新型生态护面块体研发与稳定性试验研究*

陶　然[1,2]，黄睿奕[3]，彭　云[1]，王文渊[1]

（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. 中国交通信息科技集团有限公司，北京 101399）

摘要：针对传统海岸护面块体生态功能薄弱的问题，研发出一种兼具高效防护与生态促进功能的新型生态护面块体。其创新核心在于通过结构性开槽设计，在维持工程安全与耐久性的同时，显著提升块体引导海洋生物附着与栖息的能力，实现了防护性能与生态效益的协同优化。通过基于重力相似准则的物理模型试验，评估块体的水动力稳定性。结果表明，块体的稳定系数 K_D 值为 10.0~14.6；在更为严苛的实际海洋环境（有效波高 H_s=11.8 m）中，块体保持稳定，K_D 可大于 24，表现出从模型到原型的显著性能提升。所提出的结构性开槽方案被证实有效，可为构建环境友好、韧性强的海岸防护工程提供新的技术路径与实践依据。

关键词：生态护面块体；稳定性分析；物理模型试验；港口防护结构；稳定系数
中图分类号：U656.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0027-07

Development and stability experimental study on novel ecological armor blocks

TAO Ran[1,2], HUANG Ruiyi[3], PENG Yun[1], WANG Wenyuan[1]

(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. China Communication Information & Technology Group Co., Ltd., Beijing 101399, China)

Abstract: To address the issue of insufficient ecological functionality in traditional coastal armor units, we develop a novel ecological armor block that integrates effective wave protection with enhanced ecological benefits. The core innovation lies in the structural groove design, which maintains engineering safety and durability while significantly improving the block's capacity to promote marine organism colonization and habitat formation, thereby achieving a synergistic optimization of protective performance and ecological value. We evaluate its hydrodynamic stability by physical model tests based on gravity similarity laws. The results indicate that the stability coefficient K_D value of blocks is 10.0−14.6. The blocks remain stable under more severe marine conditions (significant wave height H_s=11.8 m), with a K_D value exceeding 24, indicating a notable performance enhancement from model to prototype. The effectiveness of the proposed structural groove design scheme is proved, which can provide a new technical pathway and practical basis for constructing environmentally friendly and resilient coastal protection engineering.

Keywords: ecological armor block; stability analysis; physical model test; port protective structure; stability coefficient

海岸防护工程对于抵御海洋动力侵蚀、保障沿海区域安全至关重要。然而，传统护面结构（如扭王字块、四角锥体）主要侧重于水动力稳定与消能，普遍缺乏生态功能，难以满足当前对海岸基

收稿日期：2025-11-14　　**录用日期：**2025-12-18
***基金项目：**国家重点研发计划项目（2021YFB2600200）；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，正高级工程师，注册土木工程师（港口与航道工程），从事港口与航道工程新技术研究与应用工作。

水运工程

础设施环境友好性的迫切需求。为此，国内外学者研发了多种兼具防护与生态特性的护面块体，例如仿天然石材的 Ecopode™、高孔隙率的 TB-CUBE[1-2]，以及通过内部腔室提供生物庇护所的 Xbloc[3]等，见表 1。

表 1　常见的港口防护结构比较

Tab. 1　Comparison of common port protective structures

块体名称	国别	时间	简介
Tetrapod(四角锥体)	法国	20 世纪 50 年代	该块体采用双层铺置方式,主要依靠自身重力及相互之间的嵌锁效应维持整体稳定
Dolos(扭工字块)	南非	20 世纪 60 年代	该块体因混凝土用量较少且施工便捷,在当时成为广泛应用的人工护面结构,同样采用双层布置,借助块体间的钩连作用实现稳定
Accropode™	法国	20 世纪 80 年代	该块体采用单层安装方式,减少了用量,节约混凝土材料与安装工程量。该块体的研发顺应了当时学术界逐渐认同单层结构比双层更稳定的趋势
Core-Loc™	美国	20 世纪 90 年代	该块体形态细长,采用单层安放,依靠嵌固作用保持稳定,并可作为修补块体与扭工字块配合使用。相比 Accropode™ I 型,Core-Loc™ I 型在材料使用上更为经济
Ecopode™	法国	20 世纪 90 年代	作为一种环境友好型护面结构,其外观接近天然石材,适用于对海洋生态环境要求较高的水域。该块体同样为单层安装,通过块体间的钩联作用保持稳定
Xbloc	荷兰	2004 年	该块体采用单层安放,稳定性良好,主要依赖嵌锁作用维持稳定。根据 DMC 公司的方法在特定条件下进行的比较,该块体被认为是目前最节省材料的人工块体之一
Crablock[4-5]	阿联酋	2014 年	该块体的稳定系数较高,模型试验显示其在矩形规则排布条件下表现出优异的稳定性和联锁性能,可实现较高的安装密度,且规整布置较随机安放更具视觉美感
双联块体[6]	中国	2014 年	该块体具备单层稳定、制作简便等优势,已成功应用于印度尼西亚某电厂防波堤修复项目
新型块体[7]	中国	2016 年	一种适用于深水大浪条件的十字型新型消浪护面块体,该结构杆件集中、应力分布均匀、安放便捷,并具备较高的稳定性
Coastalock[8-9]	以色列	2021 年	该块体具有良好的稳定性与消浪性能,适用于多数海岸环境,有助于提升港口与海岸工程应对气候变化的能力
TB-CUBE	中国	2022 年	其消浪机理主要为波浪在上爬过程中经由孔洞进入块体间形成的消能腔室,通过产生涡漩、水体冲击与摩擦等方式耗散波能,从而实现消浪效果。该块体具有高孔隙率、优良的消浪性能、高稳定性及较高的结构强度等优点

尽管以 Ecopode™、TB-CUBE 等为代表的现有生态友好型块体在理念上具有前瞻性，但其设计路径与本文所提出的方案存在本质区别，主要体现在结构、生态与施工的协同机制上。

在结构设计与生态机制上，现有块体多依赖于仿生形态(如 Ecopode™ 模仿天然石材)或内部功能腔室(如 TB-CUBE)提供异质性表面或生物庇护所，其生态效益往往是复杂形态带来的“附带结果”。本文研发的创新核心在于“结构性开槽”的主动设计。

在施工工艺与工程可行性上，现有块体因形态复杂或存在内部空腔，常面临模板制作成本高、混凝土浇筑振捣难度大、脱模困难等挑战，影响其大规模标准化生产与经济性。本文研发的块体保留了规整的外轮廓，凹槽设计充分考虑了模具脱模的可行性。

因此，本文研发的独特性与创新性在于，并非单纯追求形态的仿生或复杂化，而是通过一种可量化、易制造、强互锁的规则开槽体系，系统性地解决了防护结构在稳定性、生态效益与施工

水运工程

经济性之间的固有矛盾，为实现海岸工程防护性能与生态功能的实质性协同提升提供了新范式。本文依托阿尔及利亚斯基克达港北防波堤工程，旨在研发一种新型生态护面块体。本文的核心创新在于提出一种结构性开槽设计理念，通过与现有生态块体差异化的路径实现性能突破。

1　新型生态护面块体设计

1.1　设计理念与目标

针对传统消浪块体生态考量薄弱、难以契合当前基础设施环保要求的问题，本文提出一种新型生态护面块体设计方案。该方案采用以增强生物附着的结构性优化设计，在保障结构安全性与耐久性的前提下，显著增强了块体引导海洋生物附着与栖息的生态功能，最终达成了防护性能与生态效益的协同优化，明确安全、耐久、生态协同优化的设计目标。新型生态护面块体设计见图 1。

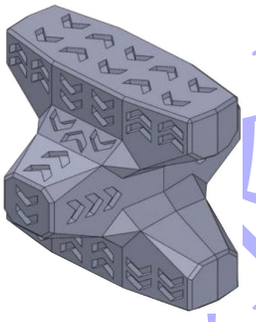

图 1　新型生态护面块体结构设计

Fig. 1　Structural design for novel eco-friendly armor block

1.2　设计优化过程

该新型生态护面块体的设计历经数轮优化，其核心优化路径如下：从初始的版本 1 开始，首先通过减少凹槽数量并增大其尺寸以降低开孔率，形成版本 2；然后，为适配模具化施工需求，取消了斜面开槽，在精简槽数的同时加深凹槽并施加角度以便脱模，得到版本 3；最后，版本 4 在版本 3 的基础上，进一步以减少凹槽数量、扩大其尺寸与深度，以及将并排凹槽改为交错布置为核心改进，从而确定了兼顾生态效能与施工便利性的最终结构形式。各版本生态护面块体槽体参数见表 2。

表 2　各版本生态护面块体槽体参数

Tab. 2　Groove parameters of different versions of ecological armor blocks

版本编号	凹槽数量/个	凹槽尺寸		凹槽深度/mm	开孔率
		长边/mm	短边/mm		
1	104	250	150	100	0. 30
2	68	300	180	100	0. 20
3	52	300	180	150	0. 23
4	30	450 350	270 210	200	0. 23

1.3　最终设计方案

在原有的 ACCROPODE™ 块体基础上进行改良设计，引入轮胎花纹的设计要素，在块体的顶面及侧面设置凹槽，增加其孔隙率和粗糙度，可以在消减波浪的同时留存一定体积的水体，既为海生物生长提供栖息环境，又为海洋生物附着提供条件。

为便于施工，进一步对生态友好型块体的开槽方式和数量进行优化。为了降低开孔率，减少凹槽数量，增大凹槽尺寸；为方便实际模具化施工，取消斜面开槽，同时减少凹槽数量，加深凹槽，并对凹槽进行角度处理，便于实际工程脱模；为了进一步减少凹槽数量，降低施工过程难度，进一步扩大了凹槽尺寸与深度，将相邻凹槽从并排布置改为交错布置，最终确定了生态友好型港口防护结构的设计形式。

2　稳定性物理模型试验

2.1　试验概况与相似准则

本文采用物理模型试验方法，依据重力相似准则，选取几何比尺为 1∶20，对新型护面块体的稳定性进行系统评估。主要试验过程与结果如下。

1）在断面水槽中开展了系统的模型试验，观测了不同波浪条件下块体的稳定性表现。试验中，块体原型质量设置为 2 t，并按规则方式进行摆放。结果显示，即使在有效波高 H_s = 3. 4 m、谱峰周期 T_p = 7. 7 s 的严苛波浪工况下，该新型块体仍保持良好的结构完整性，未出现失稳现象。

2）根据试验所确定的容许失稳率所对应的波高与块体质量参数，应用 Hudson 公式进行反演计算，最终得出该新型护面块体的稳定系数 K_D 值。

2.2　试验设备与断面制作

本文试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的波流水槽中进行。试验严格遵循 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》[10] 的相关规定，采用基于 Froude 数相似定律设计的正态模型。

试验段位于水槽中距造波机约 44 m 处，在 1 座尺寸为 69.0 m × 2.0 m × 1.8 m（长×宽×深）的波流水槽内进行。此外，为最大限度地减少波浪反射对试验结果的干扰，水槽尾端配备了消浪效率不低于 95% 的高性能消浪装置，为数据测量的准确性提供了关键保障。

依据几何相似准则，将实际护岸断面的位置、高程及反射特性精确复现于水槽中。模型制作过程包括：先抛填并分层压实堤心石，整理至设计坡面；然后铺设垫层块石并整平压实；最后按设计数量安放人工护面块体。

根据几何比尺计算试验断面的尺寸，低水位为 0.51 m，高水位为 0.58 m，试验模型比尺为 1:20，采用重力相似准则，原型与模型断面尺寸取值见表 3。

表 3　原型与模型断面尺寸取值

Tab. 3　Cross-sectional dimensions of prototype and model values

参数	原型/m	模型/mm
堤顶到堤脚高度	13.5	675
堤顶宽度	5.0	250
垫层块石厚度	1.0	50
护面底部水平部分宽度	3.214	92

2.3　试验方法与工况

试验开始时，将模型断面置于水槽中，首先采用较小波高的波浪作用使堤身密实，然后施加试验波浪要素，系统观测并记录块体的稳定状态。护面块体的失稳率按以下公式计算：

$$n = \frac{n_d}{N_1} \times 100\% \tag{1}$$

式中：n 为失稳率，%；n_d 为静水位上、下各一倍设计波高范围内失稳的块石数量，个；N_1 为静水位上、下各一倍设计波高范围内块石的总数量，个。

生态型港口护面块体结构稳定性的物理模型试验见图 2。人工护面块体的稳定性状态，依据其位移程度进行判断。试验过程中，若块体出现以下任何一种情况，则判定为失稳：1）水平位移超过其等效边长的一半；2）从坡面滑落；3）脱离初始安放位置产生跳跃。此外，在波浪持续作用下，若相邻块体之间的局部间隙扩大至边长的一半以上，也视为失稳。

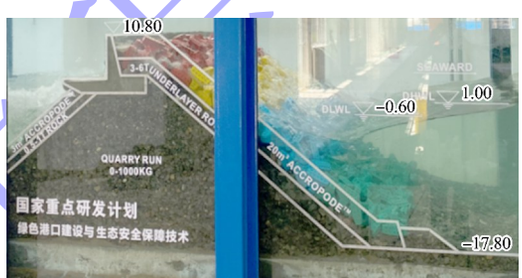

图 2　生态型港口护面块体结构稳定性物理模型试验（单位：m）

Fig. 2　Stability physical model test for ecological port armor block structure（unit：m）

针对失稳断面，需要开展重复性试验加以验证：如重复试验中块体再次失稳，则确认该断面失稳；如未失稳，则需进一步分析其波动响应特征与失稳机制。只有当所有块体在试验全过程中均未发生位移时，方可判定该断面整体稳定。

选取重现期 50、100 和 250 a，针对不同重现期下的不同水深与波浪条件分别开展试验，综合分析试验现象，结果见表 4。

由试验结果可见，在低水位情况下，原型波高 H_s 为 3.6 m、谱峰周期 T_p 为 7.7 s 时，块体失稳；在高水位情况下，原型波高 H_s 为 3.2 m、谱峰周期 T_p 为 7.7 s 时，块体失稳。

需要说明的是，本阶段物理模型试验旨在针对项目背景下的控制性波况，评估块体的临界稳定阈值。因此，试验中选取谱峰周期 T_p = 7.7 s 作为代表性条件进行集中测试。

表 4　两种水深条件下生态护面块体的稳定性响应

Tab. 4　Ecological armor block stability response under two water depths

水位类型	模型波高/m	原型波高/m	观测现象	结论
低水位	0.06	1.2	无明显位移	稳定
	0.07	1.4	无明显位移	稳定
	0.08	1.6	无明显位移	稳定
	0.09	1.8	无明显位移	稳定
	0.10	2.0	无明显位移	稳定
	0.11	2.2	无明显位移	稳定
	0.12	2.4	无明显位移	稳定
	0.13	2.6	无明显位移	稳定
	0.14	2.8	无明显位移	稳定
	0.15	3.0	无明显位移	稳定
	0.16	3.2	无明显位移	稳定
	0.17	3.4	无明显位移	稳定
	0.18	3.6	块体滑落	失稳
高水位	0.06	1.2	无明显位移	稳定
	0.07	1.4	无明显位移	稳定
	0.08	1.6	无明显位移	稳定
	0.09	1.8	无明显位移	稳定
	0.10	2.0	无明显位移	稳定
	0.11	2.2	无明显位移	稳定
	0.12	2.4	无明显位移	稳定
	0.13	2.6	无明显位移	稳定
	0.14	2.8	无明显位移	稳定
	0.15	3.0	无明显位移	稳定
	0.16	3.2	块体滑落	失稳

2.4　稳定系数反演方法

为测得稳定系数 K_D，试验条件选择在两种水位，采用不同有效波高进行试验。当块体质量一定时，逐渐增大波高，记录当块体达到临界失稳时的波高，从而可利用 Hudson 公式反推稳定系数 K_D。

由试验结果可见，在低水位情况下，模型有效波高 H_s 为 0.18 m、模型谱峰周期 T_p 为 7.7 s 时，块体失稳，稳定临界波高为 0.17 m；在高水位情况下，模型有效波高 H_s 为 0.16 m、模型谱峰周期 T_p 为 7.7s 时，块体失稳，稳定临界波高为 0.15 m。

根据容许失稳率限值下的波高和块体质量，利用 Hudson 公式反推新型护面块体的稳定系数，得出新型护面块体稳定系数 K_D 在 10.0~14.6。计算公式为：

$$K_D = 0.1\frac{\rho_b g H_s^3}{W(S_b-1)^3\cot\alpha} \tag{2}$$

$$S_b = \frac{\rho_b}{\rho} \tag{3}$$

式中：W 为单个块体稳定重力，N；ρ_b 为块体材料的密度，kg/m^3；ρ 为海水的密度，kg/m^3；H_s 为有效波高，m；α 为斜坡与水平面夹角，(°)。

3　试验结果与分析

3.1　块体稳定性表现

本文通过系统性的波浪加载试验，观测新型生态护面块体在低水位与高水位两种工况下的稳定性响应。试验采用规则安放方式，并逐步增大有效波高(H_s)，直至块体发生失稳。

试验结果表明，块体稳定性受水位影响显著。在谱峰周期 T_p = 7.7 s 的不规则波作用下，块体在低水位条件下的临界失稳原型波高为 3.6 m，而在高水位条件下，临界失稳原型波高降低至 3.2 m。这个现象与高水位时波浪作用于护面斜坡上的位置更高、破碎更剧烈有关。在达到临界波高前，块体在各级波高作用下均保持良好的整体稳定性，未发生松动或连锁破坏，证明其具有可靠的抗浪能力。

3.2　稳定系数确定

根据 Hudson 稳定性公式，通过临界失稳状态下的波高与块体重力，可反演计算该新型块体的稳定系数 K_D。计算公式如下：

$$W_{50} = \frac{\rho_r g H^3}{K_D \Delta^3 \cot\alpha} \tag{4}$$

式中：W_{50} 为护面块石稳定所需的重力中位数，N；ρ_r 为块石密度，kg/m^3；H 为设计波高，m；K_D 为块石稳定系数；α 为斜坡坡度；Δ 为块石与水的相对浮密度比，$\Delta=\rho_r/(\rho_w-1)$，其中 ρ_w 为水密度，kg/m^3。

取模型试验中观测到的临界稳定波高(即失稳前一级波高)进行计算，具体参数与计算结果见表 5。

表 5 新型生态护面块体稳定性临界试验数据及 K_D 值反演结果

Tab. 5 Critical test data and K_D value inversion results for stability of novel ecological armor block

水位条件	临界稳定状态模型波高/m	临界稳定状态原型波高/m	观测现象（本级波高）	反演稳定系数 K_D
低水位	0.17	3.4	块体无滑落或显著位移	14.6
低水位	0.18	3.6	块体开始滑落	–
高水位	0.15	3.0	块体无滑落或显著位移	10.0
高水位	0.16	3.2	块体开始滑落	–

3.3 与传统块体稳定性对比

将本文模型试验所得稳定系数（K_D = 10.0 ~ 14.6）与国内外常用单层安放护面块体的典型值进行对比，见表 6，可以对其稳定性水平进行初步评价：该新型块体的 K_D 值高于传统的扭王字块（Accropode™ I，K_D = 12 ~ 15，非破碎波条件下取低值），与其设计改进目标相符；但略低于目前国际上广泛应用的先进单层块体，如 Accropode™ II、Core-Loc™ 及 Xbloc（其 K_D 值通常≥16）。

表 6 堤身稳定系数对比

Tab. 6 Comparison of stability coefficients for embankment slopes

护面类型	安放类型	K_D	
		破碎波	非破碎波
方块 Cube	2 层	6.5	7.5
四角锥体 Tetrapod	随机 2 层	7	8
三角柱体 Tribar	规则 1 层	9	10
Stabit	随机 2 层	10	12
铁砧块 Akmon	随机 2 层	8	9
Antifer Cube	随机 2 层	7	8
扭工字块 Dolos	随机 2 层	8	13
扭王块 Accropode	随机 1 层	12	15
Accropode II	随机 1 层	16	16
Core-Loc	随机 1 层	16	16
Ecopode	随机 1 层	16	16
Xbloc	随机 1 层	16	16
Crablock	规则 1 层	16 ~ 27	16 ~ 27
双联块体	随机 1 层	20.04	20.04
新型块体	随机 1 层	22.2	22.2

稳定系数的差异主要源于设计目标的权衡：新型块体为增强生态功能而增设了结构性凹槽，这在一定程度上增加了开孔率并改变了质量分布。相较于以最优水力稳定形态为核心设计的商业块体，本文在绝对稳定性系数上做出了适当妥协，以换取显著的生态效益提升和施工便利性。稳定数（N_s）见表 7，值得注意的是，本块体在“0%破坏”等级下的表现与 Accropode、Core-Loc 等主流块体处于同一量级，进一步验证了其基本稳定性是可接受的。

表 7 稳定数

Tab. 7 Stability numbers

类型	破坏等级/%	N_s			
		堤身		堤头	
		非破碎波	破碎波	非破碎波	破碎波
Cube	0	1.5 ~ 1.7	1.5 ~ 1.7	–	–
	5	2.0 ~ 2.4	2.0 ~ 2.4	–	–
Tetrapod	0	1.7 ~ 2.0	1.7 ~ 2.0	–	–
	5	2.3 ~ 2.9	2.3 ~ 2.9	–	–
Accropode	0	2.7	2.5	2.5	2.3
Core-Loc	0	2.8	2.8	2.6	2.6
Xbloc	0	2.8	2.8	2.6	2.6
Crablock	0	2.8 ~ 3.3	2.8 ~ 3.3	2.8 ~ 3.3	2.8 ~ 3.3

4 讨论

4.1 生态设计与结构性能的权衡

凹槽设计对稳定性的影响是双重的。一方面，开孔减轻了块体在水中的有效重力，理论上可能降低其抗滑动和抗翻滚能力；另一方面，合理设计的凹槽能显著增强块体间的机械嵌锁效应，这成为稳定性提升的关键因素。物理模型试验中观测到的良好稳定性（K_D = 10.0 ~ 14.6）证实，通过优化设计，由嵌锁效应带来的稳定性增益可以补偿甚至超过因开孔导致的质量损失。

4.2 稳定系数差异的工程意义

模型试验的固有局限包括：1）比尺效应与材料相似性。模型按 Froude 数相似律设计，但混凝土的断裂韧性、表面粗糙度及细微裂纹发展难以完全相似，可能导致模型块体在极限状态下表现略偏脆弱。2）波浪条件的简化。实验室采用标准的 JONSWAP 谱模拟，而现场海况是方向谱，且常伴随水流、长周期涌浪等复杂因素，波浪对结构的真实作用力与荷载历程存在差异。3）安放方式与初始状态。模型试验采用规则安放以保障一致性，而现场为随机安放。规则安放可能无法充分激发块体间最优的嵌锁潜力。

现场性能增强的机制有：1）该块体深大的交错凹槽设计，在随机抛填后能形成极为有效的三维互锁。2）随着时间推移，海藻、贝类等生物在凹槽内大量附着生长。

4.3　工程应用验证

在阿尔及利亚斯基克达港新老北堤连接处的外侧 CH10—CH40 区间设置试验段，开展现场应用验证，安装与稳定状态见图 3，共安放 20 m^3 生态友好型港口防护结构 200 块，16 m^3 四角锥压脚 50 块。

图 3　新型生态护面块体在试验段安装与稳定状态
Fig. 3　Installation and stable condition of novel ecological armor blocks at test section

经持续监测，所有试验块体在长周期波作用下均未产生位移，稳定性良好，结合物理模型试验结果，该生态友好型港口防护结构在有效波高 H_s = 11.8 m、谱峰周期 T_p = 17 s 的波浪状况下仍保持稳定，稳定系数 $K_D \geqslant 24$。

通过现场测量护面块体临近水域生物种群数据，并经对比分析后，可以得出：1）浮游植物总数增加了 254.55%，浮游植物优势种伪菱形藻属（Pseudo-nitzschia spp）增加了 50%；2）浮游动物总数增加了 29.8%，桡足类总数增加了 42.28%，浮游动物优势种小哲水蚤（Nannocalanus minor）数量增加了 55.82%；3）鱼类总数增加了 60.98%，优势鱼类无须鳕（Merluccius merluccius）的数量增加了 37.50%，优势鱼类沙丁鱼（Sardina pilchardus）数量增加了 33.33%。

5　结论

1）通过基于重力相似准则的系统波浪试验，本文定量评估了新型生态护面块体的水动力稳定性。试验结果表明，在规则安放方式下，块体在低水位与高水位工况下的临界失稳原型波高分别为 3.6 与 3.2 m（T_p = 7.7 s）。基于 Hudson 公式反演计算，得出其稳定系数 K_D 值在 10.0～14.6，该数值表明其初始稳定性优于传统扭王字块等结构，达到了工程应用的基本要求。

2）该新型块体已在阿尔及利亚斯基克达港北防波堤试验段（桩号 CH10—CH40）成功实施。长期监测数据显示，在有效波高 H_s = 11.8 m、谱峰周期 T_p = 17 s 的极端实际海况下，所有块体均保持稳定，反算其实际稳定系数 $K_D \geqslant 24$。现场工程应用证实其了长期性能。

3）本文的核心贡献在于提出并验证了一种通过“结构性开槽”实现多重目标协同优化的新路径。

4）本文仍存在一定局限性。物理模型试验受比尺效应影响，未能完全模拟现场混凝土结构的材料特性与长期生物附着效应。

参考文献：

[1] Port engineers, ECOncrete test premier precast Coastlock installation[J]. Concrete products, 2021, 74(3): 20.

[2] 陶然, 黄睿奕, 王文渊, 等. 生态型港口海岸防护块体 Coastalock 的研究与工程应用[J]. 水运工程, 2024(5): 49-54, 74.
TAO R, HUANG R Y, WANG W Y, et al. Research and engineering application of ecological marine protective armour unit Coastalock [J]. Port & waterway engineering, 2024(5): 49-54, 74.

[3] Delta Marine Consultants. Debut of a new armoured unit for breakwaters and sea defences[J]. Maritime journal, 2004(192): 41.

[4] SALAUDDIN M, BROERE A, VAN DER MEER J W, et al. A new symmetrical unit for breakwater armour: first tests[C]//Proceedings of Coastal Structures and Solutions to Coastal Disasters 2015: Resilient Coastal Communities: Coastal Structures and Solutions to Coastal Disasters Joint Conference. Reston: American Society of Civil Engineers, 2015: 891-901.

（下转第 57 页）