



# 恶劣海况下防波堤超大型 双层扭王字块护面研究

李江文，祝健康

(中交水运规划设计院深圳有限公司，广东 深圳 518054)

**摘要：**工程区域海况恶劣，水深浪大、强台风频繁、可施工窗口期少，施工难度极大。针对恶劣海况下的防波堤结构方案，基于实际海况特点及施工需求分析，提出采用超大型双层扭王字块护面结构，并从垫层的形式及规格对护面稳定性影响、双层扭王字块护面结构的安全性、护面块体安装密度等方面进行论述。结果表明：双层扭王字块结构安全可靠，能较好地满足施工期防台需求；上下两层块体质量差应尽量加大，上层扭王字块质量宜达到下层的 3 倍左右或以上；对超大型双层扭王字块护面，表层块体的安装密度具备适当降低空间。研究成果可供类似工程参考。

**关键词：**恶劣海况；岛式深水防波堤；超大型双层扭王字块

中图分类号：U 653.4

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)11-0074-06

## Super large double-layer accropode armour of breakwater under severe sea conditions

LI Jiang-wen, ZHU Jian-kang

(CCCC Water Transportation Consultants Shenzhen Co., Ltd., Shenzhen 518054, China)

**Abstract:** This project is located in severe sea conditions area, with deep water, large waves, frequent strong typhoons and few days of offshore construction, making the construction extremely difficult. Aiming at the breakwater structure under severe sea conditions, based on the analysis of the actual sea conditions and construction requirements, super large double-layer accropode armour structure is innovatively proposed. The form and specification of the cushion and its influence on the armour stability, the safety of the double-layer accropode armour structure and the installation density of the armour block are discussed. The results show that the double-layer accropode structure is safe and reliable, and can better meet the needs of typhoon prevention during construction. The weight difference between the upper and lower layers should be increased as much as possible, and the weight of the upper layer accropode block should be about 3 times or more than that of the lower layer. For the super large double-layer accropode armour, the installation density of upper blocks can be appropriately reduced. The research results can be used as a reference for similar projects.

**Keywords:** severe sea condition; isolated deep water breakwater; super large double-layer accropode

## 1 工程概况

工程位于粤东开敞水域，建设 30 万吨级原油泊位 1 个，码头离岸约 2 km。工程海域海况较差，为确保码头结构安全、保障原油码头的卸油能力，

设置 1 座岛式防波堤对泊位进行掩护。防波堤总长 920.4 m，分为南、北两段，走向为 55°~235°，和潮流流向基本一致，主要掩护 S—E 向范围的大浪，见图 1。

收稿日期：2022-02-25

作者简介：李江文（1986—），男，高级工程师，从事水运工程结构设计及水动力泥沙研究。

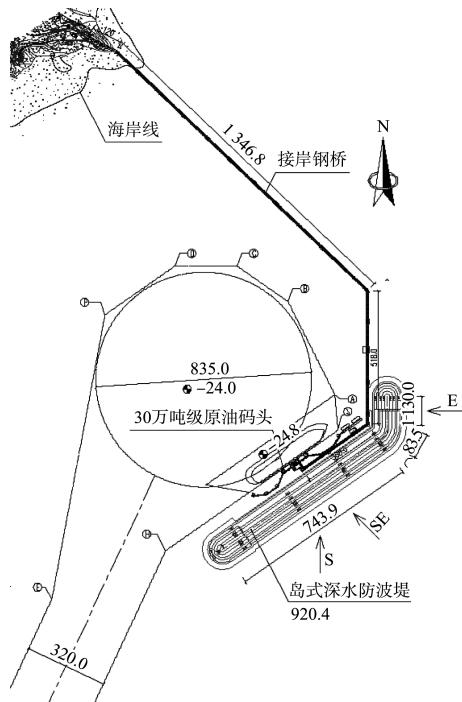


图 1 工程平面布置 (单位: m)

防波堤离岸较远, 从设计低水位起算, 水深约 22.3 m, 为深水岛式斜坡式防波堤。原设计防波堤堤顶高程 4.0 m, 坡度 1:1.5, 堤身段采用 52 t 扭王字块护面、堤头段采用 63 t 扭王字块护面(1 倍设计波高以下护面块体相应减小)。

工程区域海况恶劣, 表现为水深浪大、强台风频繁、可施工窗口期少等, 现场施工难度极大。综合现场实际海况特点及施工需求分析, 结合设计波要素调整及防波堤设计规范更新, 对原防波

堤结构设计进行调整优化, 提出采用防波堤超大型双层扭王字块护面结构: 75 t 超大型扭王字块下设 26 t 扭王字块。从垫层的形式及规格对护面稳定性影响、双层扭王字块护面结构的安全性、护面块体安装密度等方面进行研究。

## 2 海况特性

工程位于粤东海域, 100 a 一遇极端高水位 3.30 m, 50 a 一遇极端高水位 3.12 m, 设计高水位 1.87 m。对工程影响较大的波浪主要由台风和东北季风产生, 季风特征十分显著。台风一般发生在 4—12 月, 其中 6—10 月为台风多发期。从 10 月一次年 3 月, 海域盛行东北季风。

### 2.1 极端天气波浪

工程海域受台风影响显著, 近年来影响工程海域的极端天气有进一步增强的趋势。工程建设以来接连遭遇了“天兔”“海鸥”“海马”“山竹”等强台风影响, “天兔”在工程外海产生的最大有效波高达 8.82 m, “海马”在工程外海产生的最大有效波高达 8.0 m, “山竹”有效波高大于 5 m 的持续时间超过 15 h<sup>[1]</sup>。

为进一步加深对现场海况的认知, 将台风序列延长至 1949—2018 年, 重新对原油码头波浪条件进行数学模型研究。纳入最新台风资料后, 设计波高总体较原设计增加 10% 左右, 防波堤设计波要素见表 1。

表 1 原油码头防波堤设计波要素

重现期/a	水位/m	$H_{1\%}/m$	$H_{5\%}/m$	$H_{13\%}/m$	T/s	L/m	波向
50	极端高: 3.12	12.73	10.81	9.38	11.4	154	SE
	设计高: 1.87	12.63	10.75	9.34	11.3	151	SE
100	极端高: 3.30	13.82 <sup>#</sup>	11.80	10.27	11.7	160	SE
10	设计高: 1.87	9.95	8.34	7.18	10.3	136	-

注: “#”表示以规则波判断不破碎, 但以不规则波判断已破碎, 带#为计算波高, 非不规则波极限波高。

### 2.2 季风期波浪特性

工程区域季风特征十分显著, 根据国家海洋局南海工程勘察中心 2015 年出版的原油码头工程波浪数据推算及分析报告, 2013、2014 年波高波向联合分布玫瑰图见图 2。

结合 2010—2011 年波浪测站观测资料分析, 海区全年常浪向为 E—ENE 向, 强浪向为 SSE—SE—ESE, 不同年会有一定变化。2010—2011、2013—2014 年东北季风期出现有效波高大于 1.5 m 天数较多, 基本不具备海上作业条件, 见表 2。

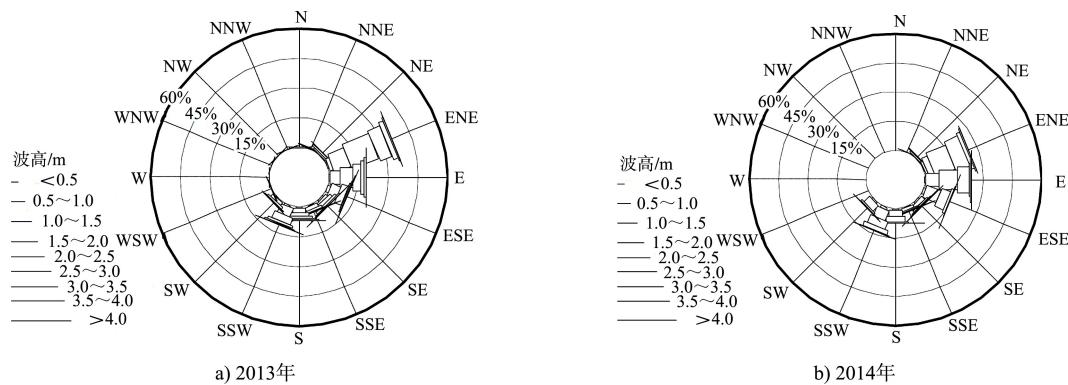


图 2 工程海区波高波向联合分布玫瑰图

表 2 工程区波浪实测及后报资料

时间	常浪向 (频率/%)	强浪向	$H_{1/3} > 1.5$ m 天数/d	东北季风期间 (10月—次年3月)		备注
				$H_{1/3} > 1.5$ m 天数/d		
2010 年 6 月—2011 年 6 月	E(34.9)	SSE	182	156		波浪测站实测
2013 年	ENE(35.6)	ESE	228	163		依据汕头气象局 59515 海洋气象浮标站、避浪站实测波浪数据后报
2014 年	ENE(25.3)	SE	208	148		
合计	E—ENE SSE—SE—ESE	平均 206		平均 156		

### 2.3 施工期确定

根据上述波浪特性分析,冬季受东北季风影响基本不具备海上作业条件,海上施工窗口期主要集中在每年的4—9月,与台风多发期重叠,综合考虑防台、避台及其他因素,海上可作业天数较少。根据近几年现场海上可施工天数统计,平均仅70~80 d/a。

### 3 防波堤双层扭王字块结构方案

工程防波堤为深水防波堤,海况恶劣,内侧原油码头结构和通过能力完全靠防波堤掩护,设计波浪重现期由原设计50 a调整至100 a。

鉴于本工程防波堤掩护对象和功能较为单一,防波堤方案优化延续原设计“挡小放大”的总体思路:阻挡高频率方向上2 a一遇的波浪,而让低频率的大浪从堤顶越过,通过合理设计防波堤与码头之间的距离,确保越浪不直接冲击码头结构<sup>[2]</sup>。因设计波要素明显增加,综合考虑防波堤对内侧码头的掩护效果、堤顶护面块体的安全稳定性、工程经济性,防波堤堤顶高程由原设计

4.0 m提高至5.3 m。

防波堤施工期需跨台风季,施工期防台是设计需要重点考虑的问题之一。结合海况特点、防台及施工需求,本防波堤采用超大型双层扭王字块结构,以下主要从上层扭王字块护面块体质量、超大型扭王字块护面垫层方案比选、垫层形式及规格对护面稳定性影响、超大型双层扭王字块护面结构的安全可靠性验证等方面进行论述。

#### 3.1 防波堤上层扭王字块护面块体质量确定

工程海域水深浪大,极端高水位时100 a一遇设计波高 $H_{1\%}$ 达13.82 m。防波堤上层护面块体采用扭王字块,其稳定质量按JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》中块体稳定质量公式计算。块体稳定系数 $K_D$ 取15~18,坡度1:1.5时,堤身段扭王字块稳定质量为72.7~87.3 t,堤头段护面块体稳定质量达到100 t左右,远超现场的施工能力。为此,将堤头段防波堤边坡适当放缓至1:2,堤身及堤头段的上层护面均选用75 t扭王字块,对应的块体稳定系数为17.1~17.5,见表3。

表 3 防波堤护面块体质量

部位	100 a一遇设计波高 $H_{5\%}$ /m	坡度	上层扭王字块质量/t			
			$K_D = 15$	$K_D = 18$	设计取值	对应 $K_D$
堤身	11.8	1:1.5	87.3	72.7	75	17.5
堤头	11.8	1:2.0	85.1	70.9	75	17.1

### 3.2 超大型扭王字块护面垫层方案比选

根据规范中上下层级配构造要求，护面块体为 75 t 超大型扭王字块，下层垫石规格需达到

3.5 t以上。由于天然巨型块石较为缺乏，考虑采用人工块体替代块石垫层，并对2种人工块体垫层方案进行比选，见表4。

表 4 超大型扭王字块护面下层垫层方案比选

方案	优点	缺点
方案 1: 75 t 扭王字块下部垫层采用常规 4~6 t 人工块体替代	技术相对成熟	1) 无法解决施工期防台问题; 2) 人工块体数量较多, 预制及吊装工 作量大, 施工速度慢
方案 2: 75 t 扭王字块下部垫层按满足 10 a—遇波浪进行设计, 采用 26 t 扭王 字块	1) 可大大减小防波堤施工期防台压力; 2) 可以实现防波堤快速出水, 加快施工进度; 3) 通过超大型双层扭王字块, 可降低堤心石顶高程, 减少船舶抛填堤心石时的触底危险, 便于施工	超大型双层扭王字块咬合及其稳定性 缺乏经验, 需进一步论证

由于海上可施工天数较少，本防波堤需跨台风季施工，施工窗口期与台风期重叠，传统的分段施工、分段防护方案难以满足现场施工要求，一旦台风前防护不及时，破坏后的修复难度及工作量较大。因此，防波堤设计除考虑使用期安全外，施工

期防台也是设计需要考虑的重点问题之一。

综合考虑防台需求、施工速度和便利性，在充分验证超大型双层扭王字块安全性的前提下，本工程最终选择方案 2，即 75 t 扭王字块+26 t 扭王字块的双层扭王字块结构方案，见图 3。

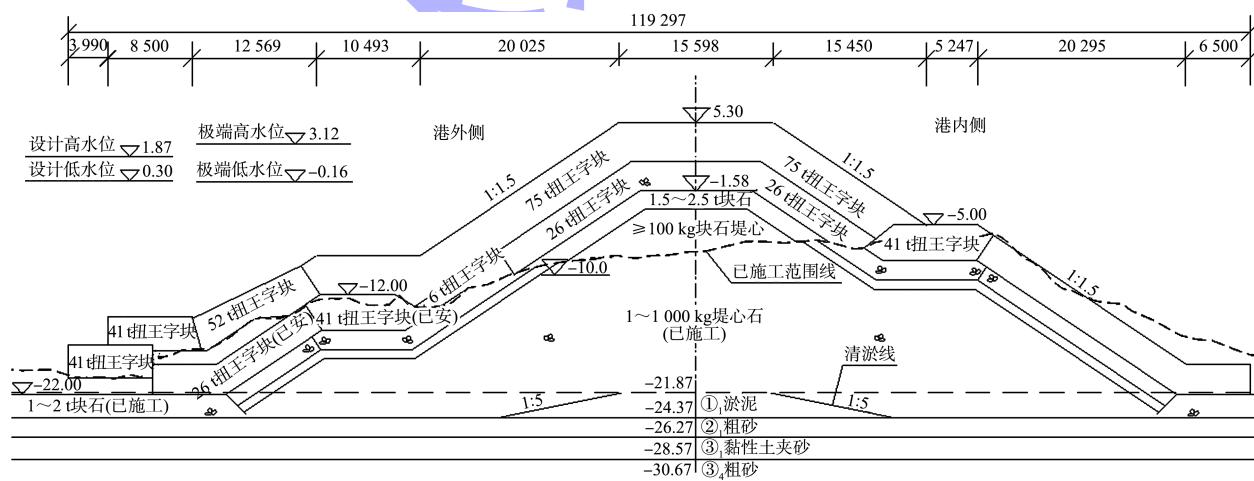


图 3 防波堤堤身段典型断面 (高程: m; 尺寸: mm)

### 3.3 扭王字块下部垫层形式及规格对护面稳定性的影响

防波堤的超大型双层扭王字块结构在施工期防台及施工便利性方面具有明显优势，但大规模采用超大型双层扭王字块在国内鲜有报道。为研

究不同垫层形式及规格对护面块体稳定性的影响，工程进行了破坏性物理模型试验<sup>[3]</sup>。

原试验设定采用 75 t 扭王字块及不同垫层组合进行破坏性试验，以验证不同垫层形式及规格对护面块体稳定性的影响。因工程设计波浪较大，试验

水深下波高已难以加大，达不到 75 t 扭王字块护面破坏条件，因此最终选用 29 t 扭王字块护面块体进行了 4 种不同垫层情况下的护面块体稳定性破坏性对比试验，分别为 1.5~2.5 t 块石、6 t 扭王字块体、10 t 扭王字块体、15 t 扭王字块体。

根据试验结果，当垫层采用块石或与护面相比较小的扭王字块体时，29 t 扭王字块体护面发生失稳时波高基本相同，稳定性差别不大，护面块体间拉缝较大，并未发生滚落。其中，当垫层采用块石或 6、10 t 扭王字块时，护面块体最大缝隙宽度约为 2.5 m；当垫层采用块石或 15 t 扭王字块时，局部最大缝隙宽度约为 3.0 m。

进一步分析可知，当上层扭王字块质量达到下层块体的 3 倍或以上时，与传统块石相比，表层护面块体稳定性基本相当；而当上层扭王字块质量接近下层块体的 2 倍时，表层护面块体稳定性略差于采用垫层块石或小型扭王字块，表现为块体间缝隙加大。虽然理论上双层扭王字块结构可以实现块体间由单层勾连变为双层勾连，但同时也对护面块体的安装质量造成不利影响。根据研究成果分析，建议当垫层采用扭王字块体时，上下两层扭王字块体的质量差应尽量加大，上层扭王字块质量达到下层的 3 倍或以上时较优。

此外，由于扭王字块体垫层较块石的抗浪能力更强，在护面出现较大缝隙时，不易造成垫层的严重破坏，因此，扭王字块体垫层的安全性相对较优。

### 3.4 超大型双层扭王字块护面结构的安全可靠性验证

#### 3.4.1 防波堤断面物理模型试验

防波堤断面物理模型试验包括堤身断面、堤头断面以及施工期断面（75 t 护面未安装，仅安装完成 26 t 扭王字块护面工况），模型比尺采用 1:39。考虑现场恶劣的安放作业条件，为充分反映现场实际，要求模型中块体随机抛放，相邻块体之间未充分咬合。防波堤断面物模试验的结论如下：

1) 100 a 一遇波浪累计作用时间相当于原型 6 h 后，堤身断面、堤头断面的 75 t 扭王字块体均无明显位移或滚落，75 t 扭王字块体满足稳定要求。

2) 对于施工期断面，在表面仅安装 26 t 扭王字块的工况下，10 a 一遇波浪累计作用相当于原型 3 h 后，堤顶和斜坡顶部连接处 26 t 扭王字块出现间隙。最大间隙宽度 1.2 m，小于块体几何尺寸的一半，26 t 扭王字块满足稳定要求。

#### 3.4.2 防波堤局部整体物理模型试验

考虑现场海况条件的复杂性，堤头同时存在入射波和绕射波影响，为进一步验证堤头处双层扭王字块结构的安全性，进行防波堤局部整体物理模型试验<sup>[4]</sup>。

在各级水位及相应的 50、100 a 一遇不同方向不规则波浪作用下，试验中未观测到块体发生晃动或位移，当每个水位波浪累计作用相当于原型 3 h，各级水位波浪累计作用后，75 t 扭王字块体无位移或滚落，75 t 扭王字块体满足稳定要求。

### 4 超大型双层扭王字块制作及安放

#### 4.1 超大型扭王字块的制作及质量保证

对于超大型扭王字块，当其块体质量大于 40 t 时需采取适当的加强措施。旧版防波堤规范建议当扭王字块块体质量大于 40 t 时采取配筋措施加强。在新版防波堤规范中，考虑异形块体配筋施工困难，且钢筋一旦锈蚀，对块体耐久性的破坏非常明显，甚至弊大于利，对此条进行了修改，建议采取掺加高强纤维等措施进行加强<sup>[5]</sup>。

本项目前期专门进行了超大型扭王字块取消配筋的可行性研究，采取掺加抗裂纤维的加强措施，从预制和吊装 2 个环节分别开展了超大型扭王字块混凝土结构实体检测试验、超大型素混凝土扭王字块吊装试验，经验证，掺加抗裂纤维的扭王字块结构安全，质量可以保证<sup>[6]</sup>。

#### 4.2 双层扭王字块安放

##### 4.2.1 下层扭王字块安装

下层扭王字块在施工期具有防护作用，应按

规范要求定点随机摆放, 施工中应尽量避免有垫层块体明显突出垫层面。

#### 4.2.2 超大型扭王字块安装密度

国内规范对不同大小的扭王字块体统一采用相同的安放空隙率(随机安放取 0.5); 国外规范对不同大小的护面块体的安放空隙率要求不同, 大型块体的安放空隙率一般大于 0.5。鉴于扭王字块体与国外的 ACCROPODE 块体基本相同, 分别按照国内规范和英标<sup>[7]</sup>对不同规格扭王字块安装密度进行对比, 英标中大型扭王字块的安装密度明显小于国内规范, 见图 4。

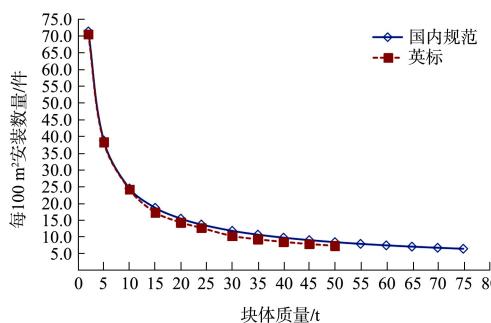


图 4 扭王字块安装密度对比

为控制超大型双层扭王字块工程质量, 采用国内规范规定的安装密度进行设计, 采取坐标定位方法对每件扭王字块进行定位、安装, 实际安装密度基本接近国内规范要求。

由于表层扭王字块体积较大, 且垫层扭王字块也具备一定的防护作用, 因此, 对于超大型双层扭王字块, 建议表层安装密度可适当降低, 并建议开展进一步研究工作。

#### 4.2.3 扭王字块安装要求

摆放时应使护面块体与垫层块体保持接触; 相邻两个块体的摆放姿态不应相同, 否则不利于块体间的咬合; 摆放时上一排块体应安放在下一排两个块体之间, 并与下一排块体咬合; 块体的中间支杆不应与护面垂直。

#### 4.2.4 双层扭王字块的安装高度

本工程在模型试验阶段对双层扭王字块上下叠放时的安装高度进行了测定, 其平均安装高度

为单层安装高度相加的 0.97~0.98 倍。

## 5 结论

- 1) 超大型双层扭王字块护面结构能较好地满足施工期防台需求, 对恶劣海况的适应性较好, 建议下层扭王字块质量根据施工期设计波浪确定。
- 2) 当垫层采用扭王字块时, 上下两层扭王字块的质量差应尽量加大, 建议上层扭王字块质量达到下层的 3 倍或以上。
- 3) 超大型双层扭王字块结构安全可靠, 且下层扭王字块较传统块石垫层的抗波浪掏刷能力更强, 在护面出现较大缝隙时不易造成垫层的严重破坏, 因此双层扭王字块体结构的安全性相对较优。
- 4) 对于超大型双层扭王字块, 表层安装密度可适当降低, 并建议开展进一步研究工作。
- 5) 本工程超大型双层扭王字块结构防波堤已建成 2 a, 仍应加强对防波堤护面块体的观测, 积累相关数据。

## 参考文献:

- [1] 华南理工大学. 炼化一体化项目配套原油码头工程波浪数学模型研究报告[R]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [2] 杨云兰, 司银云, 王汝凯, 等. 基于功能的深水岛式斜坡式防波堤方案设计[J]. 中国港湾建设, 2013(6): 18-21.
- [3] 南京水利科学研究院. 原油码头工程防波堤波浪断面物理模型试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2019.
- [4] 河海大学. 原油码头波浪局部整体物理模型试验[R]. 南京: 河海大学, 2019.
- [5] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 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.
- [6] 文君锋, 陈海龙, 武政. 超大型扭王字块取消配筋的可行性[J]. 水运工程, 2018(9): 191-197.
- [7] BSI. Maritime structures. Guide to the design and construction of breakwaters: BS 6349-7: 1991[S]. London: BSI, 1991.