

深水防波堤新型消浪护面块体开发 及其性能参数测试研究

戈龙仔^{1,2,3}, 高峰^{1,2,3}, 陈汉宝^{1,2,3}

(1. 交通运输部 天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 港口水工建筑技术国家工程实验室, 天津 300456;
3. 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘 要:通过总结国内外人工块体实例,遵循块体设计的消浪性、稳定性与施工便利性三大原则,结合深水防波堤的环境特点和对分析现有块体优点,开发出了一种适合深水大浪条件下的十字型新型消浪护面块体。针对新块体,试验测试了其性能设计参数,且利用工程上现有的应用广泛的扭王字块体与新型块体进行比较分析,进一步阐述了新块体的优劣性;另外,新块体通过申请已获得国家知识产权局颁发的实用新型专利证书,并成功应用于交通运输部天津水运工程科学研究所大比尺波浪水槽消浪段。新块体的成功开发对增强我国在深水港口建设中新技术的开发能力,以及保障工程安全、降低工程造价和生态环境建设方面具有较大的促进作用,将来开展涉外项目过程中受块体专利权的限制影响条件下,可供参考选择。

关键词:深水防波堤;消浪护面块体开发;十字型新型块体;参数测试;试验手段

中图分类号:U656.2

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2020)03-0204-09

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2020.03.006

引用格式:GE L Z, GAO F, CHEN H B. New shaped wave dissipating and armor block for deepwater breakwater and its performance parameter testing[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(3): 204-212. 戈龙仔, 高峰, 陈汉宝. 深水防波堤新型消浪护面块体开发及其性能参数测试研究[J]. 海岸工程, 2020, 39(3): 204-212.

近年来随着我国港口建设的快速发展,近岸优良海岸线资源日趋枯竭,港口建设的选址不得不向深水迈进,天然水深超过 20 m 的港口选址情况不断增多。外海水深越深,伴随着的风、浪、流影响往往也就越大,从而可能导致防波堤的护面块体直接面对更大外海波浪冲击而破碎,波能在其表面集中释放,易出现块体滚落或断裂现象。对于深水防波堤的设计,柳玉良等^[1]提出在水深 20 m 及其以深水域,需设计安全性和耐久性较好的斜坡式结构;王美茹^[2]在波浪作用下深水斜坡堤和深水直立堤结构选型等某些关键性技术问题方面提出了相应建议;柳玉良^[3]提出,在深水条件下按照现行行业规范确定的稳定重量往往偏轻,需要加大重量;李炎保等^[4]统计国内外防波堤损坏原因得到不同条件块体失稳形式的概率;李贺青和柳玉良^[5]提出了深水防波堤不同位置护面块体重量取值问题的建议。通过对以往的相关研究资料统计分析可知,较浅水情况,深水护面块体尺寸和结构构造的尺寸会随深度增加,设计的结构断面用料也会大幅增加。外侧防护主要表现在块体重量增加,一般将超过 20×10^3 kg,如中国石油和委内瑞拉石油公司广东石化 $2\,000 \times 10^7$ kg/a 重质原油加工工程原油码头工程护面块体采用了 63×10^3 kg 扭王字块,有些工程扭王字块用量甚至达到 70×10^3 kg 以上,如日本和韩国在防波堤工程中都有应用 80×10^3 kg 的 SeaLock 块体和 100×10^3 kg 的 Dimple 块体的实例。另外,深水防波堤的建造及破坏案例证明,往往是由于最外层护面块体丧失了护坡功能,而最终导致整个防波堤破坏。在 20 世纪 70 年代建造的世界最大水深 50 m 的葡萄牙锡尼斯港斜坡式堤,其主堤

收稿日期:2019-11-12

资助项目:天津市科技服务科技重大专项——沿海港口特大风浪监测预警系统开发研究(16ZXFWGX00050);对发展中国家科技援助项目——东盟国家港口与航道建设技术培训基金(KY201601001);中央级科研院所基本科研业务费资助项目——港口防灾减灾预警系统的开发及应用(TKS160205)和深水重力式网箱水弹性响应研究(TKS160302)

作者简介:戈龙仔(1977-),男,副研究员,硕士,主要从事港口航道及近海工程方面研究. E-mail: gelongzai@163.com

(王佳实 编辑)

在 1978 年 2 月的一次风暴潮期间受到了严重破坏,之后又分别于 1978 年 12 月和 1979 年 2 月被风暴潮袭击造成了更加严重的破坏,调查发现均是由于 Dolos 块体护面断裂、缺失,最后上部胸墙基底被淘空后,发生倾倒坍塌。修复该堤时,在原破坏断面基础上,将内、外坡度放缓,改为铺设 $90 \times 10^3 \text{ kg}$ 槽形和锥形混凝土方块。

综上所述,对于外海深水防波堤建设,为保证防波堤稳定性,采用重量大和自身结构稳固的消浪护面块体已成为必然趋势,因此交通运输部对“新型深水防波堤结构型式与消浪块体稳定性研究”基础研究项目开展专题研究,提出结合深水防波堤的环境特点,遵循块体设计中的消浪性、稳定性与施工便利性三大因素,开发了一种适合深水大浪条件下的新型护面消浪块体。结合这一研究专题,在考察国内外常见块体形状演变规律及对现有块体在外观、经济性和稳定性对比分析的基础上,最终提出新块体开发的思路。针对新块体开展了包括主要性能参数、失稳和消浪机理等物理模型试验研究,并通过与现有扭王字块的全方位对比,分析了新块体在工程领域的应用前景。

1 新块体提出思路

在开发新型块体选型前,首先对已用人工护面块体的发展过程及现状应用情况分别进行调查和统计,参考以往研究成果,朴正等^[6]对不同类型常用人工块体的发展过程做了简要的回顾和介绍;薛瑞龙等^[7]针对涉外项目常用的人工护面块体分别从稳定性、经济性、强健性、环保性和外观性等方面进行了统计对比分析进行阐述;王美茹等^[8]重点介绍一种用于直立式岸壁的新型消浪块体,并对其结构特点、适用条件、消波原理、消波效果以及和天力消波块的对比试验结果进行分析。基于调研统计分析得出,块体的稳定性和经济性是衡量块体主要指标,为了找出新块体开发思路,因此首先对原有块体其经济性和稳定性进行对比分析,找出以往块体的优缺点,为新开发块体选型提供参考指导。护面块体层所需人工块体数量(N)和混凝土总量(Q)在工程上对工程材料和施工周期有很大的影响,块体数量越多,护面层部分的施工周期越长;反之,则施工周期越短,是工程上确定是否采用该块体影响因素,为经济性方案衡量的重要指标;稳定性指标即采用选取相同波高作用下,所需块体的稳定重量大小进行衡量。本研究利用现有常用的四角锥体、扭工字块、扭王字块、Core-Loc 和 Xbloc 块体,采用《防波堤与护岸设计规范》(JTS 154—2018)^[9]中规定的如下公式进行计算对比分析:

$$N = An'c(1 - P') \left(\frac{0.1\gamma_b}{W} \right)^{2/3}, \quad (1)$$

$$Q = N \frac{W}{0.1\gamma_b}, \quad (2)$$

$$W = 0.1 \frac{\gamma_b H^3}{K_D (S_b - 1)^3 \cot \alpha}, \quad (3)$$

式中: N 为人工块体个数; Q 为人工块体混凝土用量(m^3); W 为单个块体的稳定重量($\times 10^3 \text{ kg}$); $S_b = \frac{\gamma_b}{\gamma}$, 其中, γ 为水的重度(kN/m^3), γ_b 为块体重度(kN/m^3); n' 为护面块体的层数; c 为块体形状系数; P' 为护面块体层的空隙率; K_D 为块体稳定系数,即稳定性; A 为块体所占面积; H 为设计波高; α 为斜坡与水平面的夹角($^\circ$)。

根据式(1)~式(3)计算得出单个块体的稳定重量(W)、混凝土总量(Q)以及与设计波高(H)的关系见图 1。由图 1a 可见,在护面块体重量相同的条件下,四脚锥体所需的混凝土用量最多,Xbloc 块体的混凝土用量最少,扭王字块略大于 Xbloc 块体的混凝土用量。由图 1b 可见,设计波高相同条件下,所需稳定重量四脚锥体最大,扭王字块最小,Xbloc 块体略大于扭王字块。从经济性和稳定性来看,Xbloc 块体和扭王字块均属于一种稳定性较好且经济的人工护面块体。另外结合本次新开发块体将应用深水又大浪条件,与浅水防波堤的不同,其深水防波堤的断面设计有明显的坡脚、斜坡、钱台和坡顶,因此需考虑该块体对坡脚的适应性、斜坡最多块体的个数和相互咬合的特性。由于大块体本身结构应力也相应增加,则在形状上需考虑设计得更粗壮,即周围支撑的杆件尽可能短而粗。

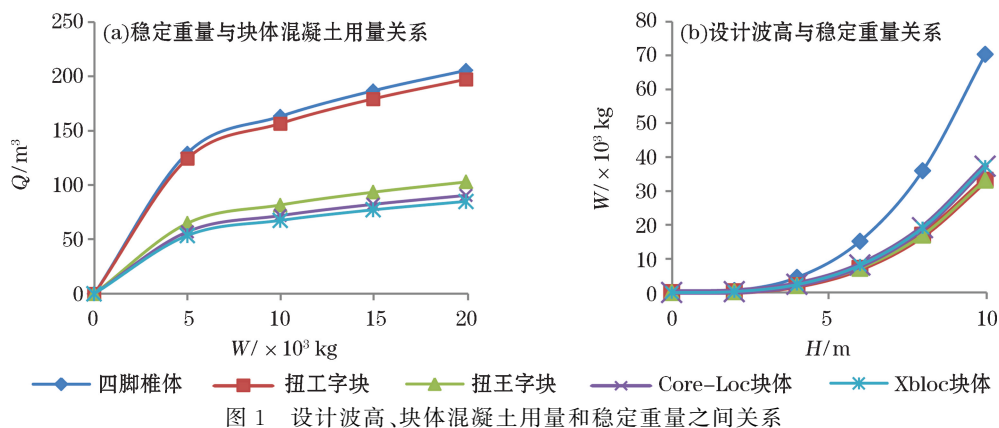


图 1 设计波高、块体混凝土用量和稳定重量之间关系

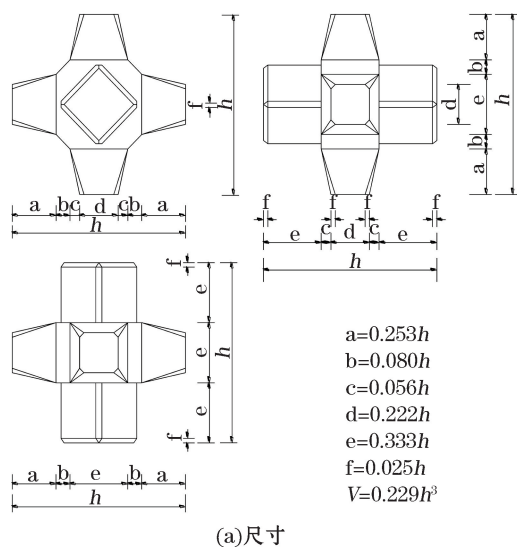
Fig.1 Relationship among designed wave height, volume of block concrete and stable weight

结合上述关于现有块体经济性和稳定性对比分析结果,提出新开发的人工块体在现有 Xbloc 块体与扭王字块相结合基础上进行改良的思路。以 Xbloc 块体为主体,将 Xbloc 块体在施工时块体安装过程易破损尖角 4 个腰杆置置换与扭王字块杆件的台体状;中间竖杆保持不变,但为了使新块体在平面上三点着地的特性,仅将中间竖杆绕中轴转 45° ;另外为了使新块体杆件集中应力均匀分散,则对新块体每条边进行倒角处理。新块体在工程应用上的安放方式,仍与扭王字块相同即规则和随机摆放两种,具体演变见图 2。新开发人工块体结构尺寸之间关系见图 3,由图 3 结构尺寸,计算得到新块体体积为: $V=0.229h^3$ (h 为块体高度)。将新开发块体和现有常用体积进行对比,结果见表 1。

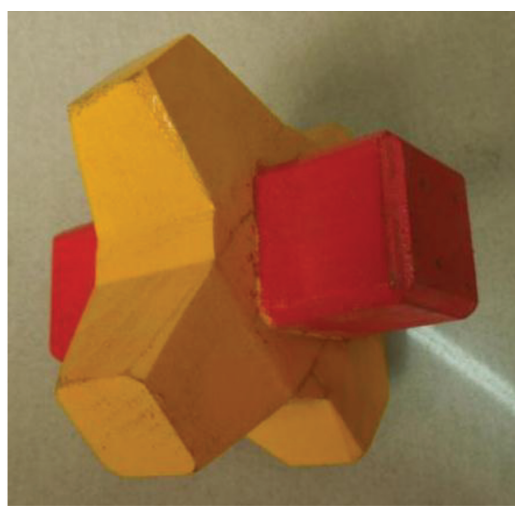


图 2 新块体改良演变过程

Fig.2 Improving process of new type block



(a)尺寸



(b)结构

图 3 新开发块体结构和尺寸

Fig.3 Structure and dimensions of the new type block

表 1 新开发块体与现有块体体积统计
Table 1 Volume statistics of the new type block and the existing blocks

要 素	现有块体					新块体
	扭工字块		扭王字块		Xbloc 块体	
	A 型	B 型	A 型	B 型		
V/m^3	$0.142h^3$	$0.160h^3$	$0.330h^3$	$0.265h^3$	$0.333h^3$	$0.229h^3$

2 新开发块体性能参数测试

按照《防波堤与护岸设计规范》(JTS 154—2018)^[9]规定,块体的设计性能参数主要包括:形状系数(c)、块体空隙率(P')(%)、人工块体个数(N)、人工块体混凝土总量(Q)、块体稳定系数(K_D)(即稳定性)以及块体糙渗系数(K_Δ)(即消浪效果)。

为了对新型块体上述各参数模型进行测试,分别制作了 60,90,120 和 150 g 四种不同重量护面块体,试验时块体摆放方式与扭王字块相同。

综合考虑试验场地限制、造波机能力,以及在波浪(短周期和长周期涌浪)作用下护面块体较大失稳率等因素,参照《波浪模型试验规程》(JTJ/T 234—2001)^[10],具体研究试验条件为:一、试验水位:模型试验水位(d)选择 0.25,0.35 和 0.45 m 三种;二、试验波浪:考虑造波能力和试验堤顶不越浪,以及设计波高作用下允许块体失稳等条件,因此波浪试验周期($\overline{T}$)选择 1.0,1.3,1.6 和 1.9 s 四种,试验波要素采用不规则波试验,频谱采用 JONSWAP 谱($\gamma=3.3$),有效波高(H_s)采用 0.07~0.25 m 的范围,从 0.07 m 逐步增加(表 2)。

表 2 模型试验条件
Table 2 Model test conditions

d/m	$\overline{T}/\text{s}$	H_s/m	H/L
0.25	1.3	0.07,0.09,0.11,0.12,0.13,0.15,0.17,0.19	1/30~1/40
	1.6	0.07,0.09,0.11,0.12,0.13,0.15,0.17,0.19,0.21,0.23	1/35~1/10
0.35	1.0	0.07,0.08,0.09,0.10,0.11,0.12,0.13,0.14,0.15,0.17,0.19	1/25~1/5
	1.3	0.07,0.09,0.11,0.12,0.13,0.15,0.17,0.19	1/30~1/10
	1.6	0.07,0.09,0.11,0.12,0.13,0.15,0.17,0.19,0.21,0.23	1/40~1/12
	1.9	0.07,0.09,0.11,0.12,0.13,0.15,0.17,0.19,0.21,0.23,0.25	1/50~1/15
0.45	1.3	0.07,0.09,0.11,0.12,0.13,0.15,0.17,0.19	1/35~1/12
	1.6	0.07,0.09,0.11,0.12,0.13,0.15,0.17,0.19,0.21,0.23	1/45~1/13

2.1 新块体形状系数(c)值测定

对于新开发人工块体形状系数(c)值,可依据《防波堤与护岸设计规范》(JTS 154—2018)^[9]中护面块体厚度计算公式进行计算:

$$c = h \cdot \frac{1}{n'} \left(\frac{0.1\gamma_b}{W} \right)^{1/3} \quad (4)$$

当测出块体厚度(h)和块体重量(W)后,返求可以得出形状系数(c)值。具体过程:将 60,90,120 和 150 g 四种不同重量护面块体安放至断面上,断面位置见图 4,在断面的斜坡不同位置进行多次 h 值测量,结果见表 3,最后取 4 组测试结果进行 c 值计算,取平均值 $c=1.40$ 。

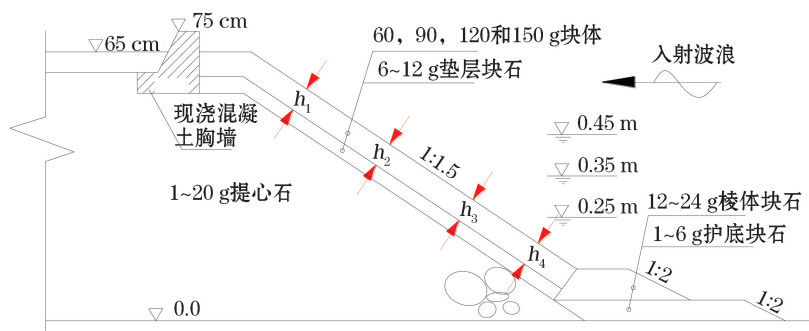


图4 试验断面斜坡位置块体厚度测量

Fig.4 Measurement of block thickness at section slope

表3 新块体形状系数(c)值计算结果Table 3 The shape coefficient (c) of the new type block

项 目	块体重量			
	60 g	90 g	120 g	150 g
h_1/cm	4.3	4.5	5.6	5.6
h_2/cm	4.2	5.0	5.5	5.7
h_3/cm	3.8	4.6	5.3	5.8
h_4/cm	4.5	4.6	5.0	5.5
$\bar{h}/\text{cm}$	4.20	4.68	5.35	5.65
c	1.40	1.37	1.42	1.39
$\bar{c}$	1.40			

2.2 人工块体个数(N)测定

与形状系数(c)值测量方法相同,将新块体直接在模型上随机摆放,测量一定面积上的数量,然后再将模型上测得结果按假定试验比尺分别反推至原体上人工块体数(N)和混凝土用量(Q)。新块体在不同坡度的断面上所摆放的新块体重量(W)与人工块体个数数量(N)关系见图5。

2.3 新块体空隙率(P')测定

根据式(1)及2.2节测得 N 和 c ,以及4种(60,90,120和150 g)模型设计不同 W ,进行返求得到空隙率(P')值分别为56.08%,52.55%,53.45%和49.68%,取其平均值得到新块体空隙率为53.3%。

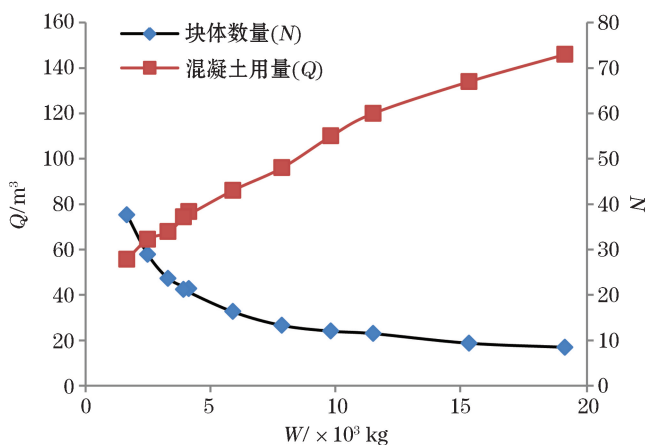


图5 新块体重量与人工块体个数、混凝土用量之间关系

Fig.5 Relationship between the new block weight and the block numbers placed, the volume of block concrete

2.4 新块体混凝土用量(Q)测定

利用 2.2 节测得新人工块体个数(N)和公式(2),进行返求得到新块体重量(W)与混凝土用量(Q)的关系(图 5)。

2.5 新块体稳定系数(K_D)测定

利用式(3),在已知 H 和 W 时,采用设计断面(图 3)进行测试:利用模型设计的 60,90,120 和 150 g 四种重量块体,不同水位波高组合作用,记录不同工况下的块体失稳率(n);稳定性的判定标准采用《波浪模型试规程》(JTJ/T 234—2011)^[10]中对扭王字块的同样要求,从而返求得到 K_D 值(表 4),统计临界稳定时, K_D 值为 22.2~63.6,为安全取 $K_D=22.2$ 。

表 4 新块体稳定系数(K_D)试验结果
Table 4 Results from the test of stability coefficient (K_D) value of the new type block

试验波要素	块体重 60 g		块体重 90 g		块体重 120 g		块体重 150 g	
	$n/\%$	K_D	$n/\%$	K_D	$n/\%$	K_D	$n/\%$	K_D
$H_s=0.11\text{ m}, \bar{T}=1.6\text{ s}$	0	17.2	0	5.7	0	4.3	0	3.4
$H_s=0.13\text{ m}, \bar{T}=1.6\text{ s}$	0	28.5	0	9.5	0	7.1	0	5.7
$H_s=0.15\text{ m}, \bar{T}=1.6\text{ s}$	临界稳定	43.7	0	14.6	0	10.9	0	8.7
$H_s=0.17\text{ m}, \bar{T}=1.6\text{ s}$	0.59	63.6	0	21.2	0	15.9	0	12.7
$H_s=0.19\text{ m}, \bar{T}=1.6\text{ s}$	0.89	88.9	临界稳定	29.6	临界稳定	22.2	0	17.8
$H_s=0.21\text{ m}, \bar{T}=1.6\text{ s}$	2.16	120.0	0.73	40.0	0.79	30.0	临界稳定	24.0
$H_s=0.23\text{ m}, \bar{T}=1.6\text{ s}$	3.98	157.6	1.38	52.5	1.84	39.4	0.39	31.5
$H_s=0.11\text{ m}, \bar{T}=1.9\text{ s}$	0	17.2	0	5.7	0	4.3	0	3.4
$H_s=0.13\text{ m}, \bar{T}=1.9\text{ s}$	0	28.5	0	9.5	0	7.1	0	5.7
$H_s=0.15\text{ m}, \bar{T}=1.9\text{ s}$	0	43.7	0	14.6	0	10.9	0	8.7
$H_s=0.17\text{ m}, \bar{T}=1.9\text{ s}$	临界稳定	63.6	0	21.2	0	15.9	0	12.7
$H_s=0.19\text{ m}, \bar{T}=1.9\text{ s}$	0.27	88.9	0	29.6	0	22.2	0	17.8
$H_s=0.21\text{ m}, \bar{T}=1.9\text{ s}$	1.78	120.0	临界稳定	40.0	临界稳定	30.0	0	24.0
$H_s=0.23\text{ m}, \bar{T}=1.9\text{ s}$	3.68	157.6	0.46	52.5	0.27	39.4	临界稳定	31.5
K_D	统计临界稳定时, K_D 值为 22.2~63.6; 为安全,取 $K_D=22.2$							

2.6 新块体糙渗系数(K_Δ)测定

通过测量新块体糙渗系数(K_Δ)来掌握其消浪效果,具体方法为通过测量波浪在块体的表面爬高大小,测试试验分别在其迎浪侧面安放不透混凝土板和新块体两种不同材质试验断面,测试在相同波浪作用下爬高结果,试验过程中始终保持堤顶无越浪。对于不透混凝土板,由《港口与航道水文规范》(JTS 145—2015)^[11]可知其糙渗系数 $K_\Delta=1.000$,因此新块体糙渗系数(K_Δ)即为相同波浪作用下新块体试验断面波浪爬高结果与不透混凝土板试验断面波浪爬高结果的比值(表 5),取上述计算结果平均值得到新块体糙渗系数 $K_\Delta=0.513$ 。

表 5 新型块体糙渗系数(K_{Δ})测试结果

Table 5 Results from the tests of roughness coefficient (K_{Δ}) of the new type block

试验波要素	爬高值/m		糙渗系数		
	混凝土板	新块体	混凝土板	新块体	
				实测值	平均值
$H_s=0.15\text{ m}, \bar{T}=1.3\text{ s}$	0.152	0.080	1.000	0.526	0.513
$H_s=0.17\text{ m}, \bar{T}=1.3\text{ s}$	0.192	0.095	1.000	0.495	
$H_s=0.19\text{ m}, \bar{T}=1.3\text{ s}$	0.213	0.115	1.000	0.540	
$H_s=0.13\text{ m}, \bar{T}=1.6\text{ s}$	0.140	0.068	1.000	0.486	
$H_s=0.15\text{ m}, \bar{T}=1.6\text{ s}$	0.195	0.100	1.000	0.513	
$H_s=0.17\text{ m}, \bar{T}=1.6\text{ s}$	0.250	0.130	1.000	0.520	

3 新开发块体与传统护面块体对比分析及应用

经各种护面块体工程应用统计情况可知,扭王字块是目前国内外常用、公认性能较好的一种单层安放块体,对此选择与其进行对比分析(表 6)。由表 6 可见,1)在节约工程造价的经济方面,新块体优于扭王字块;2)在块体对波浪消浪效果方面,两者相差不大;3)从 2 种块体安装的难易程度上看,根据安装工人反馈,新块体优于扭王字块;4)在涉外工程项目中,从专利权的限制等方面考虑,新块体有优势。因此,从实验室测试对比来看,新块体略优于扭王字块,这也充分体现出新开发块体为结合扭王字块和 XBLOC 优点改良的结果。

表 6 新块体与传统扭王字块对比

Table 6 Comparison between the new type block and the traditional Accropode

对比类别	新开发块体	扭王字块体	分析总结
外观形状	各支杆均集块体中心	两侧支杆分布于端部	由两者外形结构来看,新块体肢杆所受应力分布均匀性优于旧块体
块体体积	$0.229h^3$	$0.330h^3$	在相同重量条件下,由于新块体体积小于旧块体,则新块体杆件长度 h 大,护面块体数量少,有利于加快施工进度
形状系数值	1.40	1.30	消浪性能对比,新块体略优于旧块体
空隙率/%	53.30	50.00	有利于加速波浪消减
安放数量	24.54	30	由于新块体混凝土用量少于旧块体
护面层的混凝土用量/ m^3	106.70	130.43	约 18.2%,有利于降低工程造价
糙渗系数	0.494	0.470	糙渗系数,新块体优于旧块体,有利
堤前反射系数	1.36	1.32	减少波浪爬高和越浪
稳定系数	22.0	18.0	在相同入射波高作用下,新块体稳定性略好于旧块体
安放难易程度	容易随机摆放,在模型断面上,块体无论怎么安放,块体很容易 3 个点着地而安放稳定,且中间杆迎着入射波浪,有利于波浪破碎	容易随机摆放,由现场施工经验可知,块体的一半杆件与垫层接触,相邻的扭王字块体摆放姿势不能相同	从模型摆放情况来看,新型消浪块体优于扭王字块。但扭王字块安放已有丰富的现场工程经验
涉外工程使用情况	不受专利限制	受专利限制	涉外工程使用时,在受专利限制国家和地区新块体优于扭王字块

综上所述,新型块体开发是在了解国、内外已有成熟产品和整理相关研究成果的基础上,通过理论分析和试验研究系统论证的成果,目前块体已成功应用于实际工程上,这为下一步推广与应用提供了科学依据,且自主研发新型块体结构有助于提高交通水运行业的整体实力,也为提升我国沿海深水港口的建设水平和防灾减灾能力提供支撑。由于工程具有复杂性,非常必要进一步完善新开发块体在已建成或在建的港口工程防波堤与护岸上应用回访和跟踪制度,结合原型观测结果与试验研究成果,建立完整人工护面块体研究与应用的数据库,充分发挥新开发块体在保护堤坝稳定和消浪等方面应有的功能,为节省工程投资和工程顺利完成提供保障。

4 结 论

针对深水防波堤建设中对保证防波堤稳定至关重要的消浪护面块体问题,经过对不同类型常用人工块体的经济性和稳定性对比分析,结合深水防波堤的环境特点,提出了一种基于现有块体改良的十字型新型消浪块体。对新块体主要设计参数、失稳和消浪机理开展了试验研究,同时将新型块体与现有扭王字块体进行多方面比较,得到主要结论如下:

1)通过物理模型试验研究确定了新开发块体的性能设计参数,包括:形状系数(c)和块体空隙率(P')、人工块体个数(N)和混凝土用量(Q)与单个块体的稳定重量(W)关系,稳定系数(K_D)以及糙渗系数(K_Δ)。

2)将新块体与传统扭王字块护面块体对比,进一步验证了其具有一定的优越性,新开发块体已获得国家知识产权局颁发的实用新型专利证书,并成功应用于交通运输部天津水运工程科学研究所大比尺波浪水槽消波段。

由于目前新块体仅获得了实验室试验成果,因此在工程应用上,新型块体的应用成功与否,还有待于经受更多试验的检验,如考虑波浪方向影响的三维稳定试验等,甚至是原型现场的试验。因此在此次研究的基础上,今后将进一步深入开展相关试验研究,并争取通过工程实践来证明其性能,使其更具普遍性和应用推广价值。

参考文献(References):

- [1] LIU Y L, YANG H Q, SHEN R J. Determination of stable weight armour blocks for a deep-water inclined breakwater[J]. Coastal Engineering, 2007, 26(1): 48-51. 柳玉良, 杨洪旗, 沈如军. 大水深斜坡堤护面块体稳定重量的确定[J]. 海岸工程, 2007, 26(1): 48-51.
- [2] WANG M R. Inquiry on design method for deep-water breakwater[J]. Port Engineering Technology, 2010, 47(3): 1-7, 41. 王美茹. 深水防波堤设计方法初探[J]. 港工技术, 2010, 47(3): 1-7, 41.
- [3] LIU Y L, LI H C, TANG X N, et al. Experimental study on structure types and armor block stability of deepwater mound breakwaters [J]. China Harbour Engineering, 2013(1): 28-30, 40. 柳玉良, 李贺青, 唐筱宁, 等. 深水斜坡式防波堤结构形式及护面块体稳定性试验研究[J]. 中国港湾建设, 2013(1): 22-24, 40.
- [4] LI Y B, WU Y Q, JIANG X L. A review of the development of research of breakwater failures at home and abroad[J]. China Harbour Engineering, 2004(6): 53-56. 李炎保, 吴永强, 蒋学炼. 国内外防波堤损坏研究进展评述[J]. 中国港湾建设, 2004(6): 53-56.
- [5] LI H Q, LIU Y L. Study on deepwater breakwater from stability of armor blocks[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(6): 1-5. 李贺青, 柳玉良. 从护面块体稳定性论深水防波堤[J]. 水运工程, 2014(6): 1-5.
- [6] PU Z, MA X Z, DONG G H. Development and application of irregular artificial face protection block on sloping building[J]. China Water Transport (Second Half of the Month), 2013, 13(7): 298-300. 朴正, 马小舟, 董国海. 斜坡式建筑物上异形人工护面块体的发展及应用[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(7): 298-300.
- [7] XUE R L, WANG F Q, WANG Y P. Selection and design of overseas popular armor blocks[J]. China Harbour Engineering, 2014(12): 48-52. 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(12): 42-46.
- [8] WANG M R, XIE S W, GU K, et al. Development and study on double-column wave dissipation block[J]. Port Engineering Technology, 2001(2): 9-12, 41. 王美茹, 谢善文, 郭科, 等. 双柱消浪块的开发和研究[J]. 港工技术, 2001(2): 9-12, 41.
- [9] Water Transport Bureau of the Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code of design for breakwaters and revetments:

- JTS 154—2018[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018. 交通运输部水运局. 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.
- [10] Water Transport Bureau of the Ministry of Transport of the People's Republic of China. Wave model test regulation: JTJ/T 234—2001 [S]. Beijing: China Communication Press Co. Ltd., 2002. 中华人民共和国交通部水运司. 波浪模型试验规程: JTJ/T 234—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [11] Water Transport Bureau of the Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015. 交通运输部水运局. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

New Shaped Wave Dissipating and Armor Block for Deepwater Breakwater and Its Performance Parameter Testing

GE Long-zai^{1,2,3}, GAO Feng^{1,2,3}, CHEN Han-bao^{1,2,3}

(1. *Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering*, Tianjin 300456, China;

2. *National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology*, Tianjin 300456, China;

3. *Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications*, Tianjin 300456, China)

Abstract: A new cross-shaped wave dissipation and armor block which is suitable for deepwater and large wave conditions is developed through summarizing the domestic and foreign artificial blocks, following the three principles of wave dissipation, stability and construction convenience in the block design, combining the environmental characteristics of deepwater breakwaters and comparing and analyzing the advantages of existing blocks. For the new type block, the designed performance parameters are tested and its advantages and disadvantages are further explained after comparing with the existing Accropode which has been widely used in engineering. This new type block has obtained the utility model patent certificate issued by the State Intellectual Property Office and has been applied successfully in the large-scale wave flume of our institute. The successful development of this new type block will play a promoting role in enhancing the new technological development ability in the deepwater port construction, ensuring the project safety, reducing the project cost and constructing the ecological environment. It can also provide a reference for foreign-related projects which may involve some restrictions of block patent rights.

Keywords: deepwater breakwater; development of wave dissipation and armor block; new cross-shaped block; parameter test; experimental method

Received: November 12, 2019