



# 浮式防波堤研究进展\*

栾英妮, 陈汉宝

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 港口水工建筑技术国家工程实验室, 天津 300456)

**摘要:** 浮式防波堤具有环保、经济和可移动的优点, 但可靠性、消浪效果的制约同时存在, 大部分研究集中在使其具有更好的消浪性能上。以单体型、双体型、柔性结构、上浮式和其他形式的浮式防波堤为主线总结其研究成果、手段及进展, 归纳物理模型和数值模拟的手段研究各种浮式防波堤的水动力特性, 并给出实际工程的案例, 可为浮式防波堤的进一步研究探索提供指引。

**关键词:** 浮式防波堤; 研究进展; 结构; 水动力

**中图分类号:** U 656.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2021)03-0064-06

## Research progress of floating breakwater

LUAN Ying-ni, CHEN Han-bao

(National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology,

Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** Floating breakwater has the advantages of environmental protection, economy, and mobility, and the constraints of reliability and wave dissipation effect exist at the same time. Many types of research focus on improving its better wave dissipation performance. We take single, double, flexible, floating, and other types of floating breakwater as the principal line, summarize the research achievements, means, and progress of floating breakwater, induce the hydrodynamic characteristics of various types of floating breakwaters using physical model test and numerical simulation, and give the practical engineering cases, which can guide further research and exploration of floating breakwater.

**Keywords:** floating breakwater; research progress; structure; hydrodynamic

在海岸工程中, 为在消浪的基础上减少对环境水动力的影响, 浮式防波堤作为透水建筑物具有经济、可移动和安装便捷等特性, 一直是防浪减浪建筑物研究的热点。在寻求更高效的消能结构的同时还要保证结构的安全, 很少能做到综合考虑, 当前以消能研究居多。

本文将浮式防波堤分为单体、双体和柔性3大类, 通过分析不同结构形式浮式防波堤的消浪特性及关键影响因素, 总结出研究的发展方向, 对

国内的相关研究进行综述, 并对创新结构如日本独立研究和示范的上浮式防波堤等进行介绍。当前浮式防波堤的结构方式推陈出新, 但应用案例相对很少, 对结构安全和经济的分析不足是其发展的主要制约条件。

### 1 单体型浮式防波堤结构及其研究进展

浮式防波堤的消浪机理包括反射、紊动耗散和能量转化等, 单体型浮式防波堤多是通过结构

收稿日期: 2020-06-14

\*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目 (TKS160107)

作者简介: 栾英妮 (1986—), 女, 硕士, 助理研究员, 从事海岸工程研究。

通讯作者: 陈汉宝 (1971—), 男, 博士, 研究员, 从事水运工程研究。E-mail: chenhanbao@163.com。

的变化实现消浪性能的改进。刘庆凯等<sup>[1]</sup>通过试验研究悬链式单浮箱防波堤相对吃水、相对宽度、锚链刚度、锚链系泊倾角等因素改变时浮堤的透射系数和锚链上最大拉力的变化规律。张昊等<sup>[2]</sup>通过数值求解箱型浮式防波堤的绕射和辐射问题,表明重心位置对箱型浮堤消波性能的影响很小,增加锚链预张力可减小长波透射系数,反而会使短波透射系数增大。

董华洋等<sup>[3]</sup>的研究表明,浮箱式浮防波堤的锚链刚度系数、锚链相对拖地系数和相对宽度对模型的锚链受力影响最为明显。刘韬等<sup>[4]</sup>的研究表明,与锚链锚固时相比,垂直导桩锚固时单箱式浮堤的波浪反射和波能损耗均明显增强,波浪透射系数明显减小。董华洋等<sup>[5]</sup>通过研究,得到矩形箱式浮防波堤锚链相对拖地系数为0的透射系数在0.38~0.87,消波效果理想,受力较大。

何超勇等<sup>[6]</sup>通过试验,得到增大矩形方箱的宽度和吃水深度、增加锚链的初始张力可以减小透射系数。侯勇等<sup>[7]</sup>通过试验研究矩形浮式防波堤采用4条锚链与地基连接的结构相对堤宽、相对波高、相对水深等对波浪透射系数的影响。郑艳娜等<sup>[8]</sup>通过数值模拟,得到单位宽度方箱垂向受力最大值大于水平受力最大值。任慧龙等<sup>[9]</sup>通过数值模拟单箱浮式防波堤不规则波作用下浮体锚链耦合模型,得到最优的锚泊系统。侯勇等<sup>[10]</sup>通过试验,得出由开孔圆弧、矩形方箱和锚链系统组成的新型浮式防波堤结构的消浪性能、运动和锚链受力等水动力特性与相对宽度、相对吃水等因素之间的关系。杨会利等<sup>[11]</sup>通过试验研究三筒组合浮式防波堤的运动量和锚链力与相对宽度、波高及水深等影响因素的变化关系,以及透射系数随相对水深、波陡及相对宽度等因素的变化规律。李绍武等<sup>[12]</sup>通过数值模拟三筒组合浮式防波堤,表明波周期是影响透射系数及锚链力的重要因素,相对吃水深度只在一定范围内对透射系数及锚链力有影响。沈文君等、李焱等<sup>[13-14]</sup>通过数值模拟及模型试验,对“开”字形浮式防波堤的透射系数与相对水深、相对宽度、相对入水深度、

波陡、锚链夹角和锚链拖地长度等影响因素的变化规律,运动量和锚链力与相对宽度、水深、波高、锚链竖向初始夹角以及锚链拖地长度等影响因素的变化关系进行研究,表明锚链力并不随着波周期增大而增大。

单体型浮式防波堤包括方箱、矩形及加透空圆弧的结构、圆筒与组合圆筒结构、介于单体与双体间的“开”字形结构等,总体上,结构越复杂,消浪效果越好;周期越短、相对吃水深度越深、宽度越宽、锚链越紧,消浪效果越好。浮式防波堤的造价和安全性不仅与浮式防波堤的尺度有关,还与锚链和锚块有关。由于尚未建立结构尺度、锚链拉力与消浪特性综合的评价体系,因此单体型的浮式防波堤仍未得到最优化研究的评价体系。

## 2 双体型浮式防波堤结构及其研究进展

双体型浮式防波堤与单体型相比增加了横向的尺度,其更高效的消能效果源于双体间相位上的错位或不同消能方式上的相互补充,也可通过减小锚链的峰值拉力改善整个浮式防波堤的安全与经济性能。徐晓黎等<sup>[15]</sup>通过试验研究两排矩形浮箱防波堤不同布局方式下的波浪透射系数与波坦、前后箱间距、后排箱吃水深度之间的变化规律。杨彪等<sup>[16]</sup>通过试验研究双浮箱-双水平板式浮式防波堤的结构相对宽度、相对波高和锚链刚度等因素对消浪性能、运动响应和锚链受力的影响,得出两层水平板能有效提高防波堤的消浪性能。刘崇期等<sup>[17]</sup>通过数值模拟波浪能转换功能的浮式防波堤,得出阻尼系数对双浮子系统的透射系数和能量提取效率影响更大。沈雨生等<sup>[18]</sup>的研究表明,前后浮箱刚性连接的双浮箱式浮堤的波浪透射系数小于前后浮箱自由的双浮箱式浮堤和相同浮箱宽度的单浮箱式浮堤。王铁涛等<sup>[19]</sup>的三维数值模拟表明,增大双浮箱-双水平板防波堤浮箱的吃水深度和相对板间距可减小防波堤的透射系数。王烨等<sup>[20]</sup>的数值计算表明,双方箱浮防波堤平行锚固和交叉锚固的透射系数相近,但交叉锚固方

式的运动幅值和锚链力要略大于平行锚固方式。余洁等<sup>[21]</sup>通过计算双浮筒+S形桨叶浮式防波堤的消波性能、运动响应和系泊张力,得出浮筒间距越接近波长,防波堤消波性能越好,但迎浪侧张力响应幅值越大。董华洋等<sup>[22]</sup>的研究表明,锚链锚泊浮箱-水平板式浮防波堤的透射系数小于相同锚泊方式的单一浮箱浮堤模型的透射系数;浮堤模型吃水深度大,消波效果好。王科等<sup>[23]</sup>的研究表明,水下平板加浮筒型防波堤的附加质量和阻尼系数是决定水动力响应效果的重要影响因素。陈智杰等<sup>[24]</sup>的研究表明,方箱-水平板式浮式防波堤透射系数随方箱相对宽度的增加而减小,将二层水平板的方箱相对宽度从 0.110 增加至 0.295 时,透射系数从 0.88 减小至 0.30。何梦程等<sup>[25]</sup>通过试验研究,得出箱-板组合浮式防波堤增大浮箱入水深度、增加底板与浮箱的间距都可减小波浪的透射系数。郑艳娜等<sup>[26]</sup>通过试验研究单箱式、双箱式和板网式浮式防波堤的消浪性能,得出板网式结构的最好。王永学等<sup>[27]</sup>提出垂直导桩锚固方箱+水平板式浮堤。

根据研究结果可知,无论双箱、箱板还是双箱加板都优于单箱结构,而且双箱之间的连接以及间距都与消浪特性有关。比较统一的是,双箱之间的距离接近于 1 倍波长、固定连接效果较好;加板增加了波浪水质点垂向运动的波能损耗;其他规律与单体一致。需要提出的是,由于浮式防波堤以消浪作为目的,结构位置都处于波能最强的水体表面附近,而双体结构增加了连接,同时结构间的相互运动增加安全风险,如何将实验室内的模拟情况在现场实现,是其推广应用中需要重点考虑的问题。

### 3 柔性结构浮式防波堤及其研究进展

相较于浮箱类的刚性结构,柔性结构可减少浮式防波堤破坏后的次生危害,也容易解决相互连接的难题。柔性结构的随波性比刚性结构更强,其消浪效果的变化是研究的重要内容。宋伟华等<sup>[28]</sup>研究渔具材料制成的柔性防波堤。汪宏等<sup>[29]</sup>

提出一种圆木阻尼式柔性浮式防波堤结构,其对短波和长波都有良好的消波效果。何成圆等<sup>[30]</sup>设计一种由柔性囊体组合的柔性浮式防波堤。仇正中等<sup>[31]</sup>通过试验,得出圆柱形柔性浮式防波堤透射系数、反射系数、衰减系数与锚固方式、试验水深、相对宽度的变化关系,表明相对宽度是影响消浪效果的主要因素。赵东梁等<sup>[32]</sup>通过试验研究浮式植物消浪装置,表明在植物带高度大于波高的前提下,植物带密度和相对宽度是影响消浪效果的最重要因素。吴静萍等<sup>[33]</sup>将多块圆形木板柔性连接成一体模仿水生植物“浮漂”的结构形式,该结构系泊于水下时的消浪效果优于系泊于岸边。刘必劲等<sup>[34]</sup>提出双箱式、圆弧式、双筒板式、双筒双板式 4 种基于新型高密度聚乙烯材质浮筒、塑料盲沟的组合式防波堤和 1 种柔性浮式防波堤。葛聪等<sup>[35]</sup>提出一种由钢筋笼和水囊组成的筏式浮式防波堤结构。吴维登等<sup>[36]</sup>提出一种钢管轮胎浮式结构,可使波高传递系数最低达 0.22。

柔性材料和结构连接是柔性防波堤创新的主要因素,轮胎、植物、丝网等都可被采用。这些研究没有比较柔性结构与刚性结构浮式防波堤的消浪效果,但根据消浪效果的描述,都不理想。在多个研究成果中提到柔性结构对短波、长波都有效,这是相对于刚性结构的不同之处,但尚未见原理性的分析。

### 4 日本上浮式防波堤及其研究进展

日本对浮式防波堤进行了大量的研究,还有不少关于现场试验的报道。日本的浮力驱动垂直桩式防波堤吸引很多研究者的注意,并进行了现场示范性应用,到目前还处于良好状态。该上浮式防波堤由成排钢管桩组成,每根桩由上下钢管组成,上部钢管通常包裹在打入海床的下部钢管中,因此上部钢管之间存在小间隙。当预报海啸或巨浪时,上部管道在上部管道空气浮力的驱动下迅速上升到水面。有川太郎<sup>[37]</sup>通过水工模型试验和数值模拟,研究波浪在防波堤中的传播和作



用在上部管道上的波浪压力, 验证了防波堤的抗海啸和巨浪性能。木村雄一郎<sup>[38]</sup>采用 1/40 缩尺的试验模拟海啸作用, 通过改变支撑平台内埋设深度确认其对海啸的抵抗力。有川太郎<sup>[39]</sup>利用大水槽进行实际尺度结构的现场试验, 结果表明钢管的制作精度和安放精度都很好; 防波堤在波浪中的上升时间在几分钟以内, 证明了波浪力从上管向下管的传递机理。杉田博章<sup>[40]</sup>提出当海啸发生时, 上浮式防波堤通过向上部管道输送空气而上升到海平面以上, 控制系统的可靠性是该防波堤最重要的问题, 并介绍控制系统概率安全评估的有效性, 提出解决问题的方法。山根隆行<sup>[41]</sup>通过数值模拟分析上浮过程, 表明上水管上升所需时间仅为几分钟, 速度快到足以防止海啸袭击港口。平山克也<sup>[42]</sup>模拟桩间隙的风浪渗透性, 采用海绵层模型和多孔层模型作为 Boussinesq 波模型的渗透边界, 分别应用于部分波反射边界, 并在实际港口进行泊稳评价。中岛晋<sup>[43]</sup>介绍一种基于性能的该上浮式防波堤 (VTB) 设计方案, 在设计中定义性能要求, 提出所需性能的评价方法。

5 其他结构浮式防波堤及其研究进展

浮式防波堤的专利数量很多, 结构形式也多种多样, 研究的系统性普遍不足, 有许多还没有经过研究, 本文主要介绍结构形式。邱松等<sup>[44]</sup>对集装箱浮式防波堤进行设计计算, 在香港人工岛工程中应用效果良好。郑启航等<sup>[45]</sup>通过试验研究一种框架带孔薄膜的浮式防波堤单元体, 其不仅具有良好的消能效果而且兼具柔性浮式防波堤的优点, 克服箱式浮堤固有周期小的问题。胡文清等<sup>[46]</sup>研究相同孔隙率的两种多孔结构, 表明孔径小的多孔结构具有更优的消波效率。王科等<sup>[47]</sup>提出一种浮在水面上或潜在水下的水平或竖直单板消浪结构。张余等<sup>[48]</sup>通过研究废旧轮胎浮式防波堤结构衰减波能量的机理, 得出锚链刚度和锚链拖地长度对透射系数的影响不明显。刘海成等<sup>[49]</sup>通过试验研究一种底部增加阻尼的凹菱形浮式防波堤, 其增加波浪的能量消耗, 可减小防波堤的

透浪系数。孙笠等<sup>[50]</sup>提出一种带空气透平的后弯管浮式防波堤, 可将波浪能转化成机械能并用于发电, 还可显著减小防波堤的锚链力。丁宁等<sup>[51]</sup>针对 V 形浮式防波堤设计和结构分析中波浪力 (矩) 的确定问题进行研究, 表明截面几何参数对防波堤的消浪效果影响明显。王环宇等<sup>[52]</sup>通过试验研究一种由多菱形模块拼装而成的多孔浮式防波堤结构, 其消波效果好且受波浪力小。刘崇期等<sup>[53]</sup>对具有波浪能转换功能的浮式防波堤性能进行评估。陈诚等<sup>[54]</sup>研究多体浮式防波堤在不同入射角和浮筒吃水深度下的消波效果, 表明在入射角为 90°时, 多浮筒浮式防波堤能够最大程度地消减波浪; 透射系数随吃水深度的增加而不断减小, 但结构稳定性会下降。

这些不同结构的浮式防波堤, 由于缺乏可对比的参照物或测量评价体系, 无法评价优劣。

6 结论

- 1) 浮式防波堤的消浪性能基本与相对波长的尺度、浮重比和锚链作用力有关, 若选择浮式结构单位长度重力、锚链及连接的总力与消浪系数建立评估方法, 可有效结合消浪性能与安全经济性的关系。
- 2) 相较于日本的上浮式防波堤在设计、试验与数值模拟、原型试验和现场试验, 众多浮式防波堤结构还缺乏工程可行性研究。
- 3) 与消浪性能研究相比, 浮式防波堤的结构受力研究、生存条件研究还很不足, 难以解决对其安全性的担忧。

参考文献:

[1] 刘庆凯, 纪巧玲, 王钰. 悬链式单浮箱防波堤水动力特性试验研究[J]. 水运工程, 2020(1): 23-28.

[2] 张昊, 邓涛. 箱型浮式防波堤消波性能研究[J]. 水道港口, 2016, 37(5): 502-507.

[3] 董华洋, 王永学, 陈燕珍. 浮箱式浮防波堤锚泊系统受力试验研究[J]. 大连交通大学学报, 2016, 37(1): 25-30.

[4] 刘韬, 沈雨生. 垂直导桩锚固单浮箱式浮式防波堤消浪性能及受力研究[J]. 水运工程, 2018(3): 7-13.

- [5] 董华洋,王永学,侯勇,等.矩形箱式浮防波堤水动力特性试验研究[J].渔业现代化,2009,36(3):7-11.
- [6] 何超勇,王登婷,冯卫兵.矩形方箱浮式防波堤消浪性能研究[J].水运工程,2014(1):14-18.
- [7] 侯勇,孙大洋.规则波作用下矩形浮式防波堤的消浪性能试验研究[J].水运工程,2013(5):41-44.
- [8] 郑艳娜,彭海婷,陈昌平.不规则波对方箱浮式防波堤作用的数值模拟[J].水运工程,2015(7):14-19.
- [9] 任慧龙,杜娟,马山,等.浅水单模块浮式防波堤锚泊系统分析研究[J].船舶工程,2015,37(12):87-91.
- [10] 侯勇,王永学,高军,等.新型浮式防波堤水动力特性试验研究[J].水运工程,2010(2):50-53.
- [11] 杨会利,陈汉宝,刘海成.一种新型应急型浮式防波堤消浪特性研究[J].水道港口,2018,39(2):139-143.
- [12] 李绍武,邹鹏旭,陈汉宝.一种新型浮式防波堤消浪效果及锚链力数值研究[J].水道港口,2016,37(6):573-577.
- [13] 沈文君,曲健冰,李焱,等.一种新型浮式防波堤的消浪特性研究[J].水道港口,2016,37(3):260-263.
- [14] 李焱,肖辉,李松喆,等.“(开)”型浮箱式防波堤运动特性和锚链力试验[J].水道港口,2015,36(6):474-480.
- [15] 徐晓黎,李怡,孙晓莉,等.双排可调节浮箱式防波堤消浪特性试验研究[J].港工技术,2017,54(2):28-33.
- [16] 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.
- [17] 刘崇期,陈兵,胡涛.兼具波浪能转换功能的双浮式防波堤性能研究[J].水运工程,2019(7):44-48.
- [18] 沈雨生,潘军宁,周益人,等.双浮箱式浮式防波堤消浪性能试验研究[J].海洋工程,2018,36(1):47-54.
- [19] 王铁涛,刘祚秋.双浮箱-双水平板式浮式防波堤的数值模拟[J].水运工程,2016(3):46-50.
- [20] 王烨,王永学,贺铭,等.不同锚固方式双方箱浮防波堤水动力特性的 SPH 模拟[J].港工技术,2016,53(1):7-15.
- [21] 余洁,陈俊华,姚建均,等.新型浮式防波堤水动力性能数值研究[J].海洋工程,2019,37(6):62-73.
- [22] 董华洋,王永学,陈燕珍.锚链锚泊浮箱-水平板式浮防波堤试验研究[J].中国港湾建设,2016,36(5):25-29,43.
- [23] 王科,贺大川,高鑫,等.水下板式-浮筒型防波堤附加质量与阻尼系数研究[J].船舶力学,2014,18(11):1299-1305.
- [24] 陈智杰,董华洋,曾志,等.波浪作用下方箱-水平板式防波堤时域水动力分析[J].台湾海峡,2012,31(1):114-120.
- [25] 何梦程,单潜瑜,白兴兰,等.箱-板组合浮式防波堤水动力性能试验研究[J].浙江海洋大学学报(自然科学版),2019,38(3):237-243.
- [26] 郑艳娜,董国海,李玉成,等.深水浮式防波堤结构形式的试验研究[J].中国海洋平台,2005,20(6):1-5,10.
- [27] 王永学,董华洋,郑坤,等.垂直导桩锚固方箱-水平板式浮堤消浪性能试验研究[J].大连理工大学学报,2009,49(3):432-437.
- [28] 宋伟华,黄六一,吕永林.柔性浮式防波堤抗风浪性能和在养殖中的应用[J].渔业现代化,2006(3):29-30,33.
- [29] 汪宏,杨浩,明杉杉,等.新型柔性浮堤消浪性能的综合试验研究[J].水运工程,2017(7):78-81.
- [30] 何成圆,杨振,曾宪森.深水柔性浮式防波堤的消浪机理与结构设计[J].福建质量管理,2019(21):280-281.
- [31] 仇正中,吴启和,刘建波,等.柔性浮式防波堤消浪特性研究[J].人民长江,2017,48(10):59-64.
- [32] 赵东梁,刘毅,喻国良.新型浮式植物体消浪试验[J].水运工程,2015(8):48-54.
- [33] 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.
- [34] 刘必劲,万艳,饶翔.新型浮式防波堤的结构选型[J].厦门理工学院学报,2018,26(5):51-55.
- [35] 葛聪,王国玉,张琪,等.新型浮筏式防波堤消波性能试验研究[J].水道港口,2019,40(2):150-157.
- [36] 吴维登,钟瑚穗,黄俊.钢管-轮胎浮式防波堤消波的几个影响因子[J].河海大学学报(自然科学版),2002,30(5):79-82.
- [37] 有川太郎.大規模水理模型実験による津波・高波に対する直立浮上式防波堤の水理特性に関する研究[C]//佐々木忠義.海洋開発論文集(23 卷).东京:海洋開発ヤンター出版局,2007:117-122.
- [38] 木村雄一郎.フラップゲート式防波堤の津波に対する抵抗機構に関する実験的研究[C]//土木学会海洋開発委員会.土木学会論文集 B3(海洋開発).东京:土木学会海洋開発委員会,2014:378-383.

[39] 有川太郎.直立浮上式防波堤の実海域実証試験[C]//佐々木忠義.海洋開発論文集(24 卷).东京: 海洋開発ヤンター出版局, 2008: 93-98.

[40] 杉田博章.直立浮上式防波堤の浮上制御システムに関する確率論的安全評価[C]//土木学会海岸工学委員会.土木学会論文集 B2(海岸工学).东京: 土木学会海岸工学委員会, 2010: 861-865.

[41] 山根隆行.直立浮上式防波堤の開発[C]//佐々木忠義.海洋開発論文集(21 卷).东京: 海洋開発ヤンター出版局, 2005: 115-120.

[42] 平山克也.直立浮上式防波堤による港内静穏度向上効果とその運用法に関する考察[C]//土木学会海岸工学委員会.土木学会論文集 B2(海岸工学).东京: 土木学会海岸工学委員会, 2010: 706-710.

[43] 中島晋.津波防御に向けた直立浮上式防波堤の性能設計[C]//土木学会海岸工学委員会.土木学会論文集 B2(海岸工学).东京: 土木学会海岸工学委員会, 2011: 786-790.

[44] 邱松, 张洁, 徐立新.集装箱浮式防波堤研究与应用[J].水运工程, 2019(2): 41-45.

[45] 郑启航, 金凤, 杨强, 等.框架带孔薄膜浮式防波堤单元体[J].中国水运(下半月), 2015, 15(5): 174-175.

[46] 胡文清, 詹杰民, 苏维洵, 等.两种多孔浮式结构水面消波性能的试验和数值模拟[J].水动力学研究与进展 A 辑, 2018, 33(1): 81-88.

[47] 王科, 许旺.平板及立板型式防波堤透射及反射系数研究[J].船舶力学, 2010, 14(5): 487-494.

[48] 张余, 王永学, 肖霄.废旧轮胎浮式防波堤模型试验[J].水利水电科技进展, 2010, 30(3): 73-76.

[49] 刘海成, 曹玉芬, 陈汉宝.新型浮式防波堤消浪效果试验研究[J].水利科技与经济, 2014, 20(1): 19-20, 23.

[50] 孙笠, 宋瑞银, 郑堤, 等.带空气透平的后弯管浮式防波堤实验研究[J].海洋通报, 2019, 38(1): 96-101.

[51] 丁宁, 余建星, 侯佳佳.V 形浮式防波堤的动压力特性[J].排灌机械工程学报, 2014(1): 30-33.

[52] 王环宇, 孙昭晨.一种新型浮式防波堤的试验研究[J].港工技术, 2009, 46(4): 6-8.

[53] 刘崇期, 陈兵, 康海贵.具有波浪能转换功能的浮式防波堤性能研究[J].可再生能源, 2015, 33(7): 1117-1122.

[54] 陈诚.多体浮式防波堤消波特性数值模拟[J].水运工程, 2017(7): 87-91.

(本文编辑 王璁)

(上接第 51 页)

[4] 常纪磊, 雷明月.半开敞水域浮码头防台设计研究[J].中国水运(下半月), 2019, 19(8): 168-169.

[5] 夏运强, 李贺青.海港浮码头台损分析及应对措施[J].中国港湾建设, 2014(7): 16-19.

[6] 陆愈忠.古镇港建成抗台风大浪浮码头[J].水运工程, 1992(11): 17-20.

[7] 海军工程设计研究局.军港浮码头技术条件: GJB 6050—2007 [S].北京: [出版者不详], 2007.

[8] 南京水利科学研究院.波浪模型试验规程: JTJ/T 234—2001[S].北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 57 页)

[3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[4] 麻志雄.透空式防波堤消波性能试验研究[J].水运工程, 1990(10): 1-6.

[5] 邵杰, 陈国平, 严士常, 等.不规则波作用下垂直挡板式透空堤透浪系数试验研究[J].海洋工程, 2016, 34(1): 50-57.

[6] 南京水利科学研究院.波浪模型试验规程: JTJ/T 234—2001[S].北京: 人民交通出版社, 2002.

(本文编辑 王璁)