

· 综 合 ·



基于葡萄牙 Sines 港防波堤破坏案例的国内外规范关于护面块体稳定质量计算的比较

夏运强, 王绿卿, 张庆丰, 王海峰, 闫志铎

(海军研究院, 北京 100070)

摘要: 防波堤护面块体稳定质量是防波堤设计中重点关注的问题。针对斜坡堤护面块体的抗浪稳定性, 介绍了行业经典案例——70 年代葡萄牙 Sines 港深水防波堤设计和风暴破坏情况, 对国内外规范斜坡堤护面块体稳定质量计算方法进行比较分析。采用 Hudson 公式对 Sines 港防波堤扭工字护面块体稳定情况进行复核, 结果显示该防波堤设计采用的扭工字块体质量过低。比较中外规范计算结果得出, 在深水条件($H/d < 0.3$)下, 中国规范计算稳定质量的安全富余度高于欧洲 ROM 规范, 在浅水条件($H/d \geq 0.3$)下, 结果相反。研究成果可为更好地理解和使用国内外规范提供参考。

关键词: 港口工程; Sines 港; 防波堤; 扭工字块体; Hudson 公式; 稳定质量

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0001-06

Comparison of domestic and international standards on stable mass calculation of armor units based on breakwater damage case of Sines Port in Portugal

XIA Yunqiang, WANG lüqing, ZHANG Qingfeng, WANG Haifeng, YAN Zhiduo

(Naval Research Institute, Beijing 100070, China)

Abstract: The stable mass of armor units for breakwaters is a key concern in breakwater design. In terms of the wave stability of armor units for sloping breakwaters, this paper introduces a classic industry case study—the design of the deepwater breakwater at Sines Port in Portugal in the 1970 s and its damage during storms. and it compares and analyzes the stable mass calculation methods of armor units in domestic and international design codes. Using the Hudson formula, the paper re-evaluates the stability of the dolos armor units used in the Sines Port breakwater design, revealing that the mass of the dolos used was insufficient. Comparisons of calculation results from Chinese and European ROM codes show that under deepwater conditions($H/d < 0.3$), the safety factor calculated by the Chinese code is higher than that of the European ROM code, while the opposite is true under shallow water conditions($H/d \geq 0.3$). The research results can provide a reference for better understanding and applying domestic and international design codes.

Keywords: harbor engineering; Sines Port; breakwater; Dolos armor unit; Hudson formula; stable mass

1978—1979 年发生的葡萄牙 Sines 港防波堤遭遇风暴严重破坏为行业经典案例, 业界对其破坏原因和随后的修复重建工作进行了长达近 20 a 的

研究讨论, 为水运工程行业斜坡式防波堤的设计和施工, 特别是护面块体的合理应用, 提供了许多可借鉴的宝贵经验。得益于当时工程完备的波

收稿日期: 2025-02-25

作者简介: 夏运强(1971—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为港口、海岸及近海工程。

浪现场观测手段,可得到防波堤破坏时的现场实测波浪数据,相当于进行一次难得的防波堤原型波浪破坏试验,对这次经典案例进行还原复演,借此可以深入讨论国内外现行行业规范中关于斜坡堤护面块体稳定质量计算方法的区别和合理性,以期为更好地理解和使用国内外规范提供参考。

1 葡萄牙 Sines 港防波堤设计及破坏情况

葡萄牙 Sines 港位于首都里斯本南约 120 km,见图 1,直接西向大西洋,港口性质为大型工业港。港口主防波堤^[1-5]为港区提供掩护,平面布置见图 2,主要抵御该海域西向强风浪。防波堤总长约 2 km,轴线基本呈南北走向,水深 0~50 m,内侧规划建设 3 个 10 万~50 万 t LPG 泊位。防波堤设计建造时间为 1973—1978 年,总投资约 1 亿美元,是当时世界上水深最大、采用扭工字块体最大的深水防波堤。



图 1 Sines 港地理位置

Fig. 1 Geographical location of Sines Port

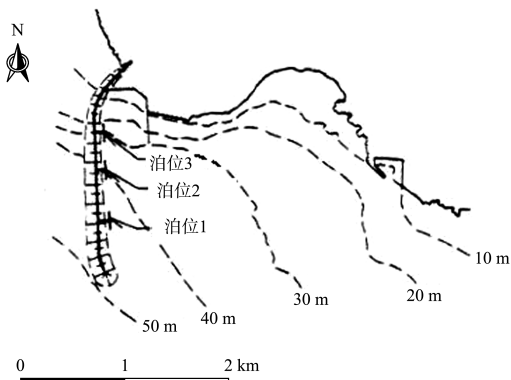


图 2 防波堤平面布置

Fig. 2 Plane layout of breakwater

防波堤堤身典型设计断面见图 3,为带胸墙的斜坡式结构。堤顶设置现浇钢筋混凝土胸墙和盖板,胸墙顶高程为 19.0 m,港侧设置平台通道,供管道布设和人员车辆通行。外护面采用 42 t 扭工字块体 Dolos,随机安放 2 层方式,顶高程为 16.0 m,厚 6.5 m,坡度 1:1.5。块体杆径比 r 为 0.35,质量密度为 2.35 t/m^3 ,未采取配筋等结构加强措施。护面垫层采用 3~6 t 块石(为护面块体质量的 $1/17 \sim 1/7$),水下采用二阶支撑棱体结构形式,上阶棱体顶高程为 -15.0 m,选用 9~20 t 块石,下阶棱体顶高程 -25.0 m,选用 0.5~6 t 块石,支撑棱体坡度均为 3:4。

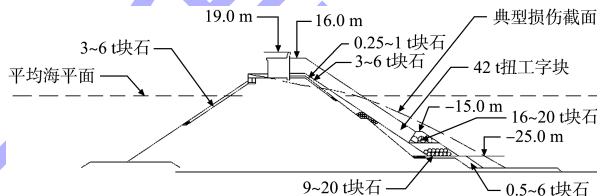


图 3 防波堤堤身典型断面及破坏

Fig. 3 Typical cross-sections and damage of breakwater



图 4 防波堤现场破坏照片

Fig. 4 Photograph of breakwater damage

防波堤设计采用的波浪资料见表 1。表中数据是基于距该港北 250 km 处波浪观测站 7 a 波浪观测数据(目测)和 1 a 实测数据(波浪骑士)经极值统计分析得到。防波堤设计使用年限为 50 a,设计波浪重现期取 100 a,护面扭工字块体失稳率控制在 1% 以内。设计阶段采用波浪标准有效波高 $H_s = 11.0 \text{ m}$,波浪平均周期 $T = 13.5 \text{ s}$,谱峰周期 $T_p = 16 \text{ s}$ 。

表 1 设计波浪及风暴破坏实测波浪参数
Tab. 1 Design wave conditions and measured wave parameters of storm damage

阶段	重现期/a	H_s /m	T /s	T_p /s	备注
原设计(1976 年)	10	8.5	—	—	预期块体晃动
	30	9.5	—	—	预期块体开始发生位移
	50	10.0	—	—	—
	100	11.0	13.5	16	预期块体容许失稳率 1%
现场破坏(1978 年 2 月)		9.0	12~14	18~20	—

工程接近竣工时, 1978 年 2 月一场风暴造成防波堤整体性严重破坏, 见图 3~5, 护面结构大面积破损、失稳坍塌, 胸墙发生倾覆断裂等。现场实测波浪数据为 $H_s=9.0\text{ m}$, $T=12\sim 14\text{ s}$, $T_p=$

$18\sim 20\text{ s}$ 。之后于 1978 年 12 月和 1979 年 2 月后续两次风暴潮中又遭受了进一步破坏。从波浪数据分析, 现场除 T_p 略大于原设计参数外, 实测 H_s 均未超过原设计取值, 理论上不应该出现如此严重的破坏。

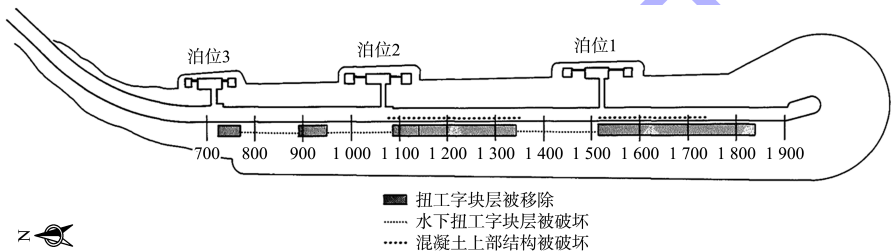


图 5 防波堤破坏平面 (单位: m)
Fig. 5 Layout of breakwater damage (unit: m)

发生风暴破坏后, 国际范围内行业相关机构和专业人士对破坏原因开展了深入分析研究, 最终给出如下原因: 设计波浪确定存在缺陷(频率分析样本年数过少), 设计中没有考虑大型 Dolos 块体本身强度(局部应力过大), Dolos 块体的抗浪稳定性被高估(块体稳定系数 K_p 取值偏大), 坡脚棱体支撑能力不足, 施工管理和监督存在问题等。其中, 护面采用的 42 t Dolos 块体在现场波浪作用下稳定质量不足是主要原因。

2 国内外规范关于护面块体稳定质量计算规定

防波堤工程中, 特别是对于水深浪大的海域, 广泛采用各类人工护面块体, 例如四角锥体、扭工字块体、扭王字块体等, 主要归因于这类块体之间具有良好的联结嵌固作用, 较天然块石主要靠自重力来抵御波浪冲击, 其稳定质量可以大为减少, 且其坡面结构形成较大孔隙率, 可以有效耗散波能, 从而减少越浪、爬高和反射等次生副作用。

关于护面块体(石)的稳定质量计算, 国内外业界普遍认可的主要有 Hudson 公式和 van der Meer

公式。前者系美国学者 Hudson 于 1959 年通过正向规则波作用下天然块石护面稳定质量模型试验结果提出, 并于 1974 年采用不规则波试验修订了相关参数, 因其简单易用且经验积累丰富, 而被各国规范广泛采用, 但该公式仅限于无堤顶越浪的透水堤, 未考虑波浪周期、风暴持续时长、堤前波浪破碎类型、护面破坏程度等因素影响。后者由荷兰工程师 van der Meer 于 1987 年提出, 较 Hudson 公式, 该公式考虑因素较为全面, 包括波浪周期、波浪破碎、结构渗透系数和破坏等级等, 但表达形式较为复杂, 对护面块体的适用性有待商榷。

目前, 业界普遍认为 van der Meer 公式更适用于护面块石计算, 而 Hudson 公式更适用于护面块体计算。现行国外行业规范, 包括欧洲 ROM^[6]、英国 BS 6349^[7]、日本港口设施技术标准^[8]、美国 SPM/CEM^[9]等均同时采用 Hudson 公式和 van der Meer 公式, 中国行业规范仅规定使用 Hudson 公式(演变形式), 但对其适用条件进行了限定。各国规范均注明, 采用公式计算仅用于初步设计阶段, 工程实施阶段需要开展模型试验验证确定。

中国现行行业规范 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[10] 即 Hudson 公式规定, 单个护面块体稳定质量的计算公式如下。

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

式中: W 为单个块石、块体稳定质量, t ; γ_b 为块石、块体材料的重力密度, kN/m^3 ; H 为设计波高, m ; K_D 为块体稳定系数; α 为斜坡与水平面夹角, $(^\circ)$; γ 为水的重力密度, kN/m^3 。

该公式的适用条件是:“波向线与斜坡堤轴线夹角小于 22.5° , 且堤前波浪不破碎; 对设计波浪平均周期大于 10 s 或设计波高与设计波长之比小于 $1/30$ 的坦波, 块体质量应适当加强并需进行模型试验验证”, 并且规定“对位于波浪破碎区的堤身和堤头的块体质量, 均应再增加不少于 25% , 必要时可通过模型试验确定”。这些规定在一定程度上弥补了原 Hudson 公式存在的不足。

国内外规范关于 Hudson 公式的表达式本质上相同, 区别在于波高取值标准、稳定系数 K_D 值和块体容许失稳率 n 的差别, 且各国规范根据工程实践认识和经验积累不断对相关参数进行调整, 下面以 Sines 港防波堤护面采用的扭工字块体进行说明。

扭工字块体是发明和使用较早的护面块体, 于 1963 年在南非使用, 它以混凝土用量少、施工方便等特点在 60—80 年代被广泛使用, 该块体在国外均采用双层随机安放方式, 主要靠块体间的钩联嵌固作用达到稳定。ROM 建议扭工字块体质量不超过 30 t , 采用 H_s ($H_s = H_{1/3} \approx H_{13\%}$) 进行计算, 块体失稳率取水位上下 1.5 倍 H_s 范围内块体总数为基数, $n=0\% \sim 2\%$, $K_D=8 \sim 10 \sim 13$ (坡度 $1:1.5$, 对应 $r=0.36 \sim 0.34 \sim 0.32$, 由稳定数 N_s 换算得到)。BS 6349 建议扭工字块体最大质量不超过 15 t , 采用 $H_{1/10}$ (堤前波浪未破碎)、 H_s 和破碎波高 H_b 较大值 (堤前波浪破碎) 进行计算。块体失稳率取水位上下 1 倍波高范围内块体总数为基数, $n=0\% \sim 2\%$, $K_D=10 \sim 12$ 。美国 CEM 延续 SPM 相关规定, 建议采用 H_s 或 $H_{1/10}$, $n < 2\%$ 时 (含少量晃动), $K_D=8 \sim 16$, $n < 5\%$ 时 (含位移和晃动), $K_D=15.8 \sim 31.8$, 失稳率

计算基数取静水位上下 1 倍波高范围内块体总数。

中国关于防波堤设计的规范中, 扭工字块体安放方式包括随机安放 2 层和规则安放 2 层两种方式, 块体杆径比仅有 $r=0.32$ 一种情况, 其相关设计参数演变如下。

最早《防波堤》(1978 年) 规定 $K_D=32$, $n=1\% \sim 2\%$, 计算基数为静水位上下各 1 倍波高范围内块体总数; JTJ 218—1987《防波堤规范》和 JTJ 298—1998《防波堤设计与施工规范》均规定, $H \geq 7.5\text{ m}$ 时, $K_D=18$, $n=0\%$; $H < 7.5\text{ m}$ 时, $K_D=24$, $n=1\%$; JTS 154-1—2011《防波堤设计和施工规范》规定, $K_D=18$, $n=0\%$; JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》规定, $K_D=15 \sim 18$, $n=0\%$ 。可见, 中国行业规范中对扭工字块设计参数 K_D 值从最初 32 调整为现在最小 15 , n 值从 $1\% \sim 2\%$ 调整到 0% , 块体的稳定质量标准在不断提高。

关于波高 H 的取值标准, 中国《海港水文》(1978 年) 仅规定采用 $H_{13\%}$, JTJ 213—1987《海港水文规范》增加“平均波高与水深比值 $H/d \geq 0.3$ 时, 取 $H_{13\%}$; $H/d < 0.3$ 时, 取 $H_{5\%}$ ”, 并在后续历次修订中一直保留, 增加该条主要是考虑到水深大时 $H_{\max}/H_s$ 值影响较大^[11], 此时护面块体稳定性要求提高, 需要适当提高设计波浪标准。以水深 d 与波长 L 比值 0.5 为界, 从浅水到深水, $H_{5\%} \approx (1.10 \sim 1.21) H_{13\%}$ 。

对于大水深条件下防波堤的设计, 中国自 JTS 154-1—2011《防波堤设计和施工规范》起, 增加了“设计低水位起算, 水深大于 20 m ”的深水防波堤的定义, 并提高了 K_D 值。自 JTS 145-2—2013《海港水文规范》起至现行 JTS-145—2015《港口与航道水文规范》(2022 版)^[12], 均增加了“对于大水深的重要建筑物, 当重现期 100 a 的波高大于或等于重现期 50 a 的同一波列累积频率波高 1.15 倍时, 其设计波浪重现期可采用 100 a , 且其极端高水位的重现期可相应调整为 100 a ”。现行 JTS 154—2018《防波堤护岸与设计规范》^[10] 规定: “斜坡式防波堤的设计波浪重现期应采用 50 a , 特殊情况或大水深、重要建筑物设计波浪重现期可采用

100 a 或以上”。另外对深水堤的肩台、棱体和护底等结构设计均进行了加强。这些措施均旨在提高深水条件下防波堤的安全稳定性。

3 国内外规范计算结果比较

从 Sines 港防波堤平面布置看, 基本为西向正向浪作用, 适合用 Hudson 公式进行复核计算。ROM 现行版本出版日期相对较晚, 借鉴引用了最新研究成果, 其内容具有较好的开放包容性和成熟度, 是目前欧美各国普遍认可和使用的行业规

范。因此, 以下针对 Sines 港防波堤护面扭工字块稳定质量的国外规范计算采用 ROM 建议的相关参数, 即采用 H_s 和 $K_D = 8 \sim 10 \sim 13$ 进行复核。中国规范计算采用 H_s 或 $H_{5\%}$ 和 $K_D = 15 \sim 18$ 分别计算。堤身典型破坏区段断面底高程为 $-50 \sim -30$ m, 计算水位为 0.0 m, 对于 $H_s = 10 \sim 11$ m, $H/d = 0.13 \sim 0.23$, 均小于 0.3 , 因此本次中国规范计算波浪取 $H_{5\%}$, 现场条件下 $H_{5\%} = (1.16 \sim 1.18)H_{13\%}$ 。针对原设计工况和风暴破坏工况, 采用国内外规范计算 Sines 港防波堤堤身段护面块体稳定质量计算结果见表 2。

表 2 护面块体稳定质量计算结果
Tab. 2 Stability weight calculation results of armor blocks

计算工况	H_s/m	T/s	$H_{5\%}/m$	r	K_D	W/t	选用规范
原设计工况 (重现期 100 a)	-	-	12.8	0.32	<u>32</u>	41.7	中国规范 (JTS 154—2018)
	-	-	12.8	0.32	18	74.2	
	-	-	12.8	0.32	15	89.0	
	11	-	-	0.32	<u>20</u>	42.4	ROM (CIRIA 2007)
	11	-	-	0.32	13	65.2	
	11	-	-	0.34	10	84.8	
	11	-	-	0.36	8	105.9	
风暴破坏工况	-	-	11.8	0.32	<u>25</u>	41.8	中国规范 (JTS 154—2018)
	-	-	11.8	0.32	18	58.1	
	-	-	11.8	0.32	15	69.7	
	10	-	-	0.32	<u>15</u>	42.5	ROM (CIRIA 2007)
	10	-	-	0.32	13	49.0	
	10	-	-	0.34	10	63.7	
	10	-	-	0.36	8	79.6	

注: 1) $r_b = 23.5 \text{ kN/m}^3$, $\alpha = 1:1.5$; 2) 中国规范和 ROM 采用 Hudson 公式计算, 斜体下划线 K_D 值为反推块体稳定需要的值。

由表 2 可见: 1) 按现行中国规范和 ROM 计算, 原设计断面在原设计工况下稳定质量分别为 $74.2 \sim 89.0 \text{ t}$ 和 $65.2 \sim 105.9 \text{ t}$, 在风暴破坏工况下稳定质量分别为 $58.1 \sim 69.7 \text{ t}$ 和 $49.0 \sim 79.6 \text{ t}$, 采用 van der Meer 公式和 Ciria Rockmanual 公式计算的结果也高于 42 t , 因此扭工字块体采用 42 t 的设计质量不能满足稳定要求, 现场发生破坏是必然; 2) 对于原设计工况, 按中国规范和 ROM 分别计算 K_D 值需增大到 32 和 25, 对风暴破坏工况, 上述 K_D 值分别增大到 25 和 15, 现场采用的 42 t 块体才能满足稳定质量要求。特别注意的是, 中国规范规定对于波浪平均周期大于 10 s 时, 块体质量要适当加大并经试验验证, 即表中计算结果相当于下限值; 3) 中国规范 K_D 值虽然大于 ROM,

但归因于中国规范采用 $H_{5\%}$, 其计算稳定质量仍大于 ROM, 本案例增大约 $20\% \sim 40\%$, 即对于深水情况 ($H/d < 0.3$), 中国规范计算出的结果安全富余度大于 ROM, 这点与已有相关研究成果^[13-16]的结论不完全一致。当然对于浅水 ($H/d > 0.3$), 二者均采用 H_s 计算, 选用的 K_D 大小决定了中国规范计算出的结果小于 ROM, 即偏于危险。

4 结论

1) 国内外规范均认可采用 Hudson 公式或其演变形式计算防波堤堤护面块体稳定质量, 但对于具体参数条件如波高取值、 K_D 值、容许失稳率等, 不同规范有较为明显的差别, 需正确区别并理解使用。

2) 采用 Hudson 公式按照国内外现行规范计算, 原设计断面采用 42 t 扭工字护面块体均不能满足稳定要求, 现场发生破坏是必然。

3) 中国行业规范历次修订中, 扭工字块的 K_D 值从最初 32 调整为现在最小 15, 容许失稳率从 1%~2% 调整到 0%, 块体的稳定质量标准不断提高。

4) 对于扭工字块体, 在深水条件 ($H/d < 0.3$) 下, 归因于中国规范采用 $H_{5\%}$ 计算, 尽管其 K_D 值大于 ROM, 但计算结果仍大于 ROM, 即中国规范计算稳定质量的安全富余度要高于 ROM。在浅水条件 ($H/d \geq 0.3$) 下, 结论相反。

参考文献:

- [1] BAIRD W F, CALDWELL J M, EDGE B L, et al. Report on the damages to the sines breakwater, Portugal [J]. Coastal engineering, 1980: 201223375.
- [2] EDGE B L, BAIRD W F, CALDWELL J M, et al. Failure of the breakwater at port Sines, Portugal [J]. American Society of Civil Engineers, 1982: 210635702.
- [3] GROENEVELD R L, MOL A, NIEUWENHUYSE E H. Rehabilitation methods for damaged breakwaters [C]// Coastal Engineering 1984. New York: American Society of Civil Engineers, 1985: 2467-2484.
- [4] BURCHARTH H F. The lessons from recent breakwater failures: developments in breakwater design [Z]. Invited speech presented at World Federation of Engineering Organisations Technical Congress, Vancouver, 1987.
- [5] MAGOON O T, WGGEL J R, BAIRD W F, et al. Rehabilitation of the west breakwater: port of Sines, Portugal [C]//24th International Conference on Coastal Engineering. New York: American Society of Civil Engineers, 1995: 3068-3613.
- [6] The rock manual: the use of rock in hydraulic engineering[S]. 2nd ed. London: C683, CIRIA, 2007.
- [7] Maritime structures: Part 7: guide to the design and construction of breakwaters: BS 6349-7: 1991 [S]. London: British Standards Institution, 1991.
- [8] Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan [S]. Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2007.
- [9] Coastal Engineering Manual [S]. Vicksburg: U. S. Army Engineer Research and Development Center, 2009.
- [10] 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.
Code of design for breakwaters and revetments: JTS 154-2018[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [11] 俞聿修, 柳淑学. 随机波浪及其工程应用[M]. 4 版. 大连: 大连理工大学出版社, 2011.
YU Y X, LIU S X. Random wave and its applications to engineering [M]. 4th ed. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2011.
- [12] 港口与航道水文规范: JTS 145—2015 (2022 版) [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.
Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145-2015 (2022 ed.) [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2016.
- [13] 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.
XUE R L, WANG F Q, WANG Y P. Selection and design of overseas popular armor blocks[J]. China harbour engineering. 2014(12): 42-46.
- [14] 夏晓露, 冯宇子, 陈松. Rock manual 公式在防波堤季风期防护计算的运用[J]. 港工技术, 2020, 57(3): 25-29.
XIA X L, FENG Y Z, CHEN S. Application of rock manual formula in calculation of breakwater protective blocks in monsoon period [J]. Port engineering technology, 2020, 57(3): 25-29.
- [15] 王眯, 信书, 耿宝磊, 等. 中外港口规范对比研究Ⅲ: 防浪结构护面块体稳定性计算标准[J]. 水道港口, 2020, 41(3): 284-290.
WANG M, XIN S, GENG B L, et al. Comparison of domestic and foreign port standard Part Ⅲ: wave structure and selection standard of stability coefficient of armour block[J]. Journal of waterway and harbor, 2020, 41(3): 284-290.
- [16] 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.

(本文编辑 王传瑜)