



不同安放方式扭王字块体护面 稳定性试验研究

夏运强, 葛栋林, 杨 佳, 张 月, 闫志铎

(中国人民解放军 91053 部队, 北京 100070)

摘要: 针对国内外广泛使用的护面扭王字块体安放方式问题, 对比分析了国内外相关行业规定, 发现国外行业规范均规定采用随机安放方式, 而我国行业规范增加规则安放方式, 具体为队列式规则安放方式。采用波浪断面物理模型试验, 对三种常用的安放方式进行了抗浪稳定性试验验证, 发现随机安放方式抗浪稳定性最优, 其次是正反式规则安放方式, 队列式规则安放方式稳定性最差。我国现行行业规范中采用扭王字块体稳定系数 K_D 值不适用于队列式规则安放方式, 采用该值会得到偏于危险的计算结果。

关键词: 港口工程; 扭王字块体; 安放方式; 稳定性; 模型试验

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0023-07

Experimental study on armor block stability of accropode with different placement modes

XIA Yunqiang, GE Donglin, YANG Jia, ZHANG Yue, YAN Zhiduo

(No. 91053 Unit of PLA, Beijing 100070, China)

Abstract: To the problem of placement modes of accropode widely used at home and abroad, this paper compares and analyzes the relevant industry regulations at home and abroad, and finds that the foreign industry norms all stipulate the random placement mode, while the Chinese industry norms add the regular placement mode, specifically the queue-type regular placement mode. By using the wave cross-sectional physical model test, the stability test of three common placement modes is verified, and it is found that random placement mode has the best stability, followed by positive and negative regular placement mode, and queue-type regular placement mode has the worst stability. The current industry standards in our country use the K_D value of the stability coefficient for accropode, which is not applicable to the queue type regular placement mode. Using this value will result in calculation results that are biased towards danger.

Keywords: harbor engineering; accropode; placement mode; stability; model test

扭王字块体 (Accropode, 又称钩连块体)^[1] 最早由法国于 1980 年提出, 相对于四角锥体 (Tetrapod)、扭工字块体 (Dolos) 等其他常用护面块体, 它具有较高的抗浪稳定性、能够兼顾结构强度和消浪性, 单层安放施工简便和造价低等明显优势, 是世界范围内港口工程行业使用最广泛的人工护面块体^[2-5]。我国水运工程行业较早引入扭王字块体, 在

JTJ 298—1998《防波堤设计与施工规范》^[6] 里首次明确了扭王字块体的使用, 将国外 Accropode 定为 A 型, 并增加了适用于 10 t 规格以下的 B 型, 两者区别在于肢杆根部结构是否加强; 规范采用 Hudson 公式计算其稳定质量, 并明确采用随机安放方式施工。在此后两次防波堤设计规范的修订中, 延续了上述扭王字块体的类型划分, 但在 JTJ 154-1—2011

收稿日期: 2024-08-29

作者简介: 夏运强 (1971—), 男, 博士, 高级工程师, 从事港口海岸及近海工程设计和试验研究工作。

《防波堤设计与施工规范》^[7]中将稳定系数 K_D 由 18~24 统一调整为 18, 块体形状系数 c 由 1.36 调整为 1.30, 相当于增大了块体稳定质量, 并降低了块体安放密度(降低约 5%); 在现行 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[8]中, 再次减小 K_D 至 15~18, 并增加“规则安放”方式, 规定其空隙率 P' 为 40%, 随机安放方式为 50%, 理论计算规则安放块体密度较随机安放块体密度增大 20%; 另外规定规则安放和随机安放取相同的稳定系数。

现行 JTS 208—2020《防波堤与护岸施工规范》^[9]和 JTS 257—2008《水运工程质量检验标准》^[10]对扭王字块体的施工安放作出相关规定, 但较为笼统, 特别是对规则安放方式, 仅定义一种方式, 此种方式是否合适, 以及其他规则安放方式稳定性如何, 可对此开展试验研究, 对扭王字块体的科学使用提出合理化建议。

1 扭王字块安放方式

《防波堤与护岸施工规范》对扭王字块体安放规定为: 1) 扭王字安放宜采用随机安放; 当有特殊要求时, 反压平台或施工水位以上的块体也可规则安放。2) 采用随机安放时, 应按测量定位方法计算安放参数, 由下而上、分段分层、定点定量控制安放, 并应逐一调整块体姿态, 相邻块体的摆向不宜相同, 相邻块体的翼缘不宜接触平行安放。安放完成后, 应对块体的疏密情况进行检查, 发现漏放或过大空缺时应及时补充安放。3) 采用规则安放时, 应使全部块体保持两垂直杆件一端在堤坡下方、中间杆件一端在堤坡上方, 三点着地, 顺坡依次向上叠压摆放。4) 坡肩转角部位的两块扭王字块应相互勾连。5) 安放数量的偏差应控制在设计数量的 5% 以内。

《水运工程质量检验标准》规定: 1) 扭王字块体安放方式应满足设计要求, 定点定量不规则安放时, 不得有漏放和过大隆起。2) 块体安放数量偏差应控制在 5% 以内。

对扭王字块体的安放方式进行文献检索查新,

钟雄华等^[11-12]提出随机摆放、队列式规则摆放、正反式规则摆放、交错式规则摆放和混合式摆放 5 种摆放方式, 并对比分析, 提出正反式规则摆放钩连效果最好, 其次是随机摆放, 之后是队列式规则摆放, 交错式摆放最差。吴乔等^[13]总结提出目前扭王字块体主要采用的安装方式有规则安放、半规则安放、随机安放共 3 种安放方式, 其中规则安放明确为上述正反式规则摆放, 并指出最能充分发挥扭王字块优异水动力性能的安放方法是定点随机安装。王家汉^[14]将护面块体的安放方法主要分为规则安放、定点随机安放以及两者混合安放; 从实际工程中扭王字护面块体应用效果来看, 定点随机安放优于规则安放, 斜向放置优于正向放置。欧洲通用标准 *Rock Manual* 和英国标准 BS 6349 对扭王字块安放方式仅规定为随机安放, 并无规则安放方式, 指出该块体的稳定主要靠块体间的钩连(Interlocking)作用, 且对随机安放方式做出非常详细的规定, 以有效保证块体间钩连作用的发挥。

目前我国规范规定的规则安放指队列式规则安放, 国外对扭王字块体并未规定使用规则安放方式, 而均为随机安放方式。工程实例中, 青岛奥帆基地主防波堤、青岛鲁海丰海洋牧场防波堤等均采用队列式规则安放, 多数防波堤采用定点随机安放方式^[15-18]。综上, 目前扭王字块体可行的安放方式主要有 3 种, 分别为随机安放、队列式规则安放和正反式规则安放, 见图 1。具体分析其钩连效果, 随机安放方式每块块体通常与周边 4 块相互钩连, 队列式规则安放方式每块块体仅与其上下 2 块钩连, 正反式规则安放则每块块体与周边 4 块块体形成钩连。从空隙率看, 随机安放块体空隙率最大, 其次是正反式规则安放, 最小为队列式规则安放。钩连块体多代表抗浪稳定性较强, 空隙率大则对应着较好的消浪效果和较低的爬高越浪等。针对上述 3 种安放方式稳定性开展物理模型试验研究。



a) 随机安放 b) 队列式规则安放 c) 正反式规则安放

图1 扭王字块体安放方式

Fig. 1 Accropode placement modes

2 模型试验设计与制作

试验设计断面如图2所示,水深-20.0 m,为带肩台的斜坡结构,堤顶采用现浇混凝土结构,初始设计方案采用队列式规则安放5 t扭王字块体

(B型)作为护面,坡度为1:1.5,分析判断对护面结构稳定起控制作用的设计水位为4.93 m。设计波浪参数见表1,分为标准和校核2个工况,其中在标准工况基础上保持周期不变、波高增大20%为校核工况,用于检验护面结构稳定安全富余度。

表1 设计波浪参数

Tab. 1 Design wave parameters

试验工况	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	H_s/m	H/m	T/s
标准	5.29	4.31	3.65	2.28	8.35
校核	6.35	5.17	4.38	2.74	8.35

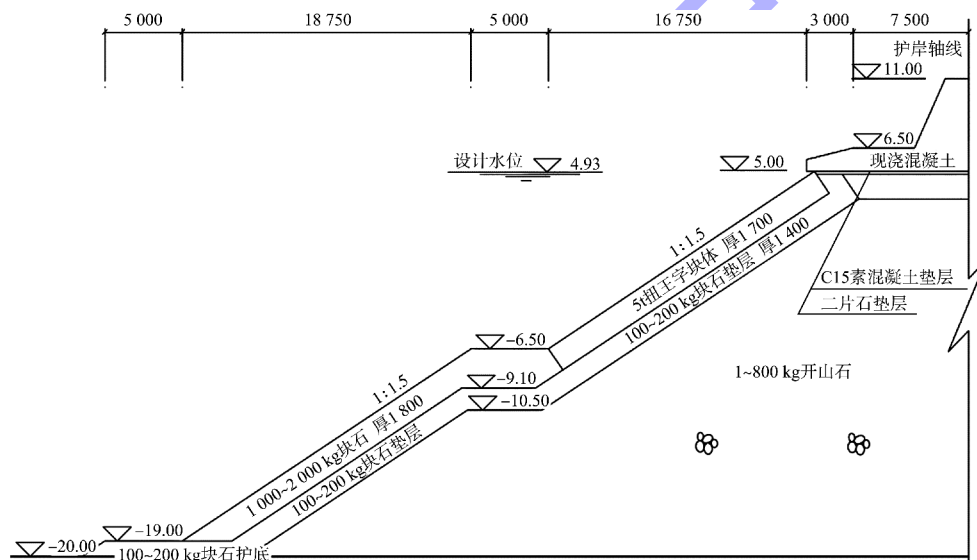


图2 试验设计断面(高程:m;尺寸:mm)

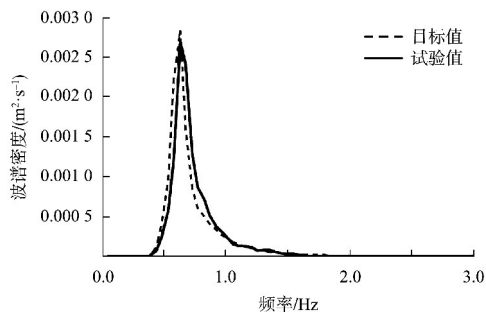
Fig. 2 Test design cross-section (elevation: m; dimension: mm)

拟采用的断面物理模型试验水槽长55 m、宽1.2 m、高1.4 m,一端配备由计算机控制的电机驱动不规则波造波机,另一端设置消波设施。同时在模型区将水槽分隔为0.8和0.4 m,宽度0.8 m的一格放置模型,进一步减少反射影响,综合可将水槽反射系数控制在10%以内。采用国内通用的“DS-30型波浪采集处理系统”收集处理波浪数据。依据现行JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》^[19],试验采用正态模型,按照重力相似准则进行模型设计。综合考虑规范要求、水深波浪条件、水槽尺度和造波机性能、仪器测量精

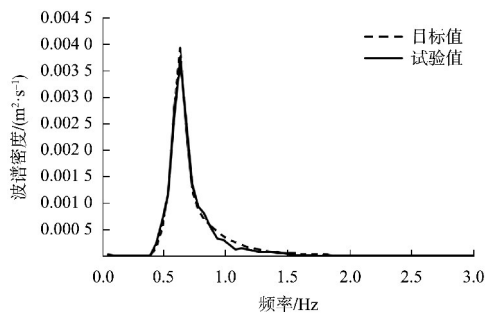
度等多方面因素,确定本项目模型长度比尺 $\lambda=40$ 。模型断面坡脚距离造波板32 m,距离水槽尾部消波设施距离16 m,满足规范规定的距离要求。波浪率定试验采用单向不规则波,谱型选用被广泛应用的改进JONSWAP谱(Goda,1999)。浪高仪布置在试验坡面中间位置,率定时严格满足规范规定的单向不规则波模拟的5条允许偏差要求,模拟结果见表2和图3,偏差均满足规范要求。断面模型制作时,堤心石、垫层石、护面块体均按重力相似准则计算分选制作,质量允许偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内,模型摆放时严格控制断面尺度和高程。

表 2 波浪率定结果
Tab. 2 Wave calibration results

试验工况	$H_{1\%}/\text{m}$		误差/ %	H_s/m		误差/ %	T/s		误差/ %
	目标值	实测值		目标值	实测值		目标值	实测值	
标准	5.29	5.44	2.84	3.65	3.74	2.47	8.35	8.24	-1.32
校核	6.35	6.53	2.87	4.38	4.39	0.23	8.35	8.45	1.20



a) $H_s=0.091\text{ m}$ $T=1.32\text{ s}$



b) $H_s=0.110\text{ m}$ $T=1.32\text{ s}$

图 3 波谱拟合
Fig. 3 Spectrum fitting

试验正式开始前,采用小波(取 50%标准波浪)连续作用约 1 000 个波,模拟风暴开始时的低能量波,使结构密实。正式试验波浪的原型持续作用时间不少于 2 h,据此计算本次试验波浪持续作用时间模型值取 20 min。按照先标准工况后校核工况的顺序开展试验。当护面出现明显失稳情况且有加大趋势时终止试验,记录波浪持续作用时间;每组至少重复 3 次,当 3 次试验的失稳情况差别较大时,增加重复次数,每次试验结构均重新摆放。

根据《水运工程模拟试验技术规范》,斜坡堤建筑物护面块体的失稳判别标准为:在波浪作用下,强度起控制作用的大型护面块体,其累积位移超过块体最大几何尺度一半时即失稳;单层随机抛放的护面块体,其位移后产生的缝隙宽度超过块体最大几何尺度一半时即失稳。

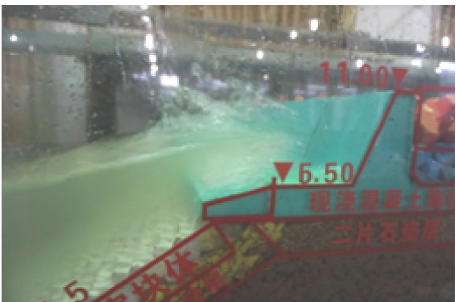
3 试验结果与分析

3.1 队列式规则安放方式

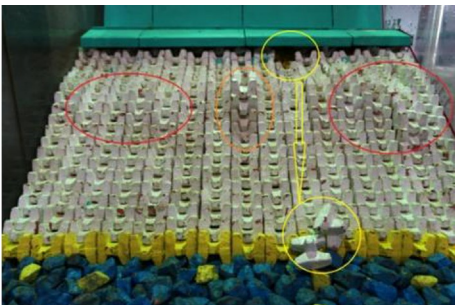
初始设计方案护面采用队列式规则安放 5 t 扭王字块体,试验中安放块体 15 列 18 排,共计 270 块,安放率为 95%。采用标准工况波浪作用约 20 min 后(原型值),护面结构发生失稳,表现为部分块体脱落和较大面积块体隆起,停止试验,试验现象见图 4。重复 3 次试验,均出现相似的失稳现象。



a) 试验前



b) 试验中

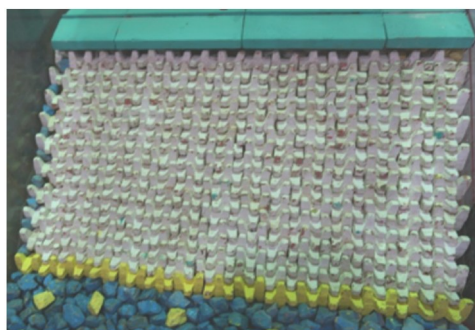


c) 试验后

图 4 队列式规则安放方式试验现象
Fig. 4 Test phenomenon of queue-type regular placement mode

3.2 正反式规则安放方式

改变护面块体安放方式为正反式规则安放,试验中安放5 t块体15列18排(将水槽壁两段空腔合为一列),共计270块,计算安放率为95%。先进行标准工况波浪测试,水位附近块体在大浪作用下局部有轻微起伏现象,但在一个台风期内并未失稳。之后进行校核工况波浪测试,块体在大浪作用下起伏现象较前者明显,但并未达到最大几何尺度一半,仍判定稳定,但试验后部分区域块体有一定隆起,对应块体和和垫层石之间出现较小空隙,见图5。



a) 试验前



b) 试验后

图5 正反式规则安放方式试验现象

Fig. 5 Test phenomenon of positive and negative regular placement mode

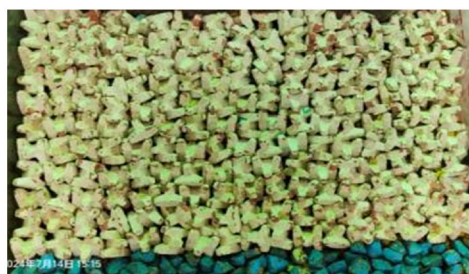
3.3 随机安放方式

改变护面块体安放方式为随机安放方式,共安放230块,计算安放率为95.5%。按标准工况和校核工况顺序进行测试,试验中个别块体有轻微

晃动现象,但均未出现脱落和隆起情况,判定护面块体均稳定。试验前后对比见图6。



a) 试验前



b) 试验后

图6 随机安放方式试验现象

Fig. 6 Test phenomenon of random placement mode

3.4 结果分析

从试验现象看,对于3种块体安放方式,随机安放方式块体稳定性最好,其次是正反式规则安放,队列式规则安放抗浪稳定性最差。大浪由波谷向波峰转换时是块体最容易失稳的时刻,此时,向下冲刷水流较大,堤内水体不能及时排出,形成负压,综合循环作用造成块体失稳。

队列式规则安放时,块体间钩连嵌固作用仅靠其上下2块块体,而左右列相邻块体仅接触但不钩连,仅提供较小的摩擦力,护面结构空隙率相对较小(约40%),护面表面相对平整,向下冲刷水流相对较大,且堤内水流及时排出较困难,形成负压较大,因此容易失稳,若一个扭王字块失稳后易使整列甚至成片护面发生连锁失稳。

正反式规则安放时,块体主要靠其四周与其有钩连作用的4个块体共同承担波浪作用,因此

其抗浪稳定性较好,但同样由于其较小的护面孔隙率和相对平整的表面,形成较大的冲刷水流和负压作用,也可能造成护面结构失稳。

随机安放时,单个块体与周围块体随机钩连,护面结构空隙率最大(50%),表面粗糙,可有效耗散湍流波浪能,冲刷水流和负压作用相对较小,一个块体轻微发生位移会有周边块体的及时移位补充,块体结构有一定的自愈功能,因此其稳定性最好。另外,随机安放方式可减少越浪和爬高,因安放密度小于规则安放密度,具有低造价的优势。

根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》(2022 版)^[20],当平均波高 H 与水深 d 比值小于 0.3 时,护面块体稳定质量计算采用 $H_{5\%}$ 。本工程 $H/d=0.09$,将 $H_{5\%}=4.31\text{ m}$ 、 $K_D=15$ 代入 Hudson 公式,计算扭王字块体稳定质量 $W=3.73\text{ t}$,理论上设计采用 5 t 扭王字块体规则安放和随机安放应均能保持稳定。本次物理模型试验表明,采用正反式规则安放和随机安放均能满足稳定要求,而队列式规则安放方式发生明显失稳现象,说明现行规范规定 K_D 值(15~18)不适用于队列式规则安放方式,应该采用更小的数值。

4 结论

1) 扭王字块体在国内外应用广泛,国外行业规范均规定采用随机安放方式,国内行业规范增加规则安放方式,具体为队列式规则安放方式。

2) 波浪断面物理模型试验表明,目前常用的 3 种扭王字块体安放方式中,随机安放方式抗浪稳定性最优,其次是正反式规则安放方式,队列式规则安放方式稳定性最差。

3) 我国现行行业规范中采用的扭王字块体稳定系数 K_D 值不适用于队列式规则安放方式,采用

该值会得到偏于危险的计算结果。建议后续可开展系统的模型试验研究,得到适合队列式规则安放方式使用的 K_D 值。

参考文献:

- [1] CIRIA, CUR, CEMEF. The rock manual: the use of rock in hydraulic engineering[M]. 2nd ed. London: CIRIA, 2007.
- [2] 白银战,庄正勇.港口工程中扭王字块应用标准的比较[J].水运工程,2005(11):36-39.
BAI Y Z, ZHUANG Z Y. A comparison of applied standards of accropode in port engineering[J]. Port & waterway engineering, 2005(11):36-39.
- [3] 薛瑞龙,王福强,王玉平.海外常用护面块体选型及设计[J].中国港湾建设,2014,34(12):42-46.
XUE R L, WANG F Q, WANG Y P. Selection and design of overseas popular armor blocks[J]. China harbour engineering, 2014, 34(12):42-46.
- [4] 王依娜,周加杰,陈松贵,等.人工护面块体实验室安放规律研究[J].水利科技与经济,2018,24(6):90-94.
WANG Y N, ZHOU J J, CHEN S G, et al. The study of artificial armour blocks placed in the laboratory[J]. Water conservancy science and technology and economy, 2018, 24(6):90-94.
- [5] 许松乔,钟政.斜坡堤人工护面块体特性分析[J].水运工程,2022(8):1-8.
XU S Q, ZHONG Z. Characteristics of artificial armour units on mound breakwaters[J]. Port & waterway engineering, 2022(8):1-8.
- [6] 防波堤设计与施工规范:JTJ 298—1998[S].北京:人民交通出版社,1998.
Code of design and construction of breakwaters:JTJ 298-1998[S]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [7] 防波堤设计与施工规范:JTS 154-1—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
Code of design and construction of breakwaters: JTS 154-1-2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.

- [8] 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Code of design for breakwaters and revetments: JTS 154—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [9] 防波堤与护岸施工规范: JTS 208—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
Code of construction for breakwaters and revetments: JTS 208—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [10] 水运工程质量检验标准: JTS 257—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
Standard for quality inspection of port and waterway engineering construction: JTS 257—2008[S]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [11] 钟雄华, 林登荣, 陈国平, 等. 波浪作用下扭王字块体稳定性研究[J]. 水运工程, 2016(8): 55-60.
ZHONG X H, LIN D R, CHEN G P, et al. Stability of accropode under wave actions [J]. Port & waterway engineering, 2016(8): 55-60.
- [12] 钟雄华, 陈国平, 严士常, 等. 不同摆放方式扭王字块体稳定性研究[J]. 水道港口, 2016, 37(5): 479-483.
ZHONG X H, CHEN G P, YAN S C, et al. A stability analysis of different stack types of accropode[J]. Journal of waterway and harbor, 2016, 37(5): 479-483.
- [13] 吴乔, 赵瑞东, 邓涛. 扭王字块随机安放细则[J]. 水运工程, 2019(2): 170-176.
WU Q, ZHAO R D, DENG T. Detail rules of random placement for Chinese pde [J]. Port & waterway engineering, 2019(2): 170-176.
- [14] 王家汉. 斜坡堤护面块体安放及稳定性数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2021.
WANG J H. Numerical simulation of placement and stability of armor units on rubble mound breakwater[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [15] 沈雪松. 大型扭王字块施工技术[J]. 水运工程, 1998(2): 32-34.
SHEN X S. Construction technique of large-scale accordpod[J]. Port & waterway engineering, 1998(2): 32-34.
- [16] 杨志雄, 王炜. 防波堤护面扭王字块定点安放工艺[J]. 水运工程, 2002(6): 79-80.
YANG Z X, WANG W. Fixed-point placing technology for breakwater pavement accropodes[J]. Port & waterway engineering, 2002(6): 79-80.
- [17] 杨会利, 刘海成, 陈汉宝. 扭王字块护岸破坏修复方法波浪稳定性试验研究[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(4): 43-47.
YANG H L, LIU H C, CHEN H B. Experimental study on stability of repaired and reinforced accropode revetment under wave action[J]. China harbour engineering, 2019, 39(4): 43-47.
- [18] 刘帅. 双层扭王字块在天津港某防波堤工程中的应用[J]. 水运工程, 2023(S2): 104-108.
Liu Shuai. Application of double-layer accropode blocks in a breakwater project in Tianjin Port [J]. Port & waterway engineering, 2023(S2): 104-108.
- [19] 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社, 2021.
Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231—2021[S]. Beijing: China Communications Press, 2021.
- [20] 港口与航道水文规范: JTS 145—2015(2022 版)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145—2015(2022 Ed.) [S]. Beijing: China Communications Press, 2016.

(本文编辑 赵娟)