



# 双层扭王字块护面 在某防波堤加固工程中的应用

黄敏, 李达华, 许建武

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 粤东某抛石结构斜坡堤自建成后频繁遭受强台风袭击, 护面结构多次受损, 为确保防波堤主体结构的稳定性, 需对防波堤薄弱位置进行加固, 以提高其整体防护能力。在分析防波堤受损原因的基础上, 根据新的规范要求及新的设计波浪要素, 加强堤身结构断面设计, 并通过物理模型试验进行优化比选验证, 最终确定在既有定点随机摆放的扭王字块护面结构上, 增设1层大型扭王字块的加固方案。经工程实践验证, 采用双层扭王字块进行护面加固后的防波堤结构整体稳定性好, 抗风浪能力显著提升。该方案施工简便、可操作性强, 适用于斜坡式结构防波堤的修复与加固, 可供类似项目借鉴。

**关键词:** 防波堤; 加固; 双层扭王字块

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0198-04

## Application of double-layer Chinese accropode in breakwater reinforcement project

HUANG Min, LI Dahua, XU Jianwu

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** A riprap structure slope breakwater in eastern Guangdong has been frequently attacked by strong typhoons since its completion, and the armour layer has been damaged many times. To ensure the stability of the main structure of the breakwater, it is necessary to strengthen the weak position of the breakwater to improve its overall protection ability. This paper expounds that the engineer has strengthened the section of the breakwater structure on the basis of analyzing the damage causes of the breakwater, according to the new specification requirements and new design wave elements, and has carried out optimization comparison and verification through physical model tests. Finally, the reinforcement scheme of adding one layer of larger Chinese accropode to the existing fixed-point random placement of the Chinese accropode is determined. The engineering practice has proved that after using double-layer Chinese accropode for reinforcement of the breakwater, the overall stability of the structure is good, its ability to resist wind and waves can be significantly improved. The scheme is simple and has strong operability. It is suitable for repair and reinforcement of mound-type breakwater and can be used as reference for similar projects.

**Keywords:** breakwater; reinforcement; double-layer Chinese accropode

### 1 工程概况

项目位于粤东开敞海域, 通过建设L形单环抱防波堤, 为港内拟建码头工程提供掩护。已建防波堤为抛石斜坡堤结构, 总长2 239 m, 分为东

段、圆弧段及南段(含堤头段), 长度分别为892.4、114.2和1 232.4 m。堤头段及圆弧过渡段采用18 t扭王字块护面, 堤身采用15 t扭王字块护面, 堤头边坡为1:1.5, 堤身边坡为3:4, 防波

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 黄敏(1976—), 男, 高级工程师, 从事水运工程建设项目管理工作。

堤总平面布置见图 1。

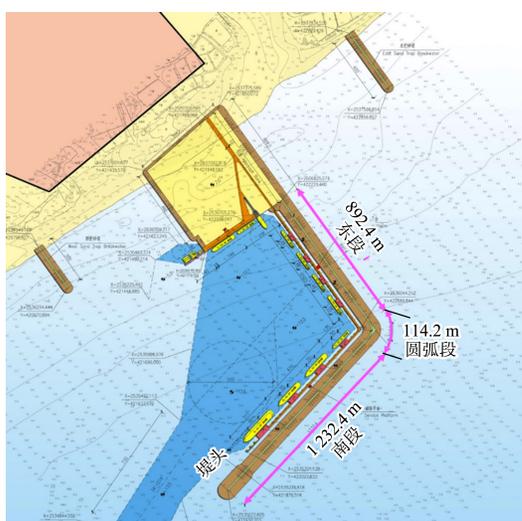


图 1 防波堤总平面布置

防波堤在 2016 年 9 月建成后, 接连受到强台风“妮妲”、“莫兰蒂”、“海马”的袭击。据现场踏勘及测量数据显示, 防波堤南段里程 K2105—K2130、K1640—K1870 共 255 m 的范围内出现了不同程度的损毁, 堤顶及外坡受损最为严重, 护面块体出现滑移、倒伏、断肢, 并出露垫层块石或堤心石。部分里程因台风袭击间隔期太短未能及时修护, 二次受灾, 导致 -3.0 m 以上堤体被海浪贯穿。2017 年 5 月, 按原施工图设计结构断面完成受损部位的修复。

2018 年 9 月, 受超强台风“山竹”的影响, 防波堤南段 K1800 附近 100 m 范围内再次受损, 受损情况见图 2。鉴于近年来我国南部海域出现的台风频率与强度均有所增加, 某高校对项目所在海域再次进行波浪整体数学模型研究, 结果显示工程推算的设计波要素发生了较大的变化, 50 a 一遇外海波高比 2009 年的波浪数学模型研究(包含 1949—2008 年台风)波高增大约 14%。若继续沿用原设计结构断面对防波堤进行修复, 其防护能力与可靠性已无法满足掩护需求。为保障港内码头生产作业的安全, 需详细分析其损坏的主要原因, 结合工程实际情况, 在兼顾施工可行性、经济性等因素的基础上, 制定更为适宜的加固方案。



图 2 “山竹”台风后堤身受损情况

## 2 防波堤受损原因分析

造成斜坡堤损坏的主要因素可归结为: 对波浪水动力特性认识不足、地基承载力不足、局部构造不尽合理、施工期抗浪能力不足, 其中大部分损坏并非由单一因素导致的, 而是由多种因素联合作用造成的<sup>[1]</sup>。

防波堤所在区域地质表层为承载力较高的砂混黏性土、泥石混合层, 无需进行地基处理, 原设计为避免地基遭波浪淘刷致使堤体发生滑移或不均匀沉降, 除增设土工布加筋垫层外, 还增强了护底块石规格及护底长度。根据防波堤工后沉降和位移观测数据及台风袭击后堤体未出现明显滑移和沉降的情况, 可排除地基因素影响。

原设计方案波浪要素的确定综合了 2009 年数模<sup>[2]</sup>及物模<sup>[3]</sup>研究成果, 两者研究成果相近, 经多个实测资料验证后, 最终取数模成果。数模成果采用“深海台风浪计算方法”, 通过统计分析近 60 a(1949—2008 年)对工程海域有影响的台风, 推算出设计波浪要素, 然而本工程海域自 2013 年以后发生台风的级别、数量及频率均创出历史新高。经 2018 年数模<sup>[4]</sup>推算, 在 50 a 一遇的极端高水位 3.12 m 下, 2013 年台风“天兔”引起的防波堤前沿的最大有效波高可达 7.7 m, 2016 年台风“海马”在防波堤前沿最大有效波高为 6.7 m, 均超过本工程堤头最大有效波高 6.6 m 的取值, 因此原数模推算采用的近 60 a 台风数据已不具备代表性。

综上，防波堤受损害其原因是防波堤遭遇强台风袭击期间，在大于施工图设计的 50 a 一遇波浪标准的波浪持续作用下，致使防波堤浪涌较为集中的南段遭受破坏。多个台风的有效波高已接近甚至超过原设计波浪要素，因此，有必要重新推算设计条件，并对防波堤结构断面进行调整。

### 3 防波堤加固方案确定

斜坡堤破坏后会出现护面块体滑落、块体断肢、出露块石等情况，其防浪能力难以有效评估，如拆除施工难度较大，目前大多在原堤现状基础上外加垫层和新护面块体进行修复，并通过物理模型试验对修复方案进行验证。双层扭王字块体作为一种新型护面结构形式，在恶劣海况下的防波堤<sup>[5]</sup>或潜堤加高<sup>[6]</sup>中均已有相关的实践应用，本工程加固方案的思路为：首先对防波堤受损部位视损坏程度制定修复方案，应修尽修，尽可能恢复其设计断面，并在修复验收合格的基础上，对现有结构薄弱位置通过直接覆盖 1 层大规格扭王字块进行加固处理。

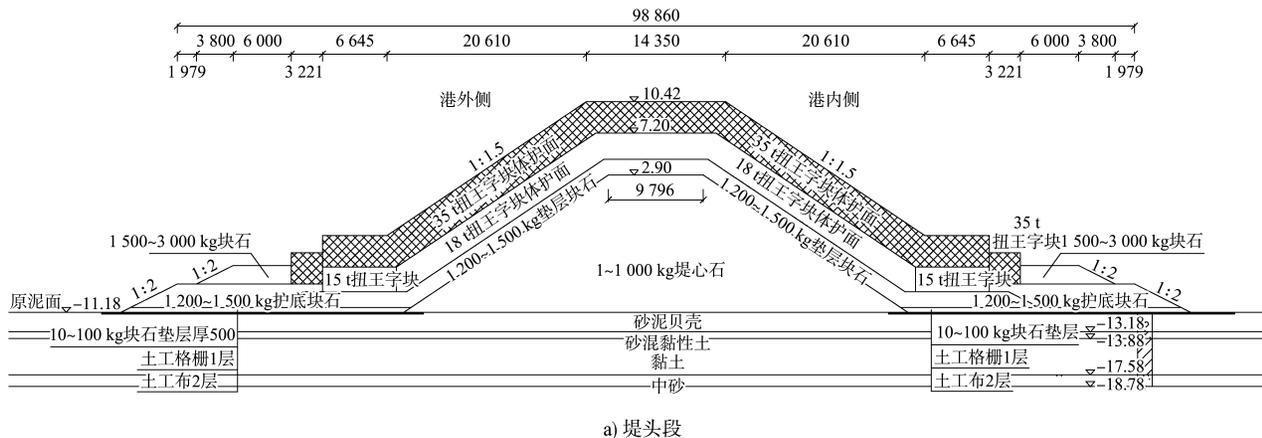
根据 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》第 4.3.7 条<sup>[7]</sup>对加固块体质量进行计算，情况特殊、现场自然条件复杂时块体稳定系数  $K_D$  值应取最小值，采用的设计波要素为增补 2009—2016 年间台风资料后的推算成果，调整后块体的稳定质量见表 1。考虑工程设计波浪平均周期大于 10 s 的不利因素，以及相关文献对上下 2 层扭王字块

的质量差应尽量大的研究成果，块体质量的设计取值适当加大。

表 1 调整后块体的稳定质量

方案	位置	设计波高值/m	是否破碎波	$K_D$ 值	计算质量/t	设计取值/t
原施工图	堤头	6.60	否	18	14.32	18
	堤身	6.40	否	18	13.06	15
加固方案	堤头	7.44	否	15	28.43	35
	堤身	7.44	否	15	24.61	29

波堤加固方案确定为：南段堤头在已有的 18 t 扭王字块护面基础上，直接覆盖 1 层 35 t 扭王字块；南段堤身(圆弧段)拆除堤顶的 15 t/18 t 扭王字块护面后，铺设 1.5~2.9 t 垫层块石，堤顶及外坡再安放 1 层 29 t 扭王字块体，内坡基本维持不变；防波堤东段在历次台风侵袭中并未受损，故不作加固处理。对方案压脚进行优化<sup>[8]</sup>，即将压脚改为宽 6 m、厚 1.88 m 的 1.5~3.0 t 压脚块石，考虑块石现场供应困难，提议使用拆除后的 15 t/18 t 人工块体替代，最终压脚部分优化为：堤头段压脚采用护底块石上压 35 t 扭王字块体，堤身段压脚采用护底块石上压 29 t 扭王字块体+拆除的 15 t/18 t 扭王字块体。经验证，优化后的断面在各级水位及相应的 50 a 一遇不规则波作用下，当波浪累积作用时间相当于原型 7 h 后，均满足稳定要求。各断面在极端高水位下进行了增大波高的稳定性试验(波高增大至相应水深下的极端破碎波高，有效波高增大 12%)，结果表明各部位在上述增大波高工况的波浪作用下也均保持稳定。设计结构断面见图 3。



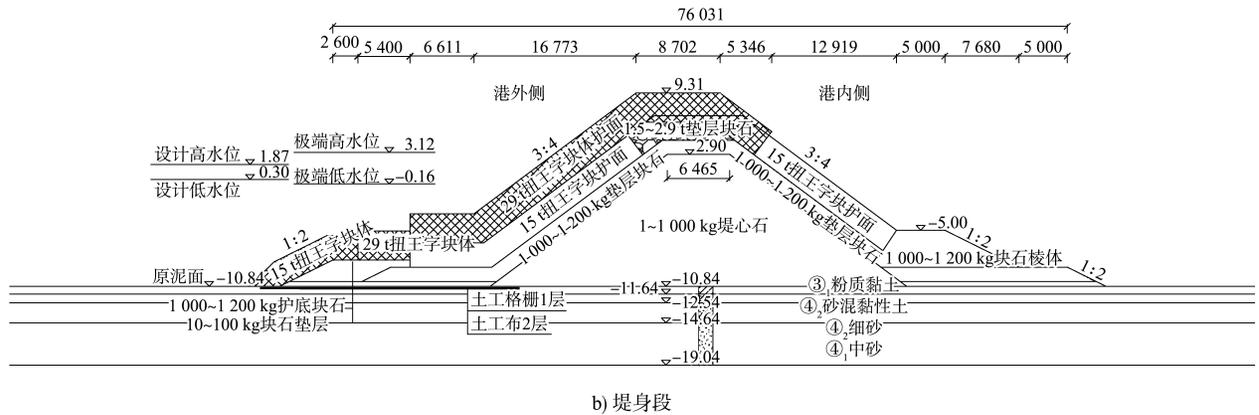


图 3 防波堤加固设计断面 (尺寸: mm; 高程: m)

#### 4 防波堤修复与加固施工

防波堤按先修复后加固的原则组织施工, 修复后的防波堤验收标准为: 坡顶、坡肩线条平顺, 坡面符合设计要求, 基层护面块体疏密程度均匀<sup>[9]</sup>。

堤身修复施工前在南堤中部修筑登陆平台, 以平台为起始点, 向两端进行修复, 260 t 履带吊上堤后对堤顶及零散块体进行迁移, 迁移的块体直接用于外坡修复及压脚加固。堤顶块体迁移过程中, 同步进行受损堤身修复及堤顶垫层块石抛理, 所需块石由平板驳船运输至施工现场, 由自卸车和铲车通过登陆平台运至施工地点。

按照应修尽修的指导方针, 修复要求: 1) 整体修复。外坡扭王字块被打散, 出露块石以及垫层块石严重挤压变形的部位要求整片吊开周边块体, 修复垫层厚度及坡度至符合设计要求后, 重新补安原规格扭王字块。2) 零星修复: 整体排查护面缺陷部位并标识, 如块体间分离、出露孔洞过大、块体严重断肢等, 具备起吊条件的, 二次起吊重新调整块体姿态或替换、补安; 如果已与周边扭王字块咬合密实, 可以不动, 通过加固层块体进行覆盖。

南堤堤身段修复与加固实行分段流水作业, 施工步距控制在 50 m 以内, 随修随护, 先加固堤坡面, 再加固堤顶面。南堤堤身段 29 t 扭王字块采用 260 t 履带吊陆上吊安, 块体由 500 t 平板驳船运至施工现场。堤外坡块体顺修复方向前进施工, 堤顶块体则采用倒退法施工。南堤堤头段 35 t 块体采用 260 t 履带吊与 2 000 t 平板驳船的船机组

合进行水上吊安。

由于施工规范对加固层扭王字块的安放要求并无规定<sup>[10]</sup>, 工程在执行施工规范中关于单层扭王字块安放要求的同时, 根据现场实际情况以及工程全尺寸断面模型模拟经验, 规定加固层扭王字块安放要求: 1) 对于设计低水位以下扭王字块, 采用平面坐标定位法, 即采用 GPS-RTK 测量定位技术+定位系统软件实现实时定位。根据按设计密度绘制的块体安放平面网格图进行定点随机安放。要求 35 t 和 29 t 扭王字块体的安放数量分别为 100 m<sup>2</sup> 安放不少于 11 和 12 块。2) 对于设计低水位以上扭王字块, 以满足块体不悬空、块体相互咬合紧密且坡面无漏洞或过大隆起为原则, 以人工控制为主, 并尽可能满足单位面积安装数量要求。

加固后的防波堤经“苏拉”等台风袭击后, 防波堤整体结构稳定, 至今未发生结构受损事件, 加固效果达到预期, 如图 4 所示。

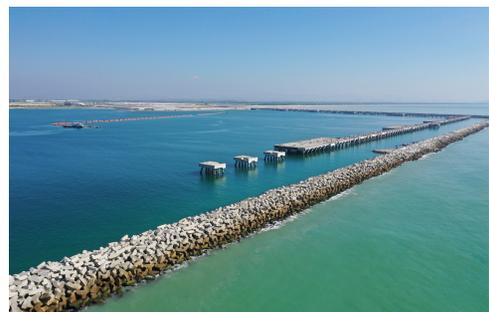


图 4 防波堤加固后的工程实体