

消波堤的迭代设计研究

许强* 卢立娇

东北农业大学水利与土木工程学院，黑龙江哈尔滨，150030；

摘要：本研究围绕防波堤在波浪冲击下的消波性能与结构稳定性展开，采用物理模型实验系统，比较分析了三种典型防波堤结构（直立式、堆石式及加装消波模块的堆石式）在规则波与不规则波三种工况下的响应。结果表明，C型防波堤在消波率、抗冲刷能力、反射率和结构稳定性方面表现最优，尤其在大波浪条件下优势显著。研究指出，通过加装消波模块可显著提高防护性能，为海岸工程中防波堤的选型与优化提供理论支撑与实践指导。

关键词：防波堤结构；消波性能；结构稳定性

Research on Iterative Design of Wave Dissipater

Xu Qiang, Lu Lijiao

School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University Harbin, 150030;

Abstract: This study focuses on the wave-dissipating performance and structural stability of breakwaters under wave impact. Using a physical model experiment system, it compares and analyzes the responses of three typical breakwater structures—vertical, rubble mound, and rubble mound with wave dissipation modules—under regular and irregular wave conditions. The results show that the C-type breakwater (rubble mound with dissipation modules) performs best in terms of wave dissipation rate, scour resistance, reflection rate, and structural stability, with particularly notable advantages under large wave conditions.

Keywords: Breakwater structures; Wave dissipation performance; Structural stability Pier.

DOI: 10.69979/3029-2727.25.04.047

绪论

随着全球气候变化加剧和沿海地区经济活动的不断发展，海岸带工程面临着日益严峻的波浪侵袭问题。防波堤作为一种重要的海岸防护结构，广泛应用于港口、海岸及滨海基础设施的建设中。传统防波堤设计常基于经验公式和现场观测，缺乏系统的性能对比和迭代优化过程。为了提升性能，现代设计倾向于结合物理实验与数值模拟，优化结构形式与模块配置。

本研究聚焦于消波堤的迭代设计，结合实验室物理造波水槽系统，通过设置不同波浪工况，对多种防波堤结构进行冲击实验，测量其消波率、浪高变化及破坏机制等关键性能指标，并在分析基础上提出优化策略。

1 实验概况

1.1 实验原理

本实验旨在探究不同形式防波堤结构在规则波与不规则波冲击下的消波性能与抗冲刷能力。通过建立物理模型、设置多种波浪工况，在水工实验水槽中进行造波实验，采集波高、波长、波速等关键参数，并对结构响应和破坏

机制进行分析，为防波堤的优化设计提供依据。

波浪在传播过程中，当遇到防波堤等障碍结构时，其动能与势能部分被反射、透射或转化为湍流而损失。消波性能通常用“消波率”表示，即堤前后波高的差值与堤前波高之比：

$$K_d = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \times 100\%$$

其中 H_1 为堤前波高， H_2 为堤后波高， K_d 即为消波率，单位为百分比。消波率越高，表示防波堤结构削减波能效果越显著。

1.2 设备与材料

为研究不同结构形式及消波模块组合下的防护效果，本研究采用了物理实验的方法。实验设备及材料的选择和布置旨在尽可能模拟真实的河床环境，同时保证实验的可控性和可重复性，实验室位于东北农业大学水利与土木工程学院水工厅。

实验在水工厅长 25 m、宽 0.6 m、高 0.8 m 的玻璃水槽中进行。主要设备包括：造波系统：可调频率范围 0.3 –

1.2 Hz, 波高调节范围 2 – 12 cm; 浪高仪: 精度±0.2 mm, 安装于堤体前后 0.5 m 处; 消波系统: 安装于水槽尾部, 确保波能有效耗散, 避免反射干扰; 控制采集系统: 记录波高、波速、周期等时间序列数据, 采样频率为 50 Hz。

设置三种典型防波堤模型: A 型: 直立式防波堤 (光滑垂直面), 高 25 cm; B 型: 堆石式防波堤, 坡比 1:1.5, 堤脚宽 20 cm; C 型: B 型基础上添加消波模块 (圆筒式与空心块组合)。模型材料为透明亚克力与模拟粗石, 结构均匀布置于水槽中上游 6 m 处。

设定三种典型波浪工况进行冲击实验:

表 1 三种典型波浪工况的参数设置

工况编号	波高 H (cm)	波周期 T (s)	波长 L (cm)	波速 C (cm/s)
W1	6	1.0	156	156
W2	8	1.2	225	187.5
W3	10	1.4	304	217.1

波浪类型包括规则波 (正弦波) 与不规则波 (JONSWAP 谱型), 每组工况持续造波 15 分钟。

1.3 实验步骤

检查水槽与设备完好性, 调整水位至 60 cm; 在设定堤型布置后, 安装浪高仪与消波系统; 选择造波工况, 启动造波器稳定运行; 启动采集系统, 记录波高时间序列; 实验结束后测量堤前后最大波高与平均波高; 观察堤体结构稳定性, 如移位、坍塌、冲刷坑形成等; 清理设备并更换堤型, 进行下一组实验。

1.4 实验结果与分析

1.4.1 消波性能分析

消波效果是评估防波堤性能的核心指标之一, 通常用消波率来表示。根据实验设置, 分别测试了直立式防波堤 (A 型)、堆石式防波堤 (B 型) 和加装消波模块的堆石防波堤 (C 型) 在三种波浪工况下的消波效果。

表 2 不同堤型在各工况下的消波率。

堤型	工况 W1(H=6cm)	工况 W2(H=8cm)	工况 W3(H=10cm)
A 型	44.5%	51.2%	56.7%
B 型	53.1%	61.3%	65.4%
C 型	60.8%	75.6%	80.2%

从表格中可以看出, A 型防波堤的消波效果相对较差, 尤其在波高较大的情况下, 消波率未能显著提升。B 型堆

石防波堤在不同波浪工况下的表现较为稳定, 消波率随着波浪增大而提高。C 型防波堤由于加装了消波模块, 其消波效果最为显著, 尤其在工况 W2 和 W3 下, 消波率分别提升了 14.3% 和 14.8%。

通过对消波率的进一步分析, C 型防波堤在大波浪条件下依然能够保持较高的消波效果, 验证了消波模块在增强波能消减方面的作用。

1.4.2 冲刷抗力分析

冲刷深度是衡量防波堤抗冲刷能力的一个重要指标。实验中我们通过测量不同堤型在波浪作用下产生的冲刷坑深度来评估其抗冲刷性能。

表 3 不同工况下的最大冲刷深度

堤型	工况 W1(H=6cm)	工况 W2(H=8cm)	工况 W3(H=10cm)
A 型	2.3 cm	3.5 cm	4.2 cm
B 型	1.8 cm	2.7 cm	3.1 cm
C 型	1.2 cm	1.8 cm	2.0 cm

根据上表, A 型直立防波堤的冲刷深度最大, 尤其在大波浪工况下, 堤体底部易受到较大冲击, 导致冲刷较深。B 型堆石防波堤通过较大的堤脚宽度和坡比有效减少了冲刷深度, 尤其在工况 W2 和 W3 下表现明显。C 型防波堤通过添加消波模块, 进一步增强了对波浪的能量吸收与分散能力, 降低了波浪对堤体底部的直接冲击, 因此在各工况下的冲刷深度均较小, 表现出较强的抗冲刷能力。

1.4.3 波浪反射与透射分析

除了消波率与冲刷深度, 波浪反射与透射也是防波堤性能的重要评价指标。在实验过程中, 通过浪高仪测量了不同堤型在波浪传播过程中波高的变化。波浪的反射率可以用下式计算:

$$R = \frac{H_r}{H_i} \times 100\%$$

其中, H_r 为反射波的波高, H_i 为入射波的波高。

表 4 不同堤型在不同工况下的反射率。

堤型	工况 W1(H=6cm)	工况 W2(H=8cm)	工况 W3(H=10cm)
A 型	38.2%	42.5%	45.8%
B 型	34.3%	36.7%	40.3%
C 型	28.1%	31.9%	35.5%

从表中可以看出, C 型防波堤具有最小的反射率, 表示其对波浪的能量吸收与消散能力最强, 能够有效减少波

浪的反射，对岸线的保护效果更为显著。

1.4.4 结构稳定性分析

在实验过程中，观察了不同堤型在波浪冲击下的结构稳定性。A型直立防波堤因结构简单且缺乏消波模块，容易受到较强波浪的冲击，出现一定的滑移和堤脚下沉现象。B型堆石防波堤通过较为稳定的坡比和较大的基础宽度，能够有效分散波浪的冲击力，堤体在各工况下保持稳定。而C型防波堤则结合了消波模块的优势，在波浪作用下，堤体几乎没有出现滑移和位移，结构稳定性较好。

2 讨论与优化设计

2.1 防波堤设计的优化

实验结果表明，C型防波堤由于加装了消波模块，能够显著提高消波效率，减少反射波的产生，从而有效减轻了波浪对堤体的冲击。相较于A型直立防波堤和B型堆石防波堤，C型防波堤在较大波浪条件下的表现尤为突出。加装消波模块的设计思想为防波堤的优化提供了思路，尤其在波浪较强的区域，加装消波模块不仅可以提升消波效率，还能增强防波堤的抗冲刷能力。

然而，C型防波堤的消波效果虽然最优，但其结构复杂性较高，施工难度和成本相对较大。因此，未来的研究可以探讨如何在保证消波效果的前提下，简化堤体结构，降低建设和维护成本。例如，合理选用材料和模块化设计可能是未来防波堤设计的一个重要方向。

2.2 波浪冲击下的堤体稳定性

在实验中，我们观察到A型直立防波堤在波浪冲击下容易出现较大的冲刷和结构不稳定现象，尤其在大波浪工况下，堤体易受冲击，产生下沉或滑移现象。这主要是由于A型防波堤结构单一，缺乏有效的能量分散措施。因此，A型防波堤并不适用于波浪冲击较强的海岸区域，尤其是在暴风雨和高波浪条件下，容易受到破坏。

相比之下，B型堆石防波堤通过增加堤脚宽度和坡度设计，增强了对波浪的分散和吸收作用，能够有效提升堤体的稳定性。堆石防波堤的优势在于其较为简单且稳定，但在实际应用中可能面临堆石材料浪费和施工难度等问题。

C型防波堤结合了堆石防波堤的稳固性与消波模块的高效能，能有效减轻波浪的冲击力，从而保持堤体的稳定

性。该类型堤坝在实验中的稳定性表现最佳，几乎没有出现位移或滑移现象，证明了其在极端波浪条件下的适应性。因此，在较为复杂的波浪环境下，C型防波堤具有较强的应用潜力。

2.3 波浪反射率与环境影响

波浪反射率是影响海岸线和堤坝周围水域生态环境的一个重要因素。高反射率意味着防波堤将波浪能量反射回海面，这可能对岸线附近的生物栖息地和生态系统造成不利影响。在实验中，A型防波堤的反射率较高，可能会加剧附近水域的波动，影响海洋生态系统的稳定。

相比之下，C型防波堤通过加装消波模块有效降低了反射波的产生，减少了波浪反射的负面影响。这种设计不仅有助于提高防波效果，也更为环保，减少了对周围生态环境的破坏。因此，未来的防波堤设计应注重减少波浪反射，以实现环境友好型防护效果。

3 结论

本实验通过不同防波堤模型的对比实验，分析了各堤型在波浪冲击下的消波效果、抗冲刷能力、波浪反射率以及堤体稳定性。C型防波堤在各项指标上均表现优异，尤其在消波效果和抗冲刷能力方面显著优于其他堤型，表现出较强的应用前景。然而，C型防波堤的复杂结构和较高的建造成本仍然是其在实际应用中的限制因素。因此，未来研究应继续探索新型防波堤的设计方案，优化结构、材料和施工工艺，降低建造成本，提升堤体的抗冲击能力与环保性，以应对不断变化的海洋环境和气候条件。

参考文献

- [1] 李炎保, 吴永强, 蒋学炼. 国内外防波堤损坏研究进展评述 [J]. 中国港湾建设, 2004, (06): 53-56.
- [2] 陈翔. 新型浮式防波堤的设计与性能分析 [D]. 江苏科技大学, 2015.
- [3] 牛恩宗, 王玥, 马德堂. 防波堤结构的创新 [J]. 水运工程, 2009, (01): 16-22.
- [4] 潘丽红. 台风条件下上海地区典型海堤防御能力评价研究 [D]. 华东师范大学, 2011.
- [5] 唐澳明, 季新然, 阳志文, 等. 液舱晃荡对压载水型浮式防波堤消浪性能的影响 [J]. 海南大学学报(自然科学版), 2024, 42(03): 312-320.