



长周期强浪条件下防波堤结构优化设计

方波, 郭隆洽, 杨小龙, 李伟仪, 陈良志

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 针对长周期强浪海况下越浪水体对防波堤内坡护面块体冲击作用大的问题, 以地中海某油气港改扩建工程为例, 通过对局部三维物理模型试验和水利行业标准的分析, 提出加宽挡浪墙底板后沿形成悬挑防护结构的优化方案, 并分析其稳定性结果。结果表明, 挡浪墙底板加宽悬挑部分可以掩护内坡顶部护面块体免于越浪水体的直接冲击作用; 超出悬挑后沿的护面块体位于水面以下, 当水深达到一定厚度时, 可消减越浪水体大部分能量, 护面块体稳定性满足要求。相比于加高挡浪墙和加大内坡护面块体, 悬挑防护方案增加成本低、防护效果好。

关键词: 长周期强浪; 块体稳定; 消能水垫; 防波堤

中图分类号: U652.7+4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0040-06

Optimal design of breakwater structures under long-period and rough wave conditions

FANG Bo, GUO Longqia, YANG Xiaolong, LI Wei, CHEN Liangzhi

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Aiming at the problem of the strong impact effect of overtopping on the armour blocks of the breakwater's rear slope under long-period and rough waves, taking a Mediterranean petroleum and natural gas terminal expansion project as an example, we propose an optimized scheme of a cantilevered protective structure by widening the rear edge of the crown wall's bottom slab, carry out three-dimensional physical model tests and study of water conservancy industry standards, and analyze the stability results of this scheme. The results show that the cantilevered part, by widening the bottom slab of the crown wall, can shield the top of the rear slope armour blocks from the direct impact of overtopping. The armour blocks beyond the cantilevered part are located below the water surface. When the water depth is thick enough, it can reduce most of the energy of overtopping, thus satisfying the stability requirements of the armour blocks. Compared to increasing the elevation of the crown wall or enlarging the armour blocks of the rear slope, the cantilevered protection scheme has a low cost and good protective effect.

Keywords: long-period and rough wave; block stability; energy dissipation water cushion; breakwater

防波堤是港口工程中重要的水工建筑物之一, 其功能主要是防御波浪对港域的侵袭, 保证港口具有平稳的水域, 便于船舶靠船系泊, 顺利进行货物装卸作业。国内外通用的规范、手册主要是采用 Hudson 公式或 van der Meer 公式计算防波堤护面块体稳定质量。国内外学者、工程师主要针对防波堤海侧护面块体稳定性开展相关研究工作^[1-4], 内坡块体的稳定质量则通过构造规定或物

理模型试验确定。国内行业规范 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[5]分情况规定了内坡护面块体质量; 欧洲设计指南 *Rock Manual*^[6]提出在挡浪墙后沿设置消力墩来破碎越浪水体或改变越浪水体的方向, 以保护内坡块体。

本文以地中海某油气港改扩建工程为例, 介绍长周期强浪条件下防波堤的设计方案, 并基于三维整体物理模型试验的结果, 优化防波堤的结构设计。

收稿日期: 2023-03-29

作者简介: 方波 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程设计。

1 工程概况

地中海某油气港改扩建工程工作内容包含新建液化天然气(liquefied natural gas,LNG)泊位、液化石油气(liquefied petroleum gas,LPG)泊位、通用泊位、拖轮泊位,改造 LPG 泊位,以及新建和修复防波堤。其中,新建东防波堤的长度为 866 m,为新建 LNG 泊位提供良好的掩护效果。

本工程新建东防波堤采用抛石斜坡堤的结构形式,堤心为开山石(0~1 000 kg),护面块体采用 CLI 公司的专利产品 ACCROPODE™ 块体(形似扭王字块体)。堤顶设置钢筋混凝土挡浪墙,兼作行车维修通道。为保障 LNG 泊位的运营,要求在设计使用年限内设计波浪超越概率不高于 20%。因此,防波堤的设计波浪重现期的要求为 250 a。

1.1 波浪条件

本工程位于地中海南岸,受季风的影响,其强浪作用主要受浪高和长周期两个方面影响。波浪作用强主要体现在工程所在位置 1 a 重现期的平均波高达到 4.5 m 左右,而 250 a 重现期的平均波高更是达到了 9.0 m;另一方面,长周期主要体现在 1 a 重现期的谱峰周期为 10.5~13.5 s,而 250 a 重现期的谱峰周期则达到了 14.5~17.5 s。东防波

堤平面布置及控制点分布见图 1,根据本工程的波浪数值模拟结果^[7],东防波堤海侧和港侧设计波要素见表 1。

表 1 东防波堤海侧和港侧设计波要素
(重现期 250 a、高水位 1.0 m)

方位	控制点	波向	有效波高 H_e/m	2%波高 $H_{2\%}/m$	谱峰周期 T_p/s
海侧	CH+062 m	N	2.8*	2.8*	10.5 14.5
	CH+240 m	N	4.8	5.1*	10.5 14.5
	CH+325 m	N	5.6	6.8	13.5 15.5
	CH+440 m	NNW	7.1	8.5	15.3
		N	7.1	8.5	13.5 15.5
	CH+625 m	NNW	7.4	8.9	15.3
		N	7.8	9.5	13.5 15.5
	CH+866 m	N	7.7	9.4	13.0 15.9
	N03	—	1.61	—	14.5
		—	1.67	—	17.5
港侧	NEBL1	—	3.5	—	17.5
	NEBL2	—	2.6	—	17.5
	NEBL3	—	1.7	—	17.5

注: * 为浅水破碎波高。

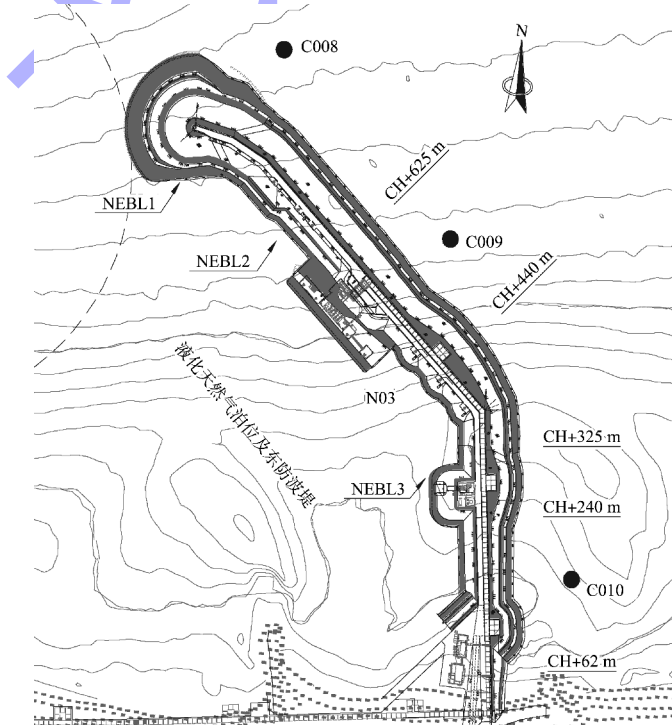


图 1 东防波堤平面布置及控制点分布

1.2 初步设计方案

本工程防波堤主要基于欧洲设计指南 *Rock Manual* 进行设计。以靠近堤头的堤身段(里程号 CH+720 m)为例,根据海侧和港侧设计波要素计算,防波堤内外坡护面坡比均为 4:3,外坡护面采用 10 m³ ACCROPODE™ 块体,内坡为 3 m³ ACCROPODE™

块体。挡浪墙顶高程为 8.80 m,底板顶高程为 3.20 m。该区段防波堤 250 a 重现期下的允许越浪量为 200 L/(s·m)。防波堤断面见图 2。考虑到允许越浪量较大,为避免越浪水体对内坡块体的冲击,同时防止车辆意外落水,在挡浪墙底板的后沿(港侧)设置了混凝土屏障。

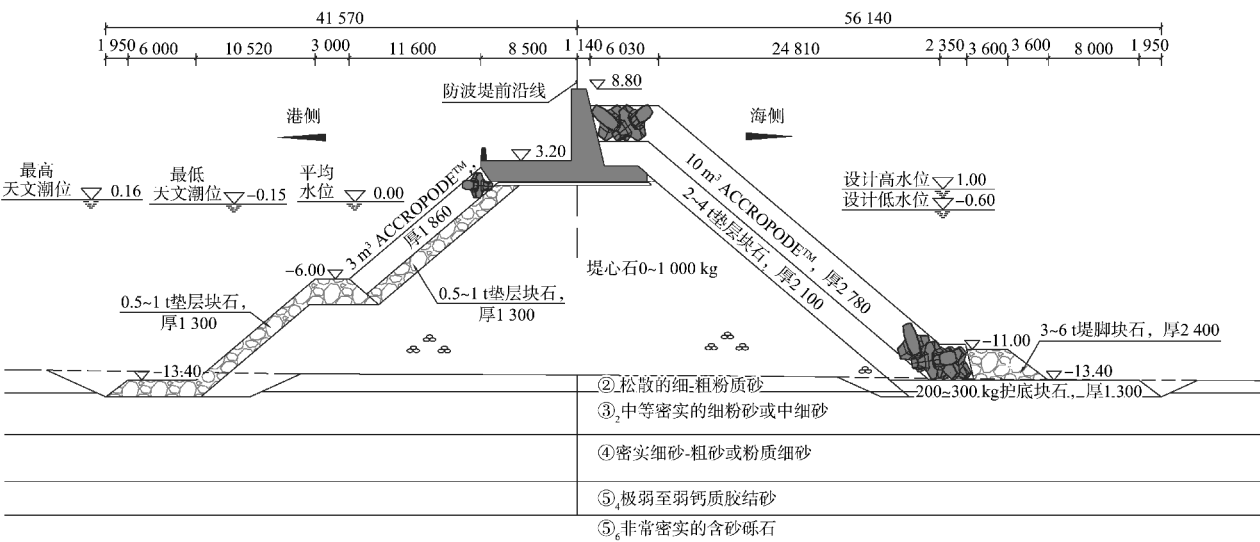


图 2 东防波堤初步设计断面 (里程 CH+720 m) (尺寸: mm; 高程: m)

2 试验概况

2.1 试验设备

针对波浪作用下防波堤稳定性和设计的合理性,在阿尔及利亚国家海洋工程实验室开展了三维物理模型试验。试验水池长 36 m、宽 26 m、深 1 m,水池内布置 2 台宽度为 11 m 的造波机,模拟波浪要素的生成由计算机自动控制。

2.2 模型设计

模型试验依据弗劳德数的相似原理设计。综合考虑结构尺寸、构成元素大小、结构物水深和造波深度,以及从 CLI 公司获得的 ACCROPODE™ 块体模型确定模型几何比尺。在试验的过程中,需要用 16 m³ ACCROPODE™ 块体模拟为 20 m³ ACCROPODE™ 块体,故三维稳定性试验模型选择的几何比尺调整为 1:68.9。根据相关文献^[8]的建议,防波堤三维稳定性试验的几何比尺为 1:30~1:80,上述所选比尺满足试验要求。

2.3 试验方法

局部三维物理模型试验主要研究波浪作用下

防波堤结构的稳定性,模型包含东防波堤和北防波堤延长段。本工程所在区域季风期的主浪向为 N11.25°~N337.5°,故选取 N337.5°和 N11.25°两个入射方向进行试验。试验模型平面布置见图 3。

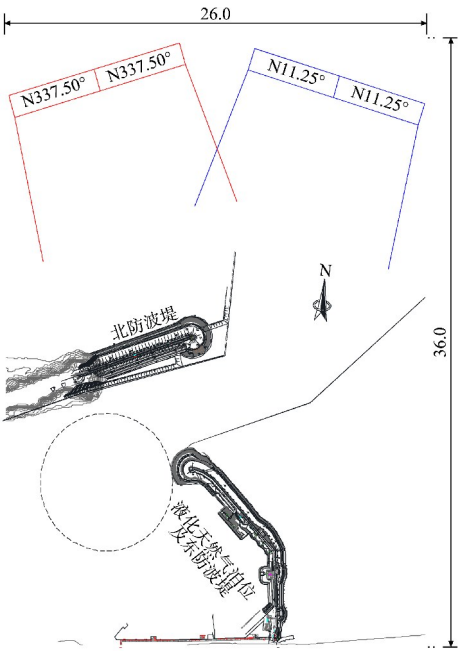


图 3 试验模型平面布置 (单位: m)

在波浪作用下, ACCROPODE™ 块体的稳定标准为: 1) 不允许有块体脱离; 2) 无明显下陷; 3) 允许有少量块体摆动(少于 1%); 4) 在超载工况下(入射波要素为设计波要素的 120%, 即 $120\% H_s$), 不允许有块体脱离。对于四角锥(TETRAPODE)和立方块(BCR), 其容许失稳率为 $D_b < 5\%$ (D_b 为各段内发生失稳块体个数除以相应段内块体总数的百分比)。护面块石的损坏水平参数 $S_d \leq 2$, 且垫层块石不能暴露。

试验中波浪根据 JONSWAP 谱生成不规则波, 对于地中海海域, 谱峰因子 γ 为 1.5。每组试验工况的测试波数为 1 000。

2.4 试验工况

试验水位涵盖高水位、设计高水位和设计低水位, 波浪入射方向分别为 $N337.5^\circ$ 和 $N11.25^\circ$, 波浪重现期分别为 1、10、100 和 250 a。试验波要素见表 2。

表 2 试验波要素

工况	水位/ m	重现期/a	平均波高 H_{m0}/m	谱峰周期 T_p/s	试验 波数
T_{11}	0.55	1	4.6	13.5	1 000
T_{12}		10	6.5	14.5	1 000
T_{13}	1.0	100	8.3	16.0	1 000
T_{14}		250	9.1	16.5	1 000
T_{15}	-0.6	250	9.1	16.5	1 000
T_{16}	1.0	120%波浪作用	10.9	18.0	1 000

3 稳定性结果

3.1 初步方案稳定性结果

由局部三维物理模型试验初次结果可见, 由于设计波浪周期长、波高大, 250 a 重现期下, 东防波堤堤头及相邻堤身区段的实测越浪量为 $154.9 \sim 179.7 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$, 满足允许越浪量 $200 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 的要求。越浪水体越过挡浪墙顶后, 对防波堤内坡冲击作用较强, 具体情况为: 1) 100 a 重现期下, 东防波堤堤头至码头泊位区段有明显越浪, 内外坡与堤头结构均稳定; 2) 250 a 重现期下, 东防波堤堤头至码头泊位区段有显著越浪, 外坡与堤头结构稳定。内坡 2~4 t 护面块石出现掉落, 但总体满足 $S_d \leq 2$ 的要求; 3) 250 a 重现期的 120% 波浪作用下, 东防波堤堤头至码头泊位区段越浪

较大, 外坡与堤头稳定。内坡近堤头处的系缆平台 MD6 附近有 26 块 3 m^3 ACCROPODE™ 失稳, 系缆平台 MD5 附近有 2 块 3 m^3 ACCROPODE™ 失稳。

由现场拍摄的试验视频看, 大浪的越浪水体越过挡浪墙后, 落点恰好在内坡顶部附近, 对内坡的护面块体形成较大的冲击作用, 试验视频截图见图 4。

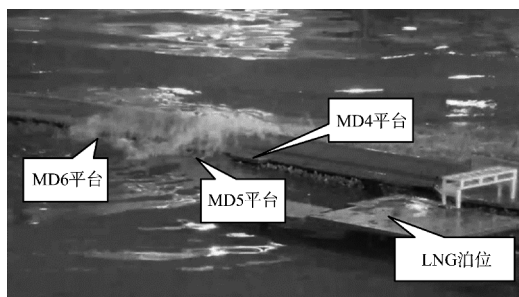


图 4 越浪水体对防波堤内坡的冲击

试验后拍摄的照片清晰反映出防波堤内坡护面块体被越浪水体冲击破坏的情况, 见图 5。冲击造成 ACCROPODE™ 块体滚落, 但下部的支撑棱体和护面块石仍保持良好的稳定性。

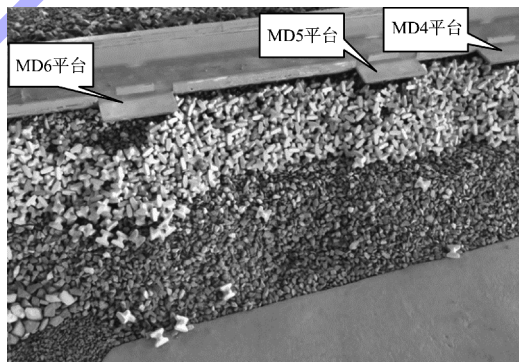


图 5 防波堤内坡破坏情况

3.2 优化方案及稳定性结果

JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》对内坡护面块体的构造规定指出: 对基本不越浪、堤顶设胸墙的斜坡堤, 内坡护面应采用堤内侧波浪并按第 4.3.7 条的相关规定进行计算, 且不宜小于外坡护面垫层块石的质量。本工程初步设计断面基本按此规定的思路进行设计, 但在地中海南岸水域强浪作用下, 越浪量较大, 内坡护面块体稳定质量不足, 影响防波堤结构稳定。

基于上述构造要求, 对于越浪水体冲击防波堤内坡问题, 可能的解决思路有: 1) 加高挡浪墙

或加宽前坡护面块体肩宽，以减小越浪；2) 提高内坡护面块体质量等级，与前坡相同。但为了大幅降低越浪而增加挡浪墙顶高程，会导致墙体承受波浪力增大，需要额外增加稳定质量或其他措施以保证挡墙抗滑稳定性。而增大护面块体质量，其垫层块石的质量也需要相应增大；同时，内坡顶部块体咬合能力弱，增大块体质量不能解决越浪水体对内坡护面块体的带离作用。因此，这两种方案的改善效果不佳，而且成本较高，性价比较低。

通过模型试验视频可以看出，内坡护面护面块体多由顶部开始失稳；而一定厚度的水体能够消减越浪水体能量，某一深度以下的护面块体、支撑棱体及护面块石则能够保持稳定。优化方案考虑保持防波堤堤身断面不变，将挡浪墙底板尾端向港侧延长 3.5 m 形成悬挑，一方面可保护内坡顶部护面块体免受越浪水体的直接冲击；另一方面，如

图 6 所示越浪水体轨迹线，这部分水体越过挡浪墙底板尾端后落入水中，按所示轨迹估算，水体在水面落点处的水深约为 1.3 m。悬挑最终的延伸长度将根据试验结果调整。挡浪墙后沿加宽后再次进行波浪入射方向为 N11.25° 的试验。经验证，在设计高水位 (1.0 m)、设计低水位 (-0.6 m) 及相应的 250 a 重现期波浪作用 ($H_{m0}=9.1\text{ m}$ 、 $T_p=16.5\text{ s}$) 下，内坡 3 m³ ACCROPODE™ 和 2~4 t 块石棱体均能够保持良好的稳定性。在各级水位 (-0.6~1.0 m) 及相应 250 a 重现期的 120% 波浪作用 ($H_{m0}=10.9\text{ m}$ 、 $T_p=18.0\text{ s}$) 下，内坡 2~4 t 块石棱体整体无明显变形，仍可起到支撑作用；3 m³ ACCROPODE™ 无明显位移，满足稳定性要求。试验后防波堤内坡护面块体及块石情况见图 7。考虑到三维物理模型试验的实施周期长，而工期紧，故未对悬挑长度部分做进一步优化。

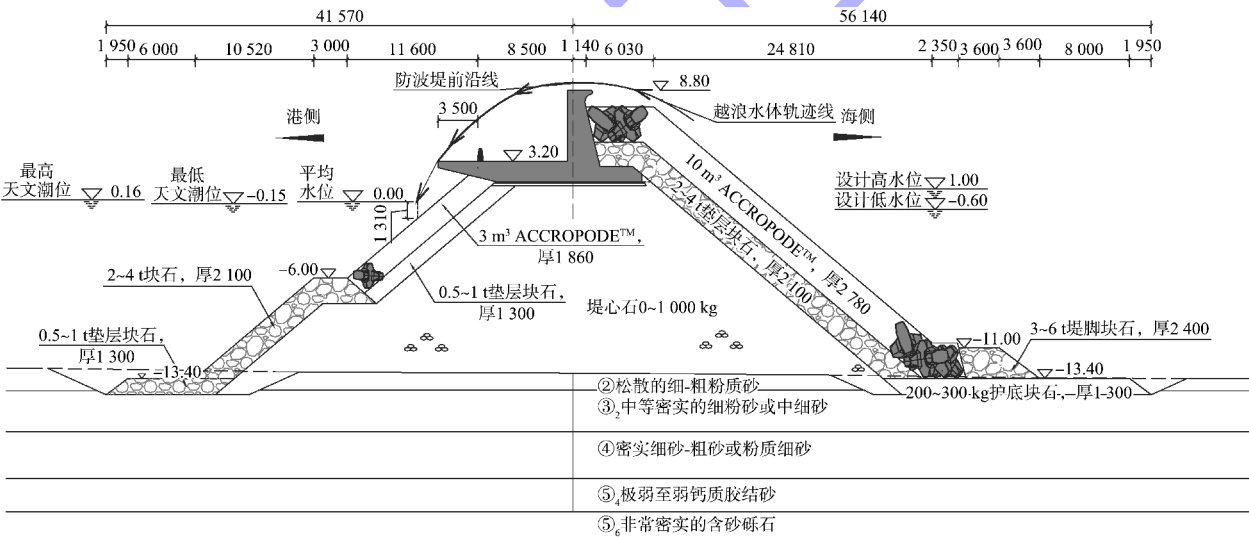


图 6 防波堤挡浪墙后沿加宽方案 (尺寸: mm; 高程: m)

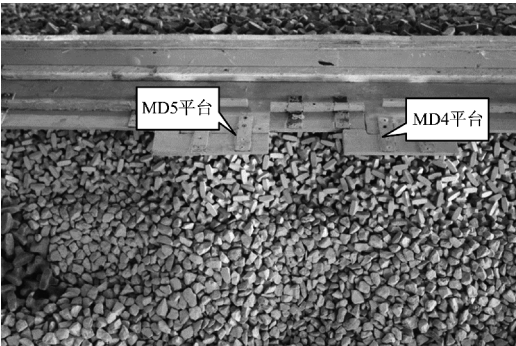


图 7 试验后防波堤内坡情况 (挡浪墙后沿加宽方案)

由于越浪水体对挡浪墙加宽部分有冲击作用，还需要根据物理模型试验的波压测量结果复核挡浪墙抗倾抗滑稳定。经验算，挡浪墙抗倾抗滑结果满足设计要求。

4 结语

1) 地中海海域季风期波浪周期长、波高大，波浪越过防波堤挡浪墙后能量较高，对防波堤内坡的冲击作用较大。根据港内设计波高计算得到

的防波堤内坡护面块体或护面块石质量,在越浪水体的冲击下难以保持稳定,不满足稳定性要求。按照国内防波堤设计规范的构造要求,常规方案的改善效果不佳、成本高,性价比较低。

2) 加宽挡浪墙底板后沿,可以覆盖内坡护面块体顶部,使其免于越浪水体的直接冲击;同时可以让越浪水体在内坡的落点往港侧方向移动。当落点处水深约为 1.3 m 时,可起到消减越浪水体的能量,使其对内坡护面块体的冲击作用减弱,块体的稳定性满足要求。此外,考虑到挡浪墙底板后沿受到越浪水体冲击,对挡浪墙的抗倾抗滑稳定进行复核计算,能够满足设计要求。加宽挡浪墙底板后沿增加的工程量小、防护效果显著,可供类似工程参考使用。

3) 内坡护面块体优化了水平肩台,但块体安装可能高低起伏,部分肢腿与挡浪墙悬挑部分冲突。为了保证块体的咬合作用,以及避免和悬挑部分的冲突,可以在块体安装时预留半块左右的空间,填充规格块石并用砂浆灌填,这样也方便悬挑部分的浇筑。

参考文献:

[1] GERDING E. Toe structure stability of rubble mound

breakwaters[D]. Delft: Delft University of Technology, 1993.

[2] VAN DER MEER J W, D'ANGREMOND K, GERDING E. Toe structure stability of rubble mound breakwaters [C]//CLIFORD J E. Advances in coastal structures and breakwaters. London: Thomas Telford Ltd., 1996: 308-321.

[3] 张先武,张华平.长周期涌浪作用下斜坡式防波堤结构优化设计[J].水运工程,2015(1):58-62.

[4] 李懿,牛红林,薛丁源.斜向长周期涌浪作用下斜坡式防波堤结构稳定性优化[J].水运工程,2018(9):69-75.

[5] 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.

[6] CIRIA, CUR, CETMEF. The rock manual-the use of rock in hydraulic engineering: CIRIA C683 [S]. 2nd edition. London: CIRIA, 2007.

[7] Artelia Eau & Environnement. Etude numérique de Houle: Rapport -R1-V11[R]. Ville de Paris : Artelia Eau & Environnement, 2020.

[8] FROSTICK L E, MCLELLAND S J, MERCER T G. Users guide to physical modelling and experimentation: experience of the hydalab network [M]. London: CRC Press, 2011.

(本文编辑 王璁)

(上接第33页)

[4] 陈武争,张婧卿,童志华,等.港口岸线集约利用评价指标研究[J].水运工程,2019(4):31-37.

[5] 袁洪春,谢耀峰.内河港口岸线利用效率评价指标[J].水运工程,2015(11):67-71.

[6] 陈晓攀,李赛峰,陈伟.宁波市港口岸线资源集约化利用[J].水运管理,2013,35(9):25-28.

[7] 陈广杰.提升苏州内河港口岸线集约化管理水平的探讨[J].现代交通技术,2012,9(4):83-87.

[8] 王学诗,杨海龙,张立国.基于AHP-熵权法的港口规划中

岸线价值评价研究[J].港工技术,2022,59(5):18-21.

[9] 杨立娟,徐涵秋,唐菲,等.天津中心渔港岸线集约利用评价模型研究[J].地球信息科学学报,2017,19(3):417-424.

[10] 王晗,徐伟.海域集约利用的内涵及其评价指标体系构建[J].海洋开发与管理,2015,32(9):45-48.

[11] 黄俊,苏孟超,王伟.沿海港口岸线资源规划利用概况及集约高效利用对策[J].水运工程,2023(1):7-10.

(本文编辑 王传瑜)