



# 浮式防波堤结构的研究现状

符如旭<sup>1</sup>, 毛继泽<sup>1</sup>, 殷万杰<sup>2</sup>, 许元兵<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 大庆油田信息技术公司基建工程部 黑龙江 大庆 163000)

**摘要:** 浮式防波堤作为海洋工程中一类重要的防波堤结构, 具有优异的经济性和生态环保性。首先概述了海洋浮式防波堤的发展过程, 总结了国内外关于浮式防波堤的最新研究成果, 简要介绍了浮式防波堤结构形式的试验研究和数值模拟研究, 并根据浮式防波堤下部是否设置阻尼结构划分为箱板式和板阻式两种结构形式, 重点探讨了目前研究存在的问题和不足, 并从耐久性、设计标准规范与新材料等方面对未来浮式防波堤结构的发展和研究方向做出了展望。

**关键词:** 浮式防波堤; 结构形式; 箱板式; 板阻式; 数值模型

中图分类号: U 656. 2<sup>+</sup>4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)06-0061-06

## Research status of floating breakwater structure

FU Ru-xu<sup>1</sup>, MAO Ji-ze<sup>1</sup>, YIN Wan-jie<sup>2</sup>, XU Yuan-bing<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Infrastructure Division, Daqing Oilfield Information Technology Company, Daqing 163000, China)

**Abstract:** The floating breakwater is a kind of important structure in ocean engineering, which is economical and environmentally friendly. This paper expounds firstly the development process of the marine floating breakwater, then summarizes the latest research results of floating breakwater at home and abroad, and demonstrates the experimental research and numerical simulation of the structure type of floating breakwater. According to the lower part of the floating breakwater with or without damping structures, the structure is divided into two types, i. e. box-plate type and plate-resistance type. This paper mainly discusses the problems and shortcomings of the present research, and makes a prospect for the future research direction of floating breakwater structure from the aspects of durability, design standards and new materials, etc.

**Keywords:** floating breakwater; structural type; box-plate type; plate-resistance type; numerical model

防波堤是一种常见的海岸工程结构, 主要用于保护海岸工程结构和海港中的船舶。传统防波堤底部固定, 随着海洋开发逐渐向深海延伸, 传统防波堤建设成本高、建造困难等问题日益突出。因此, 浮式防波堤成为港口建设项目的关键技术之一。

浮式防波堤(floating breakwater, 简称FB)通常由金属、钢筋混凝土和塑料等材料制造的消波浮体及锚泊系统组成。消波浮体是由有一定吃水深

度的箱体或浮排组成, 与一端固定在海底的锚链相连而漂浮在水面上。与传统固定式防波堤相比主要优点有: 1) 低成本修建, 不受海底地质条件和水深的影响; 2) 运输方便, 修建迅速, 拆迁容易; 3) 在结构下方能够进行水循环、生物交换、泥沙流动, 具有生态优势。

世界上第一个浮式防波堤当属1811年在英国Plymouth港安放的木质浮式防波堤。1944年二战期间英国军队在著名的法国诺曼底登陆就是借助

收稿日期: 2016-01-20

作者简介: 符如旭(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海洋浮式结构。

于由沉船和沉箱构成的名为 Bombardon 的浮式防波堤, 这个浮式防波堤从设计、试验到建成只用了很短的时间。日本的第一个浮式防波堤于 1930 年安放在 Aomori 港, 用于试验其抵御波浪及消波性能。1976 年日本在福山建成一道矩型箱式浮堤, 由 4 节浮箱组成, 每个浮箱设置 6 个锚。荷兰的 FDN Engineering 公司设计了名为 Mega 的浮式防波堤, 该防波堤建造在希腊的 Messolonghi 港, 主要用作游艇码头; 在苏格兰海上某采油平台施工过程中, 为了防护架设输送混凝土管道的浮桥不受波浪破坏, 用 28 d 时间建造了一座浮式防波堤, 安装后经使用, 发现这种防波堤能抵御 2 m 波高的波浪, 通过防波堤的波高减少了约 75%。

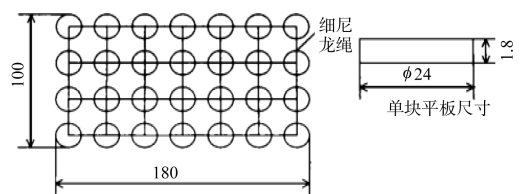
在国内, 南京水利水电科学研究院于 1962 年研制并用于丹江口水库的浮式导航防波堤, 分为两段, 使用钢筋混凝土浮箱; 2002 年在连云港港口棋台山海域经过 40 d 的施工建成了沿海第一条浮式防波堤, 虽然只有 1 km 长, 但为我国建设同类防波堤、多方式开发海洋资源提供了宝贵的科研设计、施工经验。由此可见, 浮式防波堤的应用前景十分广阔。

Hales<sup>[1]</sup> 和 McCartney<sup>[2]</sup> 全面综述各种浮式防波堤的概念, 并评估其性能和适用性。此后, 学者们提出了更多新颖的浮动防波堤结构形式, 进而获得了更好的消浪性能。王永学等<sup>[3]</sup> 综述了近岸浮式防波堤结构的研究进展与工程应用, 讨论了浮箱式、浮筒式、浮筏式等类型的浮式防波堤结构的消浪性能、波浪反射与透射系数的计算方法, 分析了相对宽度、相对水深、波陡等参数对浮式防波堤结构透射系数的影响, 指出了限制浮式防波堤结构实际工程应用的主要困难, 但对浮式防波堤的锚泊系统论述较少。李芬等<sup>[4]</sup> 综述了浮式海洋结构物研究现状及发展趋势, 对浮式海洋结构物的发展历程进行了回顾, 介绍浮式生产储运装置、半潜式平台、张力腿平台、独柱式平台和超大型海洋浮式结构物的主要结构形式、特点及发展现状。但对浮式防波堤研究论述较少。本文对国内外关于浮式防波堤结构形式的试验和理论

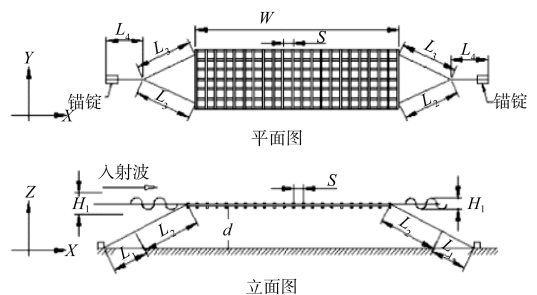
研究以及数值模型分析进行了文献综述, 指出目前研究中存在的问题和不足, 并对未来的研究趋势进行了展望。

## 1 浮式防波堤结构形式的试验研究

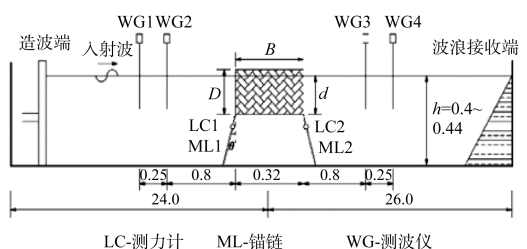
王永学等根据消浪机理的不同, 将浮式防波堤分为以下 3 种结构形式: 反射型结构、反射和波浪破碎型结构以及摩擦型结构。研究发现, 在典型的浮箱或浮筒式防波堤下部设置网衣、网笼等阻尼结构可起到破碎波浪的作用。本文根据浮式防波堤下部是否设置阻尼结构分为箱板式和板阻式两种结构形式。箱板式浮式防波堤主要靠反射和摩擦减小透射波, 常见的断面形状为矩形(图 1)。板阻式浮式防波堤上部的浮箱板或浮筒结构具有反射波浪作用, 下部的阻尼结构具有破碎波浪的功能, 通过波浪反射、谐振和波浪破碎来减小透射波, 且对长周期波浪有较好的衰减性能(图 2)。



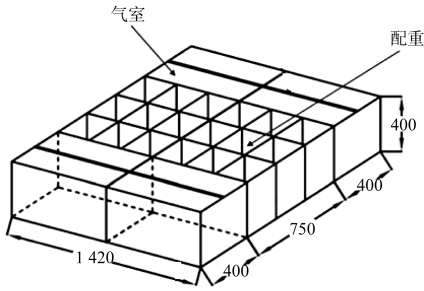
a) 浮漂式结构(单位: cm)



b) 浮管式结构

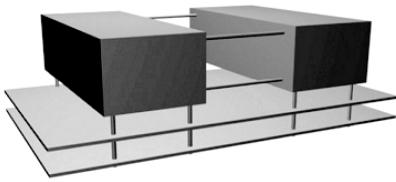


c) 多孔透水组合结构(单位: m)

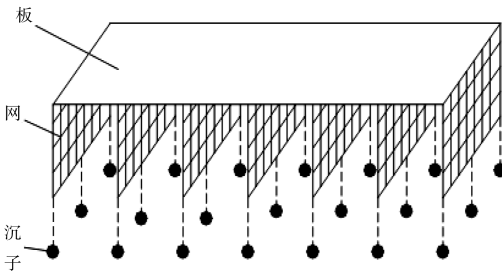


d) 带气室的箱体结构(单位: mm)

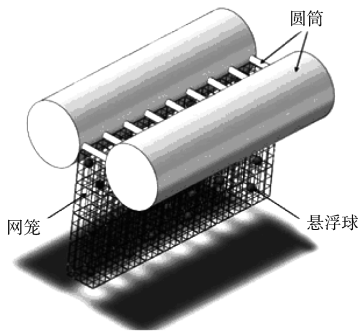
图 1 箱板式浮式防波堤



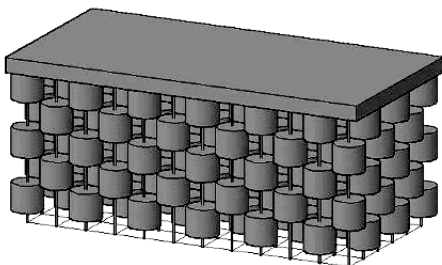
a) 浮箱-水平板结构



b) 板-网结构



c) 浮筒-网笼结构



d) 板-帘结构

图 2 板阻式浮式防波堤

### 1.1 箱板式浮式防波堤

Hales 指出, 一个浮式防波堤应简单、耐用、易于维护。因此, 箱板式浮式防波堤可能最满足这些要求。在一些文献中, 对于一个具有矩形横截面的自由或系泊的箱板式浮式防波堤进行了广泛的理论、试验和数值模拟研究。

吴静萍等<sup>[5]</sup>构思了一种“浮漂”式浮堤结构, 模型由 4 排 7 列共 28 块圆形木板纵横连接而成(图 1 a))。Hegde 等<sup>[6]</sup>提出了一种由多层圆管纵横交错构成的浮管式防波堤结构, 并对其透射系数和锚链受力进行了试验研究(图 1b))。Wang 等<sup>[7]</sup>指出菱形块组装多孔透水浮式防波堤具有消能减震作用, 且共振现象并不突出, 与传统的浮式防波堤相比系缆力较低(图 1c))。蒋昌波等<sup>[8]</sup>提出透空箱体浮式防波堤这种特殊结构, 在浮式防波堤内部设左、右对称的配重箱, 配重箱迎水面及背水面均采用圆弧型导流结构, 兼具双层水平板式防波堤和浮箱式防波堤的特点, 能够调节防波堤的入水深度, 并有效地节约材料。He 等<sup>[9]</sup>提出一种两侧带有气室的矩形浮式防波堤不但具有消浪性能, 还可以利用气室内的气压变化, 通过安装并涡轮机室, 将波浪能转换为电能(图 1d))。Uzaki 等<sup>[10]</sup>提出一种由箱式浮筒和桁架结构组成的桁架结构浮式防波堤, 桁架结构附着在浮筒的前方和后方, 通过波浪的破碎耗散波能。

### 1.2 板阻式浮式防波堤

单纯的箱板式结构消浪效果较差, 且在波浪作用下运动比较强烈, 所以许多研究人员均在箱板结构的基础上进行改进, 提出了多种具有更好消浪性能和水动力特性的新型浮式防波堤结构——板阻式浮式防波堤。

董华洋<sup>[11]</sup>和杨彪等<sup>[12]</sup>对单浮箱-水平板式防波堤与双浮箱-双水平板式浮式防波堤进行试验研究表明, 与浮箱结构相比, 浮箱-双水平板式浮堤结构对波浪的反射作用和波能耗散作用明显加强, 使其对长周期波浪具有更好的消浪效果。同时, 浮堤结构的稳定性明显提高, 但锚链受力会有所



增大(图 2a))。董国海等<sup>[13]</sup>提出了板-网式浮堤结构,试验结果表明堤宽对消浪性能有显著影响,堤宽越大消浪效果越好。平板下部加上网衣可以提高浮堤的消浪性能,增强平板的刚性可以明显提高浮堤的消浪效果(图 2b))。Ji 等<sup>[14]</sup>提出了圆筒型防波堤,主体是刚性圆柱体,下部有一个灵活的网格笼子里包含大量的悬浮球,用来吸收波浪能(图 2c))。Shih 等<sup>[15]</sup>对小孔高透水性密集管道的倾斜管式防波堤的消波效果进行试验研究,讨论了不同波浪条件和管径、长度的不同组合对透水管堤试验的影响。Wang 等<sup>[16]</sup>介绍了新窗帘式柔性浮式防波堤的消波效果与 3D 水池试验,并分析了上部平板的存在对消浪效果的影响(图 2d))。

总体来看,目前国内外关于浮式防波堤的结构形式的研究成果很多,通过缩比模型试验研究浮式防波堤的性能,试验表明堤宽对消浪性能有显著影响,堤宽越大消浪效果越好。基于浮式防波堤的消波机理提出了很多的结构形式,但研究方向主要集中在消波性能上,而对浮堤运动特性和锚链受力特性的研究成果相对较少。

## 2 浮式防波堤的理论研究与数值模型分析

目前,对浮式防波堤的理论研究主要集中在建立防波堤与波浪相互作用的数值计算模型,分析规则波作用下防波堤的消波性能。采用理论研究与数值模型分析可以简化浮式防波堤的整体性能研究,对防波堤的消浪性能进行较好的预测。但模型和结果的正确性需要通过试验的验证。此外,理论分析便于进行大量参数研究,从而可以得到影响浮式防波堤消波性能的主要参数,进而改进浮式防波堤的设计方法。

透射系数  $K_t$  和反射系数  $K_r$  是用来表示浮式防波堤消波性能的重要指标,其定义如下:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (1)$$

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (2)$$

式中:  $H_t$ 、 $H_r$ 、 $H_i$  分别表示透射波高、反射波高、入射波高。

目前,国内外学者对浮式防波堤的理论研究主要有以下一些研究方法和成果:严建国等<sup>[17]</sup>采用特征函数法建立矩形浮箱式与波浪相互作用的数值计算模型,计算结构的运动响应和透射系数等,分析规则波作用下浮箱式防波堤的消浪性能。Gesraha 等<sup>[18]</sup>和 Koraim 等<sup>[19]</sup>基于特征函数展开法的数学模型,对  $\Pi$  型浮式防波堤和由两排桩悬浮的半沉浸式沉箱结构进行数模研究,该数学模型对波传输、反射和能量耗散提供了一个很好的预测。Huang<sup>[20]</sup>用有限元法求解水波与二维或三维海洋结构的干涉问题,对不同波浪周期的附加质量、阻尼系数和波浪力进行了讨论。Weng 等<sup>[21]</sup>利用边界积分方程法对双浮箱式防波堤进行研究,分析了浮箱间距、浮堤吃水深度和锚链刚度等因素对防波堤运动响应特性的影响,研究结果表明,数值计算结果与试验结果吻合较好,浮箱间距对浮堤运动响应的影响非常明显。高鑫等<sup>[22]</sup>采用边界单元法对板式浮筒型新型浮式防波堤水动力特性进行研究,分析了浮堤反射系数和透射系数与平板、浮筒间距及浮筒厚度之间的关系,研究结果表明,水下平板浮筒型浮堤对中波的消浪效果较好,且平板与浮筒的间距及浮筒的厚度对浮堤的反射系数和透射系数影响不大。Lee 等<sup>[23]</sup>和 Syed 等<sup>[24]</sup>采用边界元法对单浮箱式、双浮箱式和三浮箱式防波堤的消浪性能、运动特性和锚链受力进行了数值模型研究,结果表明,浮堤的垂荡运动和浮筒间距对波浪透射系数影响显著,同时浮堤的吃水越深消浪效果越好。Kao 等<sup>[25]</sup>使用边界元法模拟波场,创建线性代数系统,用数值的方法来解决波浪和浮式防波堤的三维交互问题。董华洋<sup>[11]</sup>基于线性时域理论,并结合牛顿第二定律和悬链线方法建立了销链锚泊单浮箱水平板浮式防波堤的数值计算模型,利用该模型对浮式防波堤的水动力特性进行计算,通过与试验结果比较发现,该数值模型可以较好地预测防波堤的透

射系数、运动响应和销链受力。Williams等<sup>[26-27]</sup>基于二维势流理论,采用频域方法对单浮箱和双浮箱式浮防波堤的反射系数进行研究,结果表明浮箱式防波堤的结构参数对波浪反射系数的影响非常明显。宋宪仓等<sup>[28]</sup>利用Flow 3D软件对5种典型的浮式防波堤结构(方箱型、Π型、方箱-水平板型、Y型和A-frame型)进行消波性能的数值分析研究,研究表明,不同的结构形式对消波效果影响很大,Y型浮堤结构消波效果最好,方箱型最差,其他3种介于两者之间。

由于浮式防波堤衰减波能的过程十分复杂,对于掌握其消浪效果的规律性非常困难,多数情况只能通过物理模型试验进行研究,并采用多个假定,试验研究成果仅适用于特定形式和尺寸的浮式防波堤结构。采用数学模型对波传输、反射和能量耗散与试验结果进行比较,目前尚未总结出通用性较强的计算透射系数的经验公式。目前,浮式防波堤的理论研究目标有:1)建立一个简单的数学模型,评估所建议结构的波传输,反射和能量耗散特性;2)试验研究不同波浪和结构参数的相同特性。

### 3 结语

1) 衰减长周期波浪的浮式防波堤结构。目前的浮式防波堤结构形式对短波(波长与堤宽之比 $L/B < 4$ )的掩护效果尚好,但对长波( $L/B > 6$ )的透过率仍然很高。堤宽对消浪性能有显著影响,堤宽越大消浪效果越好。但如果增加防波堤宽度,则会导致经济性降低,且不易在工程中实现。

2) 锚泊系统、浮式防波堤和波浪的耦合作用。目前的浮式防波堤研究多集中于消浪效果试验研究或锚系力的受力分析,但在改进浮式防波堤的结构形式时如何减小锚系张力、减少系泊线的摆动效应、对锚泊系统和浮式防波堤及波浪的耦合作用等研究较缺乏。

3) 浮式防波堤的设计方法和设计规范。浮式防波堤由于结构形式的不同,其消波性能有较大

的差异,不能简单采用传统防波堤的设计方法进行分析设计。目前国内外还没有关于浮式防波堤的设计规范,对浮式防波堤透射系数的选取也不统一。因此,需要从理论上完善其设计方法,并提出设计标准或规范。

4) 浮式防波堤在实际海洋环境下的耐久性。浮式防波堤通常由金属、钢筋混凝土或塑料等材料制造,在高温、高湿、高盐的海洋环境中的长期耐久性问题需要深入研究。

5) 新材料在浮式防波堤中的运用。目前浮式防波堤在海洋腐蚀环境中的日常维护较为困难,如何从材料角度创新改进浮式防波堤的结构形式也是有待继续深入的课题。

因此,寻求结构形式合理、消浪效果良好且可靠度高的浮式防波堤结构具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] Hales L Z. Floating breakwaters: State-of-the-art literature review [R]. Vicksburg, Mississippi, USA: US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981.
- [2] Bruce L McCartney. Floating breakwater design[J]. Journal of Waterway Coastal and Ocean Engineering, 1985, 111(2): 304-318.
- [3] 王永学, 王国玉. 近岸浮式防波堤结构的研究进展与工程应用[J]. 中国造船, 2002, 43(S1): 314-321.
- [4] 李芬, 邹早建. 浮式海洋结构物研究、现状及发展趋势[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2003, 27(5): 682-686.
- [5] 吴静萍, 王仁康, 郑晓伟, 等. 浮漂式防波堤的试验研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2001, 25(1): 91-93.
- [6] Hegde A V, Kamath K, Deepak J C. Mooring forces in horizontal interlaced moored floating pipe breakwater with three layers[J]. Ocean Engineering, 2008, 35(1): 165-171.
- [7] Wang H Y, Sun Z C. Experimental study of a porous floating breakwater [J]. Ocean Engineering, 2010, 37: 520-527.
- [8] 蒋昌波, 袁盛良, 刘璟, 等. 透空箱体浮式防波堤消浪特

性实验研究[J].交通科学与工程,2012,28(1):56-61.

[9] He Fang, Huang Zhen-hua, Law W K. Hydrodynamic performance of a rectangular floating breakwater with and without pneumatic chambers: An experimental study[J]. Ocean Engineering, 2012, 51: 16-27.

[10] Uzaki K-i, Ikehata Y, Matsunaga. Performance of the wave energy dissipation of a floating breakwater with truss structures and the quantification of transmission coefficients.[J].Coastal Res, 2011, 27 (4): 687-697.

[11] 董华洋.浮箱-水平板式防波堤水动力特性研究[D].大连:大连理工大学,2009.

[12] 杨彪,陈智杰,王国玉,等.双浮箱-双水平板式浮式防波堤试验研究[J].水动力学研究与进展: A 辑, 2014, 29(1): 40-49.

[13] 董国海,郑艳娜,李玉成,等.板-网结构浮式防波堤消浪性能的试验研究[J].工程力学, 2006, 23 (7): 142-146.

[14] Ji Chun-Yan, Chen Xiang, Cui Jie, et al. Experimental study of a new type of floating breakwater [J]. Ocean Engineering, 2015, 105: 295-303.

[15] Shih Ruey-Syan, Weng Wen-Kai, Chou Chung-Ren. The performance characteristics of inclined highly previous pipe breakwaters [J]. Ocean Engineering, 2015, 100: 54-66.

[16] Wang Hong, Xu Hongbin, Liu Peng, et al .Experimental study on the dissipation characteristics of curtain-type flexible floating breakwater[J]. Journal of Coastal Research, 2015, 73: 410-414.

[17] 严建国,戴小平,孙芦忠.矩形浮箱式防浪堤消浪特性分析[J].解放军理工大学学报: 自然学版, 2005, 6(1): 67-70.

[18] Gesraha M R. Analysis of  $\Pi$  shaped floating breakwater in oblique waves[J]. Appl Ocean Res, 2006, 28(5): 327-338.

[19] A S Koraim. Mathematical study for analyzing caisson breakwater supported by two rows of piles [J]. Ocean Engineering, 2015, 104: 89-106.

[20] Huang M C. Finite element analysis of wave interference effects between large structures [D]. USA: Oregon State University, 1983.

[21] Weng W K, Chou C R . Analysis of responses of floating dual pontoon structure [J]. China Ocean Eng, 2007, 21(1): 91-104.

[22] 高鑫,贺大川,王科.水下板式浮筒型防波堤反射系数与透射系数研究[C]//第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集,大连:[s.n.], 2013: 738-743.

[23] Lee J, Cho W. Effects of mean wave drift force on mooring tension and performance of a moored floating breakwater[J]. Journal of Civil Engineering, 2002, 6(2): 193-201.

[24] Syed S A, Mani J S. Performance of multiple pontoons floating breakwater a numerical approach[C]. Baltimore, Maryland, USA: Civil Engineering in the Oceans VI, 2006: 342-355.

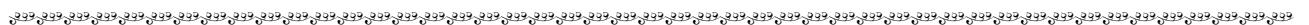
[25] Kao J H, Lee J F, Cheng Y C. A direct coupling numerical method for solving three-dimensional interaction problems of wave and floating structures [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2015, 55: 10-27.

[26] Williams A N, Abul-Azm A G. Dual pontoon floating breakwater[J]. Ocean Eng, 1997, 24 (5): 465-478.

[27] Williams A N, Lee H S, Huang Z. Floating pontoon breakwaters[J]. Ocean Engineering, 2000, 27: 221-240.

[28] 宋宪仓,王树青.几种浮式防波堤消浪性能数值分析[C]//中国海洋学会 2013 年学术年会,上海:[s.n.], 2013: 163-171.

( 本文编辑 武亚庆)



### 著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。