



半透空沉箱式防波堤的消波性能试验研究*

陈宏谔, 陈伟毅, 王立辉, 詹昌洵, 李嘉东, 阮天野

(福州大学, 福建 福州 350108)

摘要: 提出一种新型防波堤——半透空沉箱式防波堤。在玻璃水槽中进行系列水工模型试验, 量测在不同波高、周期波浪作用下, 半透空沉箱防波堤前后的波浪特征参数, 分析半透空沉箱防波堤对不同特征波浪的反射率, 波浪周期与波浪尖锐度之关系。探讨该防波堤结构的消波原理与性能, 根据试验分析结果, 选出最优的透空率及内置斜坡坡度, 试验结论可为开敞式港区码头的防波消波方案设计与规划提供一种新思路。

关键词: 防波堤; 消波效果; 半透空沉箱; 水槽试验

中图分类号: U 653

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0063-06

Experimental study on wave dissipation performance of semi-permeable caisson breakwater

CHEN Hong-ming, CHEN Wei-yi, WANG Li-hui, ZHAN Chang-xun, LI Jia-dong, RUAN Tian-ye

(Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: This paper introduces a new type of breakwater, i. e. semi-permeable caisson breakwater. By the hydraulic model test conducted in a glass wave tank, we measure the wave characteristic parameters in front of and at the back of the semi-permeable caisson breakwater at various wave heights and periods of the wave action. The objective of this project is to investigate the reflectivity of semi-permeable caisson breakwater under different wave conditions, and analyze the relationship between the period of the wave and wave steepness. Furthermore, we probe into the wave dissipation principle and performance of the breakwater. According to the test results, we select the the best combination of permeable rate and slope gradient, which provide a new way of thinking for the conceptual design and planning of wave protection and wave dissipation in the open port.

Keywords: breakwater; wave dissipation effect; semi-permeable caisson; flume experiment

港口码头入港处的防波堤需具有抵抗波浪冲击、维持港内水域静稳、保护港区及陆上结构免于波浪、台风、暴潮等破坏的作用。传统防波堤一般为非透空型沉箱结构, 其结构形式简单, 施工方便, 实践应用较广, 研究历史较长, 在设计 and 施工方面均为较成熟的理论体系与研究成果, 但建造成本较高, 堤前波浪反射率大, 不利于港池内船舶静稳与靠泊。针对上述问题, 近几年国

内外学者提出的新型防波堤形式如透空式, 其利用波浪能量集中于水体表面的特点, 通过上部挡浪板消减波浪能量, 从而达到消波的特点。

对于透空型新型防波堤, 随着实际应用的推广, 其消波机制和构件优化组合方面均取得了长足的进展。YU X. P. 等^[1]研究发现拥有合适开孔率的挡板可以有效抑制波浪之反射率与透射率。严以新等^[2]综述了透空式防波堤的波浪透射率的

收稿日期: 2016-04-26

*基金项目: 福建省大学生创新训练计划 (201510386092); 国家自然科学基金项目 (51579046)

作者简介: 陈宏谔 (1995—), 男, 本科生, 水利水电工程(近海工程)专业。

计算方法,研究多层挡板桩基透空式防波堤的消波机理,结合防波堤断面试验,探讨多层挡板透空式防波堤的消波特性,指出挡板的透空率和设置方式是防波堤消波性能的主要影响因素。王国玉等^[3]提出一种衰减波浪的新型透空式防波堤结构,并通过断面试验分析得出相对宽度(模型宽度与波长的比值)及迎浪侧的开口高度对消波性能有较大影响。Kee等^[4]应用波浪2D线性理论和Darcy's law研究透空型沉箱消波室内装两层或三层略微倾斜或水平的多孔隙板的组合消能过程中,发现适当的没水深度、倾斜角及孔隙率,可以有效地降低长周期波能量。Rageh等^[5]提出一种部分淹没桩基沉箱式防坡堤形式,根据理论与实验研究,发现桩间距较大并减少桩基数量时,能降低反射率并获得较好消能效果的结论。朱大同等^[6]提出由2块开孔板和2个消波室组合的双层开孔板沉箱防波堤,开孔板的开孔率、消波室的宽度与水文参数的优化组合,可有效地降低防波堤的反射系数。周效国等^[7]试验分析了多层直立挡板透空式防波堤的消波性能,并指出挡板的间距布置方式仅对短周期波的消波性能有较大影响。诸裕良等^[8]用RANS方程、有限体积法,建立具有造波-消波功能的数值波浪水槽,模拟高桩挡板透空式防波堤对规则波的消波效果,研究提出堤顶相对宽度、相对水深、相对波高对透浪系数的影响及修正公式。

尽管新型透空型防波堤在生产实际中得到了较为广泛的关注和应用,但其仍存在结构稳定性、安全性和消波效率等方面的问题。为此,本文结合沉箱式与透空式防波堤的形式特点,提出半透空沉箱式防波堤构想。该构想在原有沉箱基本形式上,将沉箱迎浪侧部分区域改为透空消能区,其空间设置为一级消能室(该室中空透水)、二级消能室(该室内置斜板,板上方透水,下方密实),波浪经过不同消能室产生涡流,而且设置的斜坡面使波浪在爬升过程中得以消波。在玻璃水槽中进行系列水工模型试验,研究其消波机制和最佳消波的构件组合方案。

1 物理模型试验

1.1 试验仪器和设备

试验在实验室的小断面水槽进行。断面水槽长28 m、宽0.8 m、高0.8 m,底部基座为高0.6 m的混凝土结构,整体结构由不锈钢和混凝土组成,为了方便记录试验过程,水槽观测段采用不锈钢框架镶嵌上透明强化玻璃,可供观测试验进行中之波浪变化过程并拍照及摄影之用,前后两端为混凝土铺设而成。水槽设置1个位移活塞式造波机,可进行规则波与不规则波试验。

1.2 模型尺寸与配置

模型按重力相似准则设计,结构断面尺寸按几何相似准则设计,采用正态模型。根据水槽尺寸及设备能力,取模型几何比尺为1:36,亦即波高比尺为1:36,周期比尺为1:6,以使其试验与实际现象相符合。模型样图见图1。

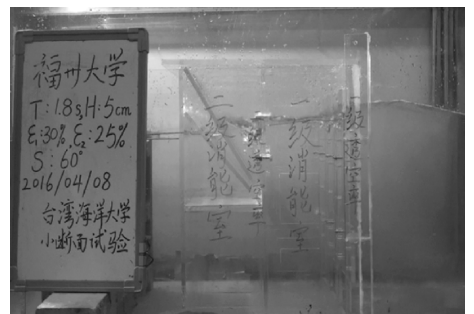
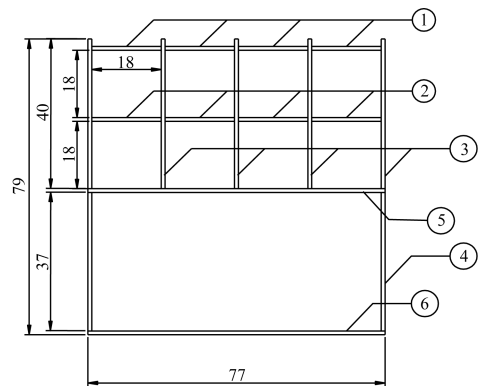


图1 模型样图(单位:cm。下同)

试验模型均由厚度为1 cm的亚克力玻璃板制作。其基本尺寸为:模型宽度77 cm,按1:36的比尺考虑,则对应的原型宽度为27.72 m;模型高度50 cm,其中入水深度40 cm,模型水面以上高度10 cm,可保证模型顶面极少产生越浪。

模型配置藉由改变一级消能室透空率 30%、40%、50%，二级消能室透空率 25%、36%、40%，斜坡坡度为 1:1.73，将一、二级消能室透空率与坡度进行相互配对。

沉箱式防波堤模型放置离造波机 15.8 m 处，

模型高度为 50 cm，宽度为 79 cm，长度与水槽宽度相等，造波机造波使得波浪正向入射，波浪运动方向皆为平地，试验水槽后端设置 1 个不透水消波斜坡，用以消除波浪的反射。断面造波水槽如图 2 所示。

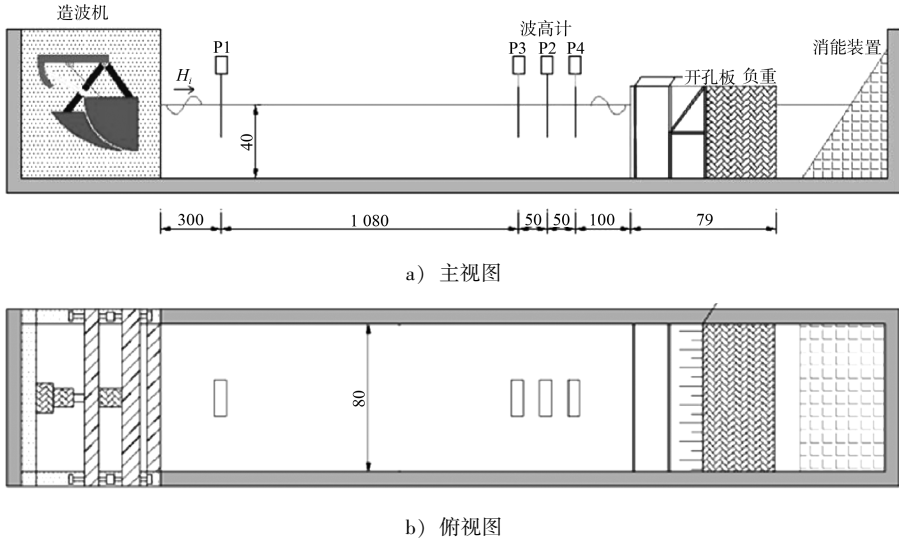


图 2 造波水槽模型

1.3 试验条件

水深设置考虑码头前水深高度为 14.4 m 的码头水深。根据几何相似比尺换算试验水深为 40 cm，水位放置高度至斜坡 1/3 位置；波浪条件模拟现场 6~12 s 周期的波浪，经换算为试验周期为 1~2 s，其对应波长 $1.465 \text{ m} \leq L \leq 3.695 \text{ m}$ ， $0.680 \leq kh \leq 1.716$ 波浪尖锐度 $0.014 \leq H/L \leq 0.034$ ，波速 $1.465 \text{ m/s} \leq c \leq 1.848 \text{ m/s}$ 。其模型试验造得波浪条件如表 1 所示。

表 1 造波试验条件

周期/s	波长/m	kh	H/L
1.0	1.465	1.716	0.034
1.1	1.705	1.474	0.029
1.2	1.935	1.299	0.026
1.3	2.165	1.161	0.023
1.4	2.390	1.052	0.021
1.5	2.615	0.961	0.019
1.6	2.835	0.887	0.018
1.7	3.050	0.824	0.016
1.8	3.265	0.770	0.015
1.9	3.480	0.722	0.014
2.0	3.695	0.680	0.014

注：模型试验条件为水深 0.4 m，波高 0.05 m。

1.4 试验量测仪器设备

作用于消波室结构物的波浪情形与入射波情况，根据 Goda 两点法^[9]，其建议堤前距离 x_1 及两支波高计之间距 Δl 应满足：

$$x_1 \geq 0.1L \tag{1}$$

$$(0.05L)_{\min} \leq \Delta l \leq (0.45L)_{\max} \tag{2}$$

因此，造波机排除 Goda 两点法设置波高计的限制条件后，将各波高计 1#~4# 与水槽内部结构物相关位置进行规划，其中入射波量测波高计 1# 距离模型约 13.3 m，反射率量测波高计 2#~4# 相邻间距均为 0.5 m，而 4# 波高计距离结构物为 1 m。

1.5 试验配置与流程

本试验中包含空水槽试验与针对不同一、二级消能室透空率与斜坡坡度的配对，共有 19 组不同的配置，每次配置进行周期 T 在 1~2 s 波浪条件试验，每个波浪条件试验 3 次。

试验流程依照下列步骤进行：

- 1) 波高计之率定并将其设置于预定位置；
- 2) 于断面水槽中布置试验配置，并予以固定；
- 3) 选定造波条件的周期与振幅进行造波，以

资料量测系统进行水位变化记录，并将结果储存，试验过程中于观测窗观测并拍照摄影；

- 4) 改变波浪条件重复步骤 3)，至所有波浪条件完成试验；
- 5) 更改试验配置重复步骤 2) 至步骤 4)；
- 6) 结果分析。

2 结果分析与讨论

2.1 试验分析参数

码头结构附近流场、波浪场现象复杂，较易评估的是码头前面的反射率，依目前的讨论，影响结构物前反射率的主要参数如下：

$$K_r : f(h, T, L, H, \tan\theta, \varepsilon_1, \varepsilon_2) \quad (3)$$

式中： h 为水深； T 为周期； L 为波长； H 为波高； $\tan\theta$ 为斜坡的坡度； ε_1 为一级消能室的透空率； ε_2 为二级消能室的透空率。

试验中首先针对最基本的参数(一级消能室的透空率、二级消能室的透空率与及斜坡坡度)进行讨论，即考虑光滑不透水斜坡表面、固定水深、波高，改变周期、斜坡坡度与一二级消能室的透空率三项参数，来探讨相互之影响与关系，以了解模型配置的特性是否能达到消波效果。

2.2 分析方法与结果

试验中改变结构物之一、二级消能室透空率及斜坡坡度，通过试验得到的试验资料来检验当受到入射波浪作用时的结构消波性能。利用波高量测截取系统所获资料，将各波高计整理并进行初步归零处理与原始时间序列图之绘制，用以判断试验量测的资料是否正确，接着将整理后的波高计资料截取波浪作用稳定段进行反射率分析，利用 Goda 两点法分析波浪反射率，并将其结果绘图以利于比较。此外，通过计算得到能量损失 K_L 。

试验模型迎浪侧放置全密实挡板，以等水深进行全反射试验，主要为了解断面造波水槽的造波特性与造波能力，以及确定为量测反射率而设置的波高计适当位置，并以量测的资料作为后续试验的对照组资料。

2.3 波高与试验配置的影响

试验设定斜坡坡度 60° ，一级消能室透空率 40% 。在二级消能室透空率 25% 、 36% 与 40% 情况下，改变入射波高分别为 4 、 5 及 7 cm，得到周期 T 与反射率 K_r 的对应关系(图 3)。

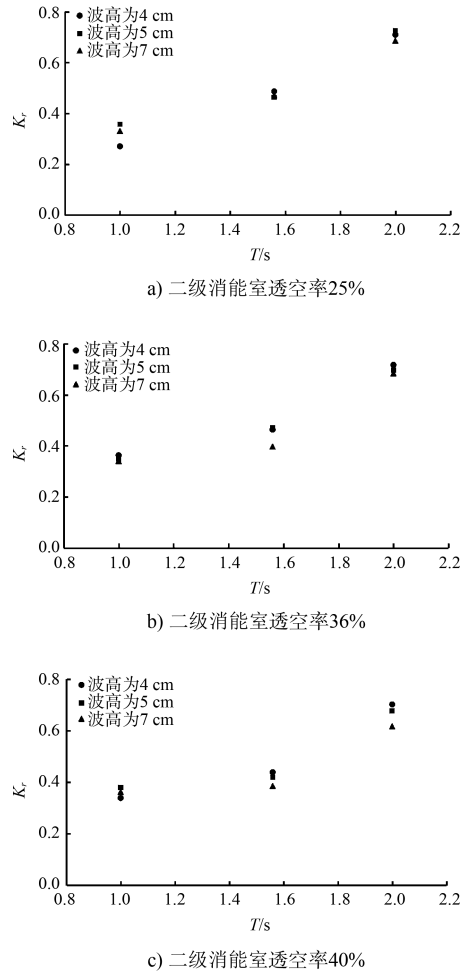


图 3 周期 T 与反射率 K_r 的对应关系

由图 3 可得，对应不同的二级消能室透空率，反射率 K_r 随着周期的增大均呈上升趋势，但波高的改变对于反射率 K_r 的影响很小，可以忽略不计。因此，后续试验控制波高 5 cm。

2.4 固定斜坡坡度的波浪条件与一、二级消能室透空率比较

固定入射波高 5 cm，斜坡坡度 60° ，分别改变一级消能室透空率 30% 、 40% 、 50% ，二级消能室透空率 25% 、 36% 、 40% ，以排列组合的方式进行试验，得到无量纲的 kh 与反射率 K_r 及能量损失 K_L 的变化关系(图 4)。

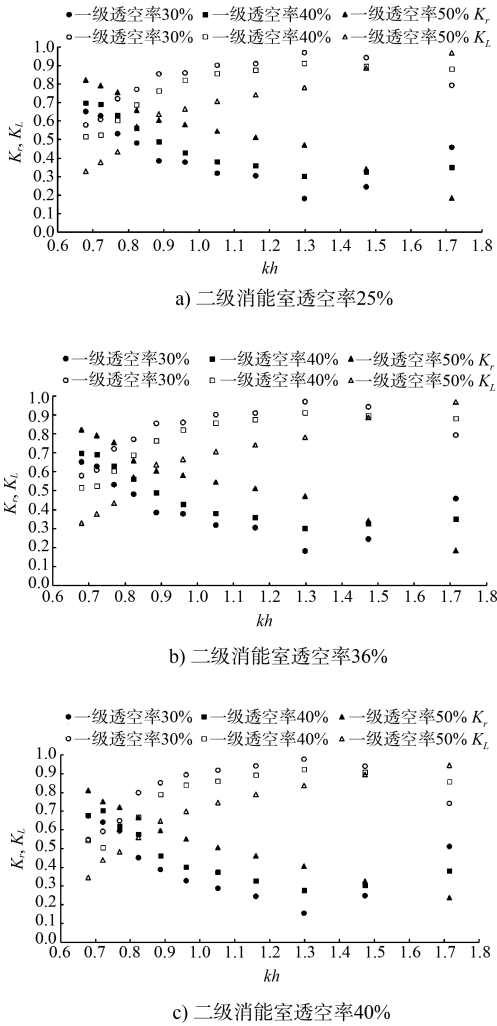


图 4 kh 与反射率 K_r 及能量损失 K_t 的变化关系 (固定斜坡坡度)

由图 4 可知: 当一级透空率为 50% 时, 反射率随着 kh 的增大而减小, 大体呈线性关系; 当一级透空率为 30% 或 40% 时, 反射率随着 kh 的递增, 先减小后增大, 约在 $kh=1.3$ 时达到最小。在二级透空率不变的情况下, 当 $kh < 1.5$ 时, 反射率随着一级消能室透空率的减小而减小, 且一级透空率为 30% 时, 反射率 K_r 最小, 能量损失 K_t 最大; 当 $kh > 1.5$ 时, 反射率随着一级消能室透空率的减小而增大, 即一级消能室透空率为 50% 时, 反射率 K_r 最小, 能量损失 K_t 最大。

2.5 一、二级消能室透空率之波浪条件与斜坡坡度比较

控制入射波高为 5 cm, 二级消能室透空率为 25%, 改变一级消能室透空率分别为 50% 与 30%

及斜坡坡度 60° 与 45° , 得到无量纲的 kh 与反射率 K_r 及能量损失 K_t 的变化关系 (图 5)。

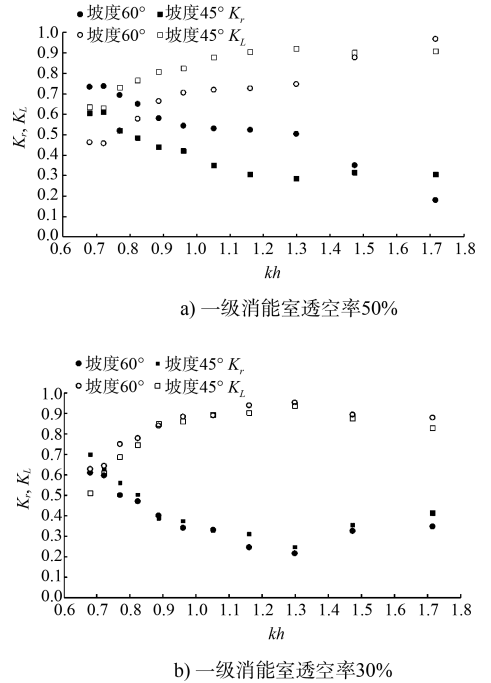


图 5 kh 与反射率 K_r 及能量损失 K_t 的变化关系 (斜坡坡度变化)

由图 5 可知: 在一级消能室透空率为 50% 的情况下, 斜坡坡度对于反射率 K_r 的影响差别较大; kh 相同时, 反射率数值差距最大可达 0.2。当坡度为 60° 时, 反射率 K_r 随着 kh 的增大而减小, K_r 在 0.20~0.72; 当坡度为 45° 时, 反射率 K_r 随着 kh 递增, 先减小后增大, K_r 在 0.31~0.61。而当一级消能室透空率为 30% 时, 斜坡坡度对于反射率 K_r 影响较小, 数值较为接近, 相差基本为 0.02 左右, 反射率 K_r 随 kh 递增, 先减小后增大, K_r 在 0.35~0.70。

3 结语

1) 半透空沉箱式防波堤作为一种新型的沉箱式防波堤, 适用于波浪条件不好的地域, 其设计合理的双层透空率与斜坡结构具有良好的消波效果。

2) 一级透空率、二级透空率与坡度是影响防波堤消波效果的主要因素, 其各个因素互有关联, 在本文中依据大量试验研究, 得到一些变化规律。

3) 一级消能室透空率对反射率 K_r 的影响较二级消能室透空率更为显著。当试验一级透空率为 30% 和 40% 时, 在 $kh = 1.3$ 时, 反射率 K_r 达到最小, 能量损失 K_L 最大。

4) 斜坡坡度对反射率 K_r 的影响与一级消能室透空率有较大关系, 当一级消能室透空率较大时, 斜坡坡度能发挥其功用, 且坡度越小, 消波性能越好。

试验设置的结构装置在稳定性方面避免了波浪浮托力对沉箱的影响, 利用一级消能室和二级消能室来对波浪进行消波, 最小反射率可达 0.15, 消波效果明显。

因试验条件限制, 目前试验工况均在规则波、不规则波及长周期波浪等不同波浪工况下, 装置的消波效能, 有待研究。值得一提的是, 本试验模型的一级消能室内部为空置状态, 若放置消波块(人工异形体)等孔隙块石, 利用其孔隙来消减波浪能量的想法或可供今后研究参考。

参考文献:

[1] YU X P, CHWANG A T. Water waves above submerged porous plate[J]. Journal of engineering mechanics, 1994, 120(6): 1 270-1 282.

[2] 严以新, 郑金海, 曾小川, 等. 多层挡板桩基透空式防波堤消浪消波特性试验研究[J]. 海洋工程, 1998, 16(1): 67-74.

[3] 王国玉, 王永学. 新型透空式防波堤结构试验研究[J]. 中国造船, 2003, 44: 350-358.

[4] KEE S T, LEE S H, KO J S. Submerged porous plate wave absorber[C]//Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2006: 626-631.

[5] RAGEH O S, KORAIM A S, SALEM T N. Hydrodynamic efficiency of partially immersed caissons supported on piles[J]. Ocean engineering, 2009, 36: 1 112-1 118.

[6] 朱大同. 双层开孔板沉箱防波堤的水动力学特征的非线性分析[J]. 船舶力学, 2013, 17: 64-74.

[7] 周效国, 李雨, 江沐淮, 等. 多层直立开孔挡板透空式防波堤消浪消波性能试验研究[J]. 水运工程, 2014(1): 31-35.

[8] 诸裕良, 李雨, 陈德春, 等. 高桩挡板透空式防波堤消浪消波性能数值研究[J]. 海洋工程, 2015, 33(4): 53-62.

[9] GODA Y, SUZUKI Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments [C]//Proceedings of 15th International Conference on Coastal Engineering, Hawaii: 1976 .

(本文编辑 郭雪珍)



· 消 息 ·

中国交建 2016 年度重大工程 (产品)

1. 南京纬三路过江隧道。
2. 云南龙江特大桥。
3. 贵黔高速鸭池河大桥。
4. 鹤大高速公路。
5. 毕都高速北盘江大桥。
6. 京新高速临白段。
7. 大连湾海底隧道和光明路延伸工程 PPP 项目。
8. 香港机场第三跑道工程。
9. 亚洲最大耙吸挖泥船“浚洋 1 号”。
10. 美国长滩市自动化码头设备。

http://en.ccccltd.cn/ccccltd/news/jcxw/zhxw/201612/t20161229_87177.html (2016-12-29)