用最大平均越浪量为 0.3 L/(m·s) (2TH 段)。

表 2 波浪作用下的越浪量 L/(m·s)

波向	水位	重现期/a	一期工程			二期工程	
			堤身端(2TH)	堤根段(1TH)	堤身段(4TH)	堤身端(2TH)	堤根段(1TH)
SSW 向	极端高水位	50	10.0	溅浪	6.4	9.8	溅浪
		1	溅浪	溅浪	浪	溅浪	溅浪
	设计高水位	50	5.8	溅浪	2.4	6.0	溅浪
		1	溅浪	溅浪	溅浪	溅浪	溅浪
	设计低水位	50	0.2	溅浪	0.1	0.3	溅浪
		1	溅浪	溅浪	溅浪	溅浪	溅浪
SW 向	极端高水位	50	7.9	5.6	6.2	9.2	5.4
		1	0.4	0.2	0.2	0.3	0.3
	设计高水位	50	5.5	0.7	2.1	6.8	0.6
		1	0.3	溅浪	0.1	0.2	溅浪
	设计低水位	50	0.5	溅浪	0.4	0.8	溅浪
		1	溅浪	溅浪	溅浪	溅浪	溅浪

3.3 与二维断面试验对比

先前针对防波堤一期工程还进行过二维波浪水槽试验。试验结果表明, 对于二维试验中的防波堤各试验段断面结构, 各部分均能保持稳定, 这与三维试验结果基本一致。但越浪量结果出现差异, 除了各水位重现期 1 a 波浪作用下的堤顶同样不发生明显越浪现象之外, 设计高水位、极端高水位对应越浪量分别为 8.79、23.67 L/(m·s), 这与三维整体试验结果差距较大。经过其他各组次的对比分析可知, 在设计高水位时, 二维断面试验的越浪量比前文三维试验中的要大 10% ~

30%, 与日本 PARI 相关研究规律接近, 而在极端高水位时其差距变得较大, 甚至达到了 50% ~ 60%。导致二维水槽试验越浪量偏大的原因可能与长周期波在二维水槽里试验时入射波更易叠加导致堤前壅水和能量集中有关, 这种现象对于较长周期的涌浪作用时更为明显。由于二维水槽试验中只能采用正向浪、且受水槽边壁限制能量更传递更集中等因素, 与实际原型波浪会与防波堤轴线存在一定角度、且有波能沿堤头绕射和横向扩散等现象不同, 因此在断面试验中测得的越浪结果偏大, 而采用三维稳定性试验更接近真实情况。

4 结语

1) 在 SW 与 SSW 向浪、重现期 50 a 波浪作用下, 大部分波浪于堤头及堤身海侧斜坡上发生破碎, 虽然破波水体直接冲击堤身护面块体, 但各段护面块体及块石均可保持稳定, 仅是堤身港侧受越浪水体的冲击, 个别块石发生滚落。这与二维波浪水槽试验的结果基本一致。

2) 在 SSW 向浪作用下, 各水位重现期 50 a 最大越浪量为 $10 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$, 重现期为 1 a 条件下仅有溅浪; SW 向浪作用下, 各水位重现期 50 a 最大越浪量为 $7.9 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$, 重现期为 1 a 条件下为 $0.4 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$; 在设计高水位 (1.85 m) 条件下, 重现期为 1 a 波浪作用最大平均越浪量为 $0.3 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。而二维水槽断面试验中各水位对应最大越浪量可达 $23.67 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$, 存在较明显的差异。

3) 对比分析表明, 二维水槽断面试验的越浪量比三维试验中的大约 30%, 甚至达 50%, 其增大的特征与 IAHR 及日本 PARI 相关结论接近, 但增大幅度更显著一些。由于二维水槽断面试验受各种因素制约 (如正向浪作用、槽壁限制、堤前壅水等), 其越浪结果会比采用全尺寸三维防波堤模型试验的结果偏大。因此, 基于不同方法的试验将导致不同的结果, 从而影响最终设计方案中防护标准和结构高程的确定。由于采用三维试验相比二维断面试验更能够反映实际海浪传播变形和作用情况, 其结果避免了二维试验中的一些简

化和不足, 因此其更加接近真实情况, 对实际工程设计具有更好的应用价值。

参考文献:

- [1] 谢世楞. 三维不规则波作用下海堤和防波堤的越浪量计算[J]. 港工技术, 1995(4): 1-4.
- [2] Araki S, Yanagihara T, Nijima H, et al. Deformation of submerged breakwater head under oblique wave incidence[C]//Hawaii: Proceedings of the 13 International Offshore and Polar Engineering Conference, 2003.
- [3] Hiraishi T, Moehizuki N. Wave Overtopping Rate of Seawall in Directional Sea [C]// London: 26 th IAHR Congress—HYDRA 2000, 1995.
- [4] Franeo C. 3-D Wave Overtopping on Caisson Breakwaters[C]// London: 26 th IAHR Congress, HYDRA2000, 1995.
- [5] BS 6349-1: 2000, Maritime Structures —Part 1: Code of Practice for General Criteria[S].
- [6] Thoresen C A. Port Designer's Handbook[M]. 2nd Edition. Shropshire, England: Thomas Telford Ltd, 2010.
- [7] 俞聿修, 柳淑学, 朱传华. 多向不规则波作用下斜坡式建筑物护面块体的稳定性[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 92-104.
- [8] 朴正. 斜向波浪作用下混凝土消浪块体稳定性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [9] 姜云鹏, 张烨, 郑子龙. 波浪作用下护岸三维稳定试验研究[J]. 水道港口, 2014, 35(1): 15-18.
- [10] 张慈珩. STEM 波作用下防波堤护面稳定的物理模型研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.

(本文编辑 郭雪珍)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿邮箱: www.sygj.com.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。