

Structural Stability Analysis and Optimization of the Repairing Construction of Collapsed Breakwater-The Practice of Jiangsu LNG Breakwater

Heyang Li Jiaquan Hou

CNOOC Jiangsu Natural Gas Co., Ltd., Yancheng, Jiangsu, 224500, China

Abstract

In response to the structural stability repair needs after the collapse of the S2+300-S2+400 section of the Jiangsu LNG project breakwater, this study analyzes the collapse mechanism, conducts stability assessment, and optimizes the repair plan based on on-site investigation and monitoring data. Relying on drone aerial photography and underwater sonar scanning to identify the collapse range and characteristics, using finite element method to build a stability analysis model for the breakwater structure, and identifying the key causes of structural instability; Adjust the block layout plan and construction parameters based on the technique of repairing the twisted crown block protective surface. The practical case of the project shows that the optimized repair plan has increased the overall anti slip safety factor of the breakwater from 1.18 to 1.52, and the anti overturning safety factor from 1.25 to 1.63. The structural settlement does not exceed 5mm, which complies with the provisions of the "Design Code for Breakwaters and Banks" (JTS154-2018). This study can provide scientific basis and technical support for the structural stability control of similar collapsed breakwater repair projects.

Keywords

breakwater repair; structural stability; finite element analysis; twisted king block; optimization plan

坍塌防波堤修复施工中的结构稳定性分析及优化—江苏 LNG 防波堤工程实践

李赫阳 侯加全

中海油江苏天然气有限责任公司, 中国·江苏 盐城 224500

摘要

针对江苏LNG项目防波堤S2+300-S2+400段坍塌后的结构稳定性修复需求开展处理, 依托现场勘查与监测数据, 分析坍塌机理、做稳定性评估、优化修复方案。依靠无人机航拍、水下声纳扫描查明坍塌范围和特征, 靠有限元法搭建防波堤结构稳定性分析模型, 找出结构失稳关键诱因; 依托扭王字块护面修复工艺, 调整块体布置方案和施工参数。项目实操案例显示, 优化后的修复方案让防波堤整体抗滑移安全系数从1.18升到1.52, 把抗倾覆安全系数从1.25提至1.63, 结构沉降量不超过5mm, 符合《防波堤与护岸设计规范》(JTS154-2018)规定。该研究可为同类坍塌防波堤修复工程的结构稳定性控制提供科学依据与技术支撑。

关键词

防波堤修复; 结构稳定性; 有限元分析; 扭王字块; 优化方案

1 引言

港口工程的核心防护结构为防波堤, 是抵御风浪、守护港池水域的核心力量, 结构稳定程度直接关联港口运营安全^[1]。江苏 LNG 项目防波堤采用抛石斜坡堤构造型式, 总长 2510m, 堤顶标高 4.0m, 按允许部分越浪标准设计, 建成后切实保障 LNG 码头及航道通航安全。受复杂海洋环境、

波浪长期冲击及地质条件影响, 防波堤 S2+300 至 S2+400 段出现整体滑移坍塌, 未发现块石和连锁排缺失, 但会严重破坏防波堤整体防护作用, 若未及时修复, 可能让坍塌范围变大, 危及 LNG 船舶靠泊及能源保供安全^[2]。修复传统防波堤大多采用经验性施工方案, 既无坍塌机理的系统分析, 也无结构稳定性的量化评估, 完成修复的结构易再次失稳^[3]。以江苏 LNG 防波堤坍塌修复工程为研究对象, 采用现场勘查、数值模拟和工程实践结合的方法, 彻析坍塌机理, 构建结构稳定性分析模型, 优化修正施工方案, 精准修复坍塌防波堤 维持长期稳定, 为北方类海洋环境内的防波堤修复工

【作者简介】李赫阳(1989-), 男, 中国辽宁凌源人, 本科, 工程师, 从事液化天然气储运工程研究。

程提供技术借鉴。

2 工程概况与坍塌特征

2.1 工程概况

江苏 LNG 项目防波堤坐落盐城市滨海县滨海港区南港池, 地理坐标 34° 18' N, 120° 16' E, 用抛石斜坡堤结构, 堤身主体的组成部分有 800-1000kg 块石、二片石垫层、土工格栅及 10t 扭王字块护面, 堤顶标高 4.0m, 外侧边坡及内侧坡体坍塌段对应防波堤 S2+300-S2+400 区段, 长度值 100m, 这片区域紧邻南港池口门, 受波浪、潮流作用明显, 实测最大有效波高 2.57m, 潮流流速 0.5-1.0m/s。工程区地质条件繁杂, 表层为淤泥质粉质黏土, 厚度 3 至 5m, 承载能力偏弱, 底部为粉砂层, 10-15 米厚, 含大量孔隙水, 基本地震烈度 VII 度, 损害结构稳定性, 修复工程核心工作是补装坍塌段的扭王字块, 保障防波堤结构稳固及防护功能复原。

2.2 坍塌特征与机理分析

用无人机航拍巡查、水下声纳扫测, 列出坍塌段特征: 坍塌形态为整体滑移, 滑移方向为防波堤外侧, 滑移距离 1.2m 上下, 坍塌段部分堤身边坡坡度为 1: 最大堤顶沉降 0.3m; 水下声纳扫测结论, 坍塌堤脚带局部冲刷坑, 最大冲刷深度值 0.8m, 部分护面扭王字块移位、缺失, 缺额约 350 块。

坍塌机理分析结果显示, 3 方面因素共同作用引发失稳, 一是海洋环境长期影响, 浪涛反复拍打堤身, 引发护面块体松动、堤身块石磨损, 损坏结构整体连贯性; 二是地质条件作用, 表层软土承载强度不足, 因堤身自重和波浪荷载出现不均匀沉降, 造成结构滑移; 三是潮流冲刷作用, 堤脚周边潮流流速高, 长期冲刷形成冲刷坑, 损坏堤身基础稳固性, 最后引发整体崩塌。

3 结构稳定性分析模型

3.1 模型建立

用 Midas GTS NX 有限元软件搭建防波堤结构稳定性分析模型, 模型覆盖坍塌段及两侧各 50m 正常段, 沿堤身轴线延伸 200m, 垂直轴线宽 100m, 模型单元用实体单元模拟堤身块石、垫层、土工格栅及地基土, 用壳单元模拟扭王字块护面, 单元总数近 120000 个。材料参数经现场取样试验判定 (表 1), 堤身块石采用摩尔-库仑本构模型, 土工格栅采用线弹性本构模型, 地基土借助修正剑桥本构模型模拟软土非线性特性, 给定边界条件: 模型底部做固定约束, 侧面安装水平约束, 顶部为自由面, 兼顾波浪荷载、潮流力及结构自重作用, 以规则波为标准计算波浪荷载, 用静压力等效法加在堤身表面^[4]。

表 1 主要材料物理力学参数

材料名称	重度 (kN/m ³)	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	弹性模量 (MPa)	泊松比
800-1000kg 块石	26.5	0	40	800	0.20
二片石垫层	25.8	0	38	600	0.22
土工格栅	20.0	—	—	500	0.30
淤泥质粉质黏土	18.5	15	8	15	0.42
粉砂	20.8	0	32	80	0.35
10t 扭王字块	26.0	—	—	1000	0.21

3.2 稳定性评价指标

依照《防波堤与护岸设计规范》, 选抗滑移安全系数、抗倾覆安全系数及结构沉降量作为稳定性评价核心指标: 抗滑移安全系数 (K_s): 堤身沿滑动面抗滑力和滑动力的比值, K_s 要 ≥1.3; 抗倾覆安全系数 (K_t): 堤身抗倾覆力矩与倾覆力矩的比值, K_t 需 ≥1.4; 结构沉降量 (s): 堤顶及堤身关键断面的最大沉降量, s 必须 ≤10mm。

3.3 原结构稳定性分析结果

原坍塌段防波堤稳定性分析数据见 (表 2), 抗滑移安全系数只有 1.18, 抗倾覆安全系数 1.25, 全都达不到规范标准, 堤顶最大沉降值是 18mm, 滑动面核心位置是地基软土层与堤身块石的接触面, 倾覆转动中心设为堤脚位置, 与现场坍塌特征吻合, 确认模型的可靠属性^[5]。

表 2 原结构稳定性分析结果

评价指标	计算值	规范要求	是否满足
抗滑移安全系数 (K _s)	1.18	≥1.3	否
抗倾覆安全系数 (K _t)	1.25	≥1.4	否
堤顶最大沉降量 (s)	18mm	≤10mm	否
滑动面位置	软土层与堤身接触面	—	—

4 修复方案优化与稳定性分析

4.1 修复方案设计

依据坍塌机理和稳定性分析结论, 确定以扭王字块护

面补强、堤脚防护及软基加固为核心的综合修复方案, 围绕结构失稳核心问题做针对性设计, 兼顾修复效果和工程性价比。扭王字块吊装安放如图 1 所示, 采用“坡顶规则排布 +

坡脚双层品字形排布”的差异化方案，修复坡顶幅宽 3m，依 1.2m 间距排布 75 块扭王字块，增强堤顶抗浪越功效；坡脚为抗滑移关键区域，设置两道扭王字块防护带，第一道在冲刷坑边缘设双层品字形排布，块体留 0.8m 间距增强护面密实度，第二道加密布置在坍塌滑移边界，合计补充 350 块 10t 扭王字块，使护面与堤身协同受力；堤脚最大冲刷深度 0.8m 的区域抛填大块石，填补冲刷坑，修成宽 5m、厚 1.5m 的护脚平台，同步借助护脚平台分摊堤身自重荷载，减小地基土附加应力。

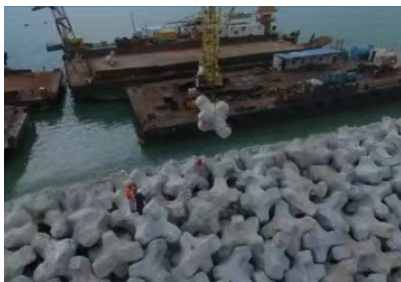


图 1 扭王字块吊装安放

4.2 优化方案稳定性分析

借助建立的有限元模型开展优化后修复方案稳定性分析，结果详见表 3。把防波堤抗滑移安全系数升到 1.52，把抗倾覆安全系数拉到 1.63，把堤顶最大沉降量控制到 4.8mm，全部指标都达标规范要求，结构稳定性大幅增强。应力分布分析结果表明，优化后堤身应力传递路径更合理，最大主应力汇聚堤脚护面块石区域，最高值 1.8MPa，远低于块石抗压强度，不存在局部压溃风险；扭王字块护面应力分布平稳，应力最大值 0.6MPa，材料维持弹性工作状态，块体齿角彼此钩连，有效分散波浪冲击荷载；地基土附加应力大幅下降，软土层最大附加应力从 0.35MPa 减至 0.22MPa。同时借助模型模拟极端浪作用后的结构变形，堤身最大水平位移只有 2.1mm，不存在倾覆或滑移动向，确认优化方案的抗灾实力。

表 3 优化方案稳定性分析结果

评价指标	计算值	规范要求	提升幅度
抗滑移安全系数 (K_s)	1.52	≥ 1.3	+28.8%
抗倾覆安全系数 (K_t)	1.63	≥ 1.4	+30.4%
堤顶最大沉降量 (s)	4.8mm	$\leq 10\text{mm}$	-73.3%
滑动面位置	无明显滑动面	—	—

4.3 施工参数优化

维持修复施工过程结构稳定，杜绝施工扰动造成二次失稳，结合工程现场水文地质条件及施工设备性能，针对扭王字块安装、堤脚抛石施工两大关键工序，优化施工参数精度，确定专项施工管控标准。扭王字块安装推行“低平潮时段施工+起重船精准定位”方案，选定潮差 $\leq 0.5\text{m}$ 、流速 $\leq 0.3\text{m/s}$ 的低平潮时段开展作业，起重船采用 GPS+北斗双定位系统，严格把控作业半径为 9.6-16.0m，吊臂仰角 $30^\circ - 75^\circ$ ，块体

吊装下放速度 $\leq 0.5\text{m/s}$ ，安装偏差 $\leq 0.3\text{m}$ ，相邻块体齿角互锁勾连、错列放置，维持护面整体完整，每完成 10 块安装就做一次平整度检测，不合格马上返工；堤脚抛石运用“分层抛填、分层整平”工艺，分三层投放 1000-1500kg 大块石，每层厚 0.5m，先等下层块石稳定，再开展上层抛填作业，抛填完工后，潜水员借助水下整平仪实施整平，平整度偏差 $\leq 0.2\text{m}$ ，让护脚平台受力均匀，避免局部应力聚集。

5 工程应用效果

5.1 施工过程监测

修复施工作业阶段，安装 6 个沉降监测点、4 个水平位移监测点和 3 个应力监测点，实时监测施工过程的结构稳定性，监测结果表明，施工时段堤顶最大沉降量 3.2mm，最大横向位移 1.5mm，2MPa 为堤身应力最大值，未发现异常变形或失稳现象，证实施工方案合理。

5.2 修复效果评价

修复工程 2026 年 3 月完工，完工后用无人机航拍、水下声纳扫描及荷载试验评估效果。外观质量扭王字块整齐布设，不存在缺失、移位状况，修整堤身边坡，坡度契合设计要求 (1:3)，堤脚冲刷坑彻底填实；稳定性检测用静载试验检测结构稳定性，施加等效波浪荷载后，堤顶下沉 1.2mm，水平方向移位 0.8mm，卸载后变形彻底复原，实测抗滑移安全系数为 1.48，抗倾覆安全系数实际检测值 1.59，与数值模拟结果基本契合；完工 6 个月后长期监测数据表明，结构累计沉降 5.0mm，累计水平位移 2.0mm，全都达到规范标准，结构维持稳定。

6 结论

施工期间采用的“低平潮施工、精准定位安装、跳桩施工”等优化参数，切实保障施工阶段结构安全，完工后长期监测，验证修复方案可长期稳定运行且可靠。本次研究提出的坍塌防波堤稳定性分析手段及优化修复方案，为诸如软土地基、复杂海洋环境下的防波堤修复工程提供科学依据和技术参考，推广应用潜力巨大。后续可进一步开展波浪荷载长期作用下的结构稳定性演变规律研究，依托监测数据搭建结构健康预警系统，实现防波堤智能运维和提前防控。

参考文献

- [1] 张海荣, 李冠星, 刘扬勇, 等. 萨摩亚阿皮亚港防波堤结构创新设计[J].水运工程, 2025, (10):48-54+131.
- [2] 刘宏伟, 王琰, 吴哲丰. 长周期波作用下一种宽肩台防波堤的应用[J].中国水运, 2025, (08):95-97.
- [3] 陈日才. 浅谈防波堤监理过程中的质量控制[J].中国住宅设施, 2024, (12):155-157.
- [4] 梁伟. 防波堤护面结构修复加固技术[J].珠江水运, 2024, (17):54-56.
- [5] 黄敏, 李达华, 许建武. 双层扭王字块护面在某防波堤加固工程中的应用[J].水运工程, 2024, (08):198-201+207.