



生态型港口海岸防护块体 Coastalock 的 研究与工程应用 *

陶然^{1,2}, 黄睿奕³, 王文渊¹, 吴遵奇⁴, 彭云¹, 何俊彪⁵

(1. 大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 中国交通建设股份有限公司, 北京 100088; 3. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;
4. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230;
5. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要: 在积极稳妥推进碳达峰、碳中和的社会大背景下, 针对传统的海岸防护结构无法满足应对气候变化、生物多样性、绿色低碳发展等凸出矛盾, 通过大量文献调查研究, 介绍一种基于仿生学的新型防护块体 Coastalock 解决方案, 并进行有关物理模型试验及工程应用验证。结果表明, 该块体具有较好的稳定性及消浪效果, 适用于大部分海岸情况, 其碳封存和生物多样性效果显著, 有助于港口与海岸工程建设应对气候变化。

关键词: 生态型; 港口海岸防护建筑物; 防护块体; 生物保护层

中图分类号: U656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0049-06

Research and engineering application of ecological marine protective armour unit Coastalock

TAO Ran^{1,2}, HUANG Ruiyi³, WANG Wenyuan¹, WU Zunqi⁴, PENG Yun¹, HE Junbiao⁵

(1. State Key Laboratory of Coastal and offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. China Communications Construction Co., Ltd., Beijing 100088, China;
3. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China; 4. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
5. China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: Under the social background of promoting the carbon peak and carbon neutral, for the problem that traditional coastal protection structure cannot meet the response to climate change, biodiversity, green and low-carbon development and other prominent contradictions, we introduce a engineering solution as a new type of bionic-based protection armour unit Coastalock through a comprehensive literature research, and carry out the relevant physical model test and the verification by engineering application. The results show that the armour unit has excellent stability and wave dissipation effect, and is suitable for most of the coastal conditions. The armour unit also has significant effective carbon sequestration and biodiversity, which can assist the port and coastal engineering construction addressing climate change.

Keywords: ecological; port and coastal protection structure; protection armour unit; biological protective layer

港口是应对全球气候环境挑战和促进沿海地区经济社会可持续发展的关键要素。近年来, 港

口建设与生态保护的矛盾日益加剧。以港口防护建筑物为例, 作为其重要组成部分之一的护面结

收稿日期: 2023-08-27

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600200、2022YFB2603000); 中交集团青年创新项目(2022-ZJKJ-QNCX14)

作者简介: 陶然(1988—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事港口与航道工程新技术研究与应用。

构, 随着沿海港口工程建设逐步向深水水域发展^[1], 受制于高强度的大块石供应问题, 混凝土人工块体因其标准化、高效率的批量预制生产而得到广泛应用。但由于人工块体表面光滑, 不适宜被海洋生物附着, 而且普通混凝土的 pH 值为 12~13, 不利于海洋生物生长, 大幅降低了防波堤附近的生物多样性。

因此, 高度契合生物栖息需求的生态友好型港口防护结构逐渐成为绿色港口建设与生态安全保障技术领域的研究重点。2019 年 9 月联合国纽约峰会后, 基于自然的解决方案 (nature-based solution) 成为了国际社会关注的热点议题, 也逐渐成为将“碳中和”和“生物多样性”融入生态环境治理新格局的有效途径^[2]。

近年来, 基于使人工结构更接近自然属性的“韧性工程”理念, 生态型防护技术得到大量研究与应用^[3]。美国住房和城市发展部曾发起了一项名为“为重建而设计”的竞赛, 其中一个获奖工程为“有生命的防波堤”, 它是为纽约拉里坦湾和斯塔滕岛量身设计的一个创新性的沿海绿色基础设施工程, 并获得纽约州政府专项资金实施。该工程着重采用分层策略降低风险, 通过建立海洋栖息地结构增强生态系统稳定性, 同时缓

和具有破坏性的风浪, 减少或逆转长期的海岸侵蚀^[4]。

考虑到很多鱼类在生命的脆弱阶段都需要依赖于岩石栖息地和微小孔隙空间的庇护, 为最大限度地给各类物种提供复杂结构和栖息地, 以色列的 ECOncrete Tech 公司(简称“ECOncrete 公司”)研发了一种基于仿生学技术的新型单层人工块体, 即 Coastalock 块体^[5]。

1 Coastalock 块体结构特点

Coastalock 块体采用八面体结构, 见图 1。它可以适应各种坡度的海岸线, 并且相邻块体可以形成联锁, 增强稳定性。其中一面仿照天然洞穴设有多层次凹槽的潮汐池, 在低潮位时可以蓄水, 并且其纹理和凹陷的表面可以为牡蛎、珊瑚、藤壶等海洋生物提供庇护和繁殖栖息场所(图 2), 它们作为生物胶水, 通过对碳酸钙的生物积聚, 增强了结构的强度和耐久性, 形成生物保护层, 保护混凝土结构免受降解, 从而实现了在改善生态稳定性的同时降低了结构维护的规模和频率^[6-8]。块体的其余各面均设有孔洞, 作为通道供海洋生物穿行, 同时也便于块体吊运及安装, 还能通过多块串联提升整体稳定性。

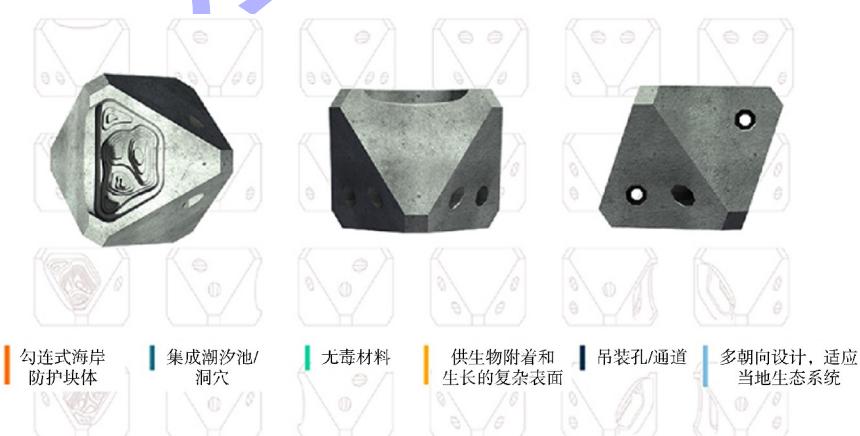


图 1 Coastalock 块体概念设计

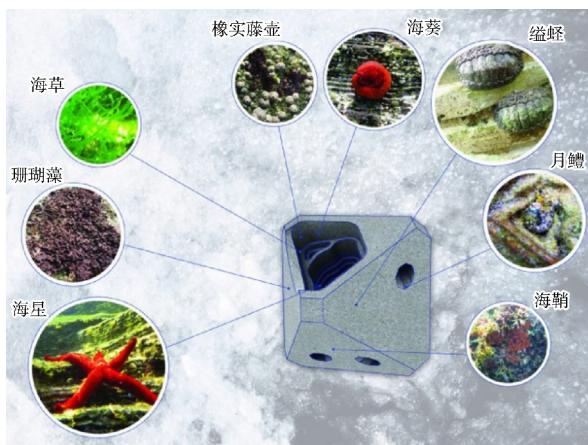


图 2 Coastalock 块体为海洋生物提供栖息地

由于附着于块体上的珊瑚和蛤蜊等钙质生物通过从水中吸取碳用于形成它们的骨架和外壳, 从而帮助促进海岸线上二氧化碳的储存, 即“碳封存”, 而当块体浸入海水中, 也会成为活跃的碳捕获器。因此, 通过促进钙质生物的生长, Coastalock 块体成为了应对气候变化的重要工具, 为更多的生物多样性生态系统铺平道路。

Coastalock 块体实现自然加固的关键技术主要体现在 3 个方面: 1) 采用 ECOConcrete 公司具有自主知识产权的生物增强剂(混合剂)技术^[9], 通过平衡混凝土的化学成分, 降低 pH 值, 促进碳酸钙沉积形式的生物钙化、积聚和光合作用, 有助于形成健康、多样的海洋生态系统; 2) Coastalock 块体混凝土具有复杂纹理的多孔粗糙表面, 见图 3a), 可为沉积物和海洋微生物提供定居的缝隙, 促进小型沿岸海洋生物的繁殖和生长; 3) 预制块体具有仿照海岸自然岩石结构的生态化的潮池洞穴, 见图 3b), 可以模拟珊瑚礁和岩石海岸栖息地, 促进结构的生态提升, 形成生物保护^[10]。



a) 复杂的纹理表面



b) 生态化的洞穴

图 3 Coastalock 块体的自然加固技术

2 Coastalock 块体水力特性研究

为研究 Coastalock 块体作为深水防波堤护面结构的水力特性, 荷兰的代尔夫特理工大学在水槽中按照重力相似准则进行设计并进行了二维物理模型试验^[11]。根据试验内容、试验水池尺寸、造波机造波能力、仪器精度等确定模型比尺 $\lambda = 37.4$, 波谱采用 JONSWAP 谱, 谱高因子 $\gamma = 3.3$, 试验最大平均波高为 $H_s = 0.16 \text{ m}$ 。

防波堤断面模型坡度为 $2V:3H$ (V 为垂直位移, H 为地表位移), Coastalock 块体采用单层摆放形式。针对块体摆放的朝向(图 4)、间距(图 5)以及波陡与垫层厚度等要素, 共进行 24 组对比试验。

根据试验可知, 总体上 Coastalock 块体具有比较好的消浪效果, 在其水力特性方面可以得出以下基本结论。

1) 在破坏机理及稳定性方面, 当块体摆放紧密、间隙较小时, 在波浪作用下, 整层块体会垂直于防波堤坡面不断重复“被抬起→被压回→再被抬起→又被压回”的过程, 块体间的相互摩擦以及与下层块石的撞击会造成块体损坏或断裂, 同时会导致下层块石下滑呈现出 S 形的坍塌破坏。因此建议块体摆放的间隙率在 10%~25%, 会比紧密的摆放方式具有更好的稳定性。

2) 在波浪反射方面, 块体作为防波堤护面结构时的波浪反射系数主要取决于波陡。波陡为 1.6% 的波浪的反射系数高达 0.78, 波陡为 4.6%

时波浪的反射系数降低到 0.48。影响反射系数的另一个因数是块体摆放的间距，当间隙率增加时，有更多的波浪能量穿透护面结构并被防波堤吸收而不是被反射。试验中，当波陡为 3.5% 时，块体摆放间隙从 0% 增加至 25%，反射率则从 0.57 降低至 0.49。此外，垫层厚度和块体摆放朝向对反射系数的影响较小。

3) 在越浪方面，虽然在 EurOtop^[12] 中还未有

Coastalock 这种新型块体相关的计算公式，但通过试验发现，当块体摆放间隙率小于 10% 时测得的越浪量为 $10^{-2} L/(m \cdot s)$ ；当间隙率大于 10% 时，测得的越浪量超过 $10^{-1} L/(m \cdot s)$ 。但是通常，防波堤会在越浪造成破坏前，已经由于波浪作用于护面块体呈现往复撞击引起坍塌破坏。数据显示，越浪量与作用的有效波高大小呈指数关系，但随着块体摆放间距的进一步加大，越浪量反而减少。

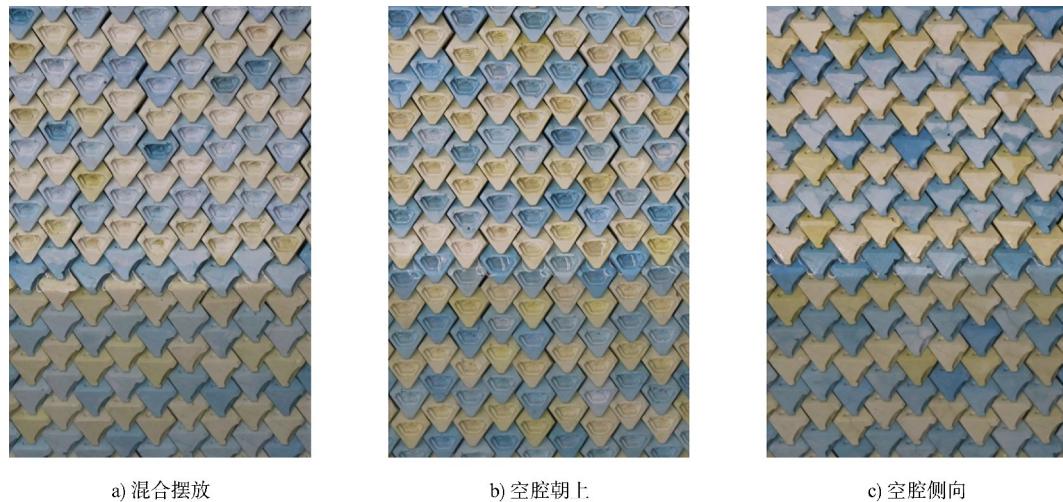


图 4 模型试验中 Coastalock 块体不同的摆放方式

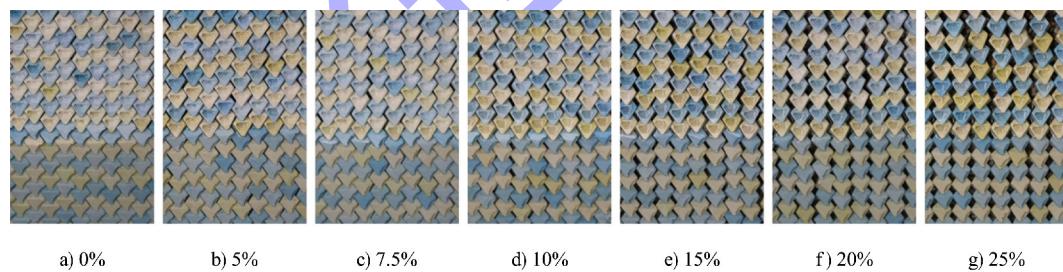


图 5 模型试验中 Coastalock 块体不同的摆放间隙率

3 工程应用

美国圣地亚哥港(简称“圣港”)一直致力于通过技术创新和采用可持续的商业模式提升港口环境管理水平和沿海生态系统保护^[13]。自 2016 年起，圣港推出了蓝色经济孵化器计划，寻求用于沿海地区环境修复和韧性提升的创新解决方案。2019 年，圣港批准了 ECOConcrete 公司的试点工程，将采用生物增强技术提升沿海混凝土基础设施周边环境的生物多样性。2021 年，ECOConcrete 公司在

圣港所处海岸线的护岸上安装了 4 排共 74 块 Coastalock 块体(图 6)，其中水面以上的 3 排块体空腔朝上、水面以下的 1 排空腔侧向，为不同的生物体提供洞穴栖息地。

通过每 6 个月开展的生态和结构监测，验证 Coastalock 块体的碳封存和生物多样性再生效果(图 7)，并评估论证了 Coastalock 作为传统护岸、防波堤护面结构的生态替代方案具有实施的可行性和生态方面的显著优越性。

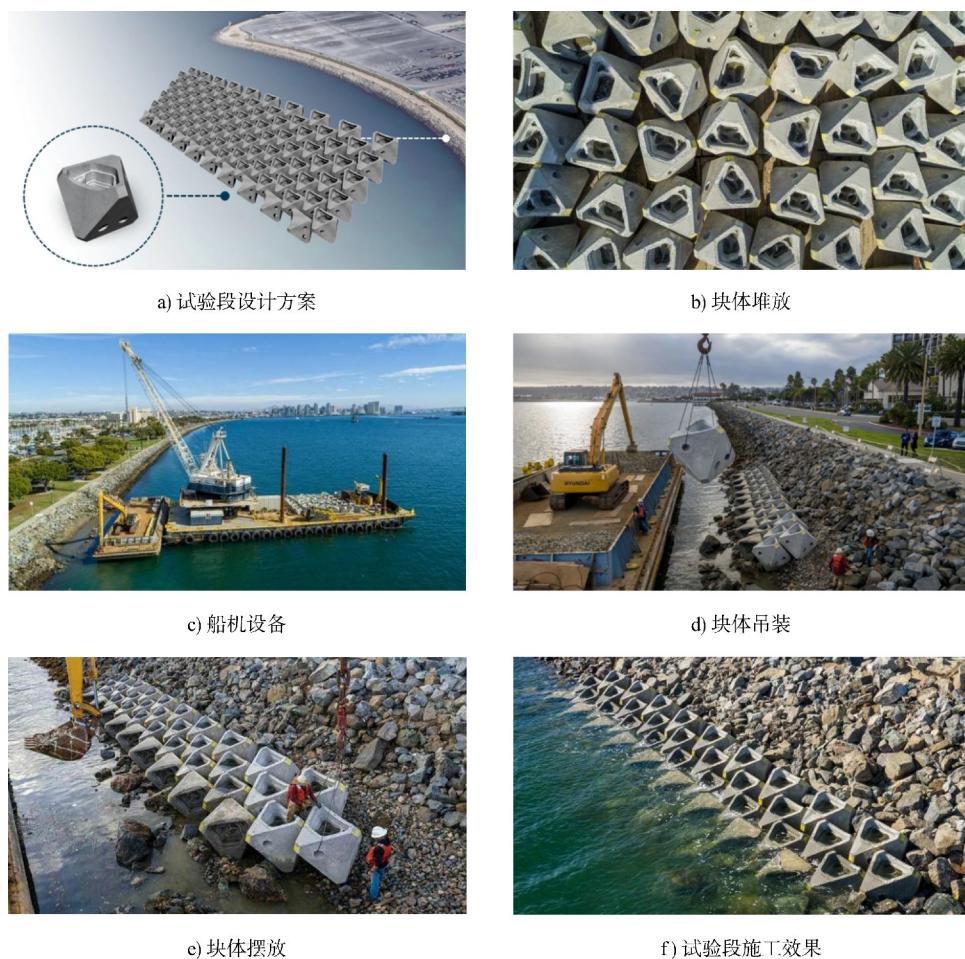


图 6 Coastalock 块体试验段施工

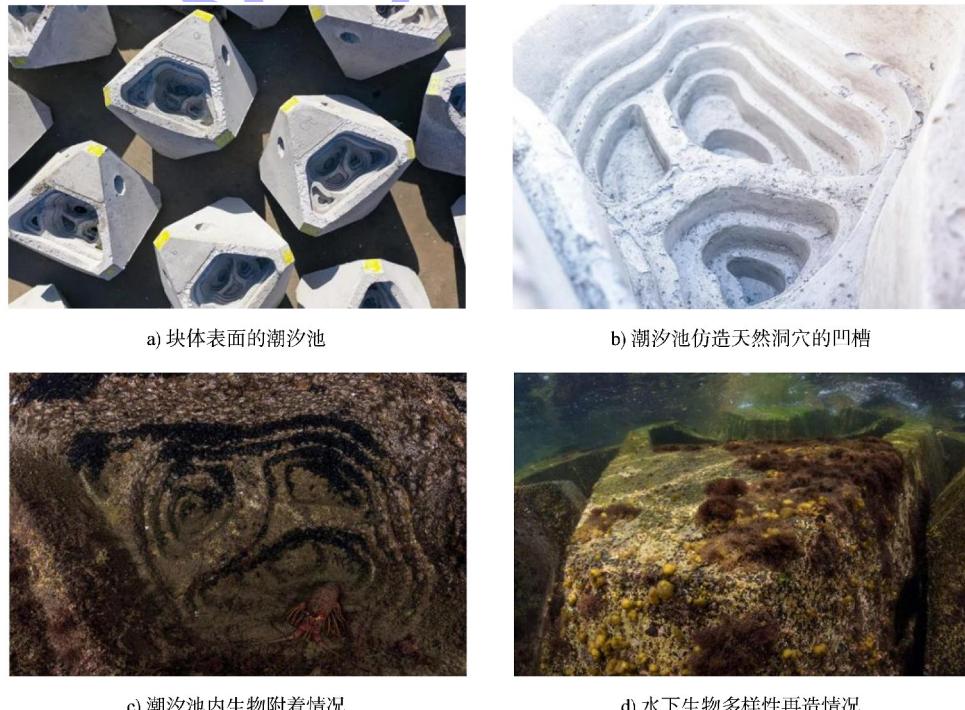


图 7 Coastalock 块体试验段生态再造效果

4 推广应用前景

目前, 我国现行的行业规范^[14-15]仅对扭工字块、扭王字块、四脚锥体、四脚空心方块、栅栏板等人工护面块体有设计和施工方面的要求, 而在国外工程中常用的 ACCROPODETM、ACCROPODE IITM、ECOPODETM、CORE-LOCTM、XBLOC 等块体^[16], 通常遵照厂家产品手册。

近年来, 我国在水工防护建筑物方面的研究主要聚焦于块体强度增强、施工便利以及护面结构的整体性、稳定性和消浪效果提升等方面^[17]。随着国家对工程建设生态环保要求的不断提高, 生态混凝土材料和生态友好型护坡、护岸及护滩等结构方面的研究得到快速发展^[18]。

本文介绍的 Coastalock 块体的技术性能, 全面满足并部分高于以色列、美国、欧洲等标准, 并已经在以色列、美国、加拿大、澳大利亚、欧洲、中国取得专利授权, 具有广泛的应用前景。

5 结语

1) 新材料、生态友好型结构是绿色港口建设关键技术的 2 个重要方面, 其中新材料的研究重点是研发和应用具有高强度、低黏度自密实、低温升、低收缩、低碳排放、生态友好等功能材料, 降低材料应用成本和资源消耗; 生态友好型结构的研究重点是通过创建可持续、环保、安全耐久且便于施工的结构, 减少资源消耗、降低能源消耗、减少废弃物和减轻对生态系统的负面影响。本文介绍的 Coastalock 块体, 兼具材料和结构方面的创新, 适用于基岩和砂质等大部分海岸情况, 对“绿色港口”、“海洋牧场”建设具有重要意义, 具有广泛的推广应用前景。

2) Coastalock 块体作为一种新型生态型港口海岸防护块体, 通过降低混凝土 pH 值、多孔粗糙表面和仿照自然岩石的结构, 可以实现海岸防护结构的“碳封存”, 为港口与海岸工程建设应对气候变化提供了重要的解决方案; 通过物理模型试验, Coastalock 块体具有较好的消浪效果, 建议的

块体摆放间隙率为 10%~25%, 但在极端海洋条件下的结构稳定性及破坏机理还有待进一步研究; 通过在圣港的工程应用验证, Coastalock 块体显著促进了当地海岸生态系统的多样性; 建议进一步开展对 Coastalock 等新型块体的研究, 形成相应的设计标准及施工建造指南。

参考文献:

- [1] 孙子宇, 谢世楞, 田俊峰, 等. 离岸深水港建设关键技术[J]. 中国港湾建设, 2010(S1): 1-11.
- [2] 侯一蕾, 邢方圆, 马丽, 等. 应对气候变化与保护生物多样性协同: 全球实践与启示[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(1): 91-101.
- [3] 季则舟. 基于与环境相协调的韧性海岸工程建设策略[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(4): 830-837.
- [4] SCAPE 景观设计公司. 有生命的防波堤: 纽约沿海绿色基础设施[J]. 景观设计学, 2017, 5(4): 97-109, 96.
- [5] ECOConcrete Tech Ltd. Coastalock technical product information[R]. Tel Aviv: ECOConcrete Tech Ltd, 2021.
- [6] PERKOL-FINKEL S, SELLA I. Ecologically active concrete for coastal and marine infrastructure: innovative matrices and designs[C]//PERKOL-FINKEL S, SELLA I, ALLSOP W, et al. Proceeding of the 10th ICE Conference: from Sea to Shore - Meeting the Challenges of the Sea. London: ICE Publishing, 2014.
- [7] PERKOL-FINKEL S, SELLA I. Harnessing urban coastal infrastructure for ecological enhancement [J]. Maritime engineering, 2015, 168: 102-110.
- [8] PERKOL-FINKEL S, SELLA I. Blue is the new green: eco-engineering for climate change[J]. Marine Technology Society journal, 2019, 53(4): 7-10.
- [9] 希姆里特·芬克尔, 伊多·赛拉. 用于促进动物群和植物群生长的方法和基材: 201480021994. 3[P]. 2014-02-13.
- [10] 伊多·赛拉, 希姆里特·芬克尔, 阿迪·诺伊曼. 潮池: 201730303181. X[P]. 2017-07-11.
- [11] MOLENKAMP A. Hydraulic performance of Coastalock armour units [D]. Delft: Delft University of Technology, 2022.

(下转第 74 页)