

# 黄骅港河口港区3号、4号码头修补 施工组织工艺优化

韩宝瑞

(中交一航局第一工程有限公司)

**摘要:**为解决黄骅港河口港区3号、4号码头因长期服役及恶劣海洋环境出现多构件破损,且修复受海水涨落潮制约的问题,依据现行行业标准JTS 310—2025《港口基础设施维护技术规范》对构件破损程度进行定量描述,采用裂缝修补、封缝灌浆、挂铁网支设锚杆等多种工艺,结合构件受力差异与破损形态建立多工艺协同修复机制,制定完整施工组织设计,在确保工程质量和安全的前提下完成修补。结果显示,该综合修复技术体系有效解决了码头横梁、纵梁、桩帽等多构件的破损问题,提升了码头结构安全性与功能性,保障了港口吞吐量需求,降低了运营中断风险,取得了显著的经济效益。研究形成的修复技术体系对同类服役多年、多构件受损的海洋环境码头修复具有直接实用价值,可为类似工程提供技术依据。

**关键词:** 码头修复;施工组织优化;外包加固;裂缝修补;封缝灌浆

## 0 引言

港口码头作为海陆联运的关键枢纽,长期服役于海洋环境中易受盐雾侵蚀、潮汐作用、荷载冲击等因素影响,导致混凝土结构出现多类型破损,影响结构安全与运营效率。目前,国内外针对码头修复的研究多聚焦于单一破损类型如裂缝、保护层脱落或单一工艺如化学灌浆、外包加固。梁光先等<sup>[1]</sup>研究了海港码头胸墙混凝土裂缝成因及修补技术,仅针对裂缝这一单一破损形式提出解决方案。程路<sup>[2]</sup>分析了高桩码头挡土墙沉降原因及修补工艺,未涉及多构件协同修复问题。对于服役20余a、处于恶劣海洋环境下,同时存在横梁开裂、桩帽劈角、纵梁保护层脱落等多构件复合破损的码头,现有研究缺乏全面系统的修复工艺体系,且未充分考虑潮汐环境对施工的制约,导致修复方案实用性不足<sup>[3]</sup>。

本文以黄骅港河口港区3号、4号码头为研究对象,围绕“现场施工条件适配→多构件协同修复→潮汐环境响应”构建施工组织体系。针对不同构件的受力特征与破损形态,划分修复优先级并匹配专属工艺,如横梁作为主要承重构件,破损以深层开裂为主,采用化学灌浆与挂铁网支设锚杆协同工艺。结合黄骅港潮汐规律,优化施工参数与工序,针对桩帽劈角修复选用早强混凝土,明确初凝终凝时间与潮汐间隔的匹配关系。建立

“材料管控→过程监督→后期检测”一体化质量保障流程,明确各环节验收标准。通过上述优化,形成适配复杂海洋环境下多构件破损码头的修复方案,弥补现有研究不足,为同类工程提供技术参考。

## 1 工程概况

黄骅港河口港区3号、4号码头已服役20余a,在海洋盐雾、海浪冲击、冻融循环等恶劣环境作用下,混凝土结构出现明显耐久性破坏,主要构件破损情况如下:横梁共92根破损,以断面开裂、顺筋锈胀开裂为主,其中宽度大于0.3mm的贯穿性裂缝占比65%,符合JTS 310—2025《港口基础设施维护技术规范》中“严重破损”定义。41根纵梁发生了破损,程度较轻,以混凝土保护层脱落为主,脱落面积均小于构件表面积的10%,属轻度破损。41个桩帽共45处破损,多为劈角,劈角深度50~120mm,部分露出受力钢筋,属中度—严重破损。基桩4根破损,均为劈角,破损范围集中在桩顶1.5m范围内。面板共75处裂缝,总长382.5m,其中0.2~0.3mm非耐久性裂缝占比40%,大于0.3mm耐久性裂缝占比60%。32个靠船构件发生了破损,以钢筋锈蚀为主,锈蚀深度0.2~0.5mm,保护层脱落面积占构件表面积的15%~20%。引桥部分17根基桩劈角、9处横梁空鼓、5块面板开裂且钢筋锈蚀,空鼓面积

均小于 $0.5\text{ m}^2$ ，面板裂缝宽度最大 $0.4\text{ mm}$ 。

## 2 破损归类与成因分析

### 2.1 破损归类

水工混凝土病害从外观可分为剥蚀和开裂2类。剥蚀包括冲蚀、磨蚀、疏松、剥落，开裂为混凝土出现裂缝的现象。结合本工程实际，破损归类为：开裂类集中在横梁、面板、引桥面板，横梁以深层贯穿裂缝为主，面板多为表面细裂缝；剥蚀类分布于纵梁、桩帽、基桩、靠船构件、引桥基桩，纵梁以保护层剥落为主，桩帽和基桩以劈角为主，靠船构件以钢筋锈蚀伴保护层脱落为主，引桥横梁以空鼓为主。

### 2.2 成因分析

针对上述破损类型，结合工程环境与结构受力特点开展针对性分析。

1) 横梁深层贯穿裂缝：横梁长期承受船舶装卸荷载与堆载，属主要承重构件，受力集中且长期处于高应力状态，同时海洋盐雾渗透导致钢筋锈胀，双重作用下产生深层裂缝。

2) 面板表面裂缝：主要因温度变化引发混凝土热胀冷缩，加之混凝土干缩变形，且面板厚度较薄，约束条件弱，易出现细裂缝。

3) 纵梁保护层剥落：纵梁受力较小，破损主要源于海洋盐雾长期侵蚀，混凝土碳化后强度下降，表层逐渐疏松剥落，无明显受力破损特征。

4) 桩帽劈角：桩帽连接基桩与上部结构，受力复杂且直接接触海水，涨落潮时干湿反复交替，混凝土表层受冻融循环破坏，同时船舶靠泊时的水平冲击力传递至桩帽，导致边角劈裂。

5) 靠船构件钢筋锈蚀：靠船构件直接承受船舶撞击力，保护层易出现破损，海水直接接触钢筋引发锈蚀，锈蚀产物膨胀将进一步加剧保护层脱落。

6) 引桥横梁空鼓：引桥施工时混凝土振捣不密实，存在气泡，后期受环境湿度变化影响，气泡膨胀导致混凝土与基层脱离形成空鼓。

7) 基桩劈角：船舶靠泊时的侧向力传递至基桩顶部，且基桩顶部无有效防护，长期冲击下出现边角劈裂，同时涨落潮时海水浸泡加剧破损。

## 3 修复工艺

### 3.1 裂缝修补工艺

根据裂缝宽度与深度选择处理方式， $0.2\sim 0.3\text{ mm}$ 非耐久性裂缝采用封闭法，流程为切缝→凿

除混凝土→冲洗→风干→拌和材料→封堵。大于 $0.3\text{ mm}$ 耐久性或贯穿性裂缝采用化学灌浆法，流程为清缝→钻孔→埋灌浆嘴→封缝→检测→灌浆→表面修补。针对横梁深层裂缝，通过工艺试验确定灌浆压力优化参数：先开展室内模拟试验，采用与工程相同强度等级的混凝土试块预制裂缝，分别在 $0.2\text{ MPa}$ 、 $0.5\text{ MPa}$ 、 $0.8\text{ MPa}$ 、 $1.0\text{ MPa}$ 压力下灌浆，检测浆液扩散半径与填充率，结果显示 $0.5\text{ MPa}$ 和 $0.8\text{ MPa}$ 时填充率达95%以上，且无混凝土试件崩裂现象。现场试施工选取3根横梁进行验证，相同压力下裂缝灌浆28d后钻芯取样，浆液填充均匀，因此确定化学灌浆压力为 $0.5\sim 0.8\text{ MPa}$ 。同时，为增强横梁修复后整体性，采用挂铁网支设锚杆与化学灌浆协同工艺，锚杆选用 $\phi 20\text{ mm}$ 螺纹钢，长度 $500\text{ mm}$ ，按 $300\text{ mm}$ 间距布置，铁网采用 $\phi 6\text{ mm}$ 钢筋焊接，网格尺寸 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ ，锚杆植入后挂设铁网，再进行灌浆，形成“灌浆填充裂缝→锚杆固定结构→铁网增强整体性”的协同机制。

### 3.2 剥蚀破损修复工艺

桩帽劈角修复采用立模浇筑早强混凝土工艺，流程为凿除混凝土→冲洗→钢筋除锈→喷涂阻锈剂→调配混凝土→立模浇筑→养护。早强混凝土性能参数：初凝时间 $1.5\text{ h}$ ，终凝时间 $3\text{ h}$ ， $24\text{ h}$ 抗压强度 $\geq 25\text{ MPa}$ ， $7\text{ d}$ 抗压强度 $\geq 35\text{ MPa}$ 。结合黄骅港潮汐规律，涨落潮间隔约 $6\text{ h}$ ，初凝时间 $1.5\text{ h}$ 小于潮汐间隔，确保浇筑后混凝土在下次涨潮前达到初凝，避免海水浸泡影响强度。纵梁保护层剥落采用聚合物水泥砂浆修补，流程为凿除混凝土→冲洗→钢筋除锈→喷涂阻锈剂→调配水泥砂浆→砂浆涂抹→整平→养护。聚合物水泥砂浆选用环氧改性砂浆，黏结强度 $\geq 3\text{ MPa}$ ，抗氯离子渗透系数 $\leq 1.0\times 10^{-12}\text{ m/s}$ ，确保修复后抗侵蚀能力。靠船构件钢筋锈蚀修复采用“除锈+阻锈剂+聚合物砂浆+防腐涂料”组合工艺，先人工除锈至钢筋露出金属光泽，喷涂钢筋阻锈剂，再采用聚合物水泥砂浆修补保护层，最后涂刷防腐涂料。引桥横梁空鼓修复采用压力注浆法，流程为钻孔→注浆→封孔→养护。选用水泥浆水灰比为 $0.5$ ，注浆压力 $0.3\text{ MPa}$ ，确保浆液填充空鼓区域。基桩劈角修复采用外包加固工艺，流程为裂缝处理→凿除混凝土→冲洗→凿毛→放置钢筋→支模浇筑混凝土→拆模养护。在基桩顶部 $1.5\text{ m}$ 范围内外包

φ10 mm 钢筋网,浇筑 C35 混凝土,厚度 80 mm,增强抗冲击能力。

### 3.3 防腐处理工艺

所有构件修复完成后均进行防腐处理。主体构件涂刷防腐涂料:底漆为环氧树脂封闭漆;中间漆为环氧树脂漆,厚度不小于 250 μm;面漆为丙烯酸树脂面漆,厚度不小于 200 μm。系船柱表面除锈后涂刷防腐油漆,底漆为富锌漆,平均厚度为 75 μm;中间漆为环氧云铁防锈漆,平均厚度为 100 μm;面漆为聚氨酯漆,平均厚度为 100~150 μm。

## 4 施工组织设计

### 4.1 施工流程规划

结合潮汐规律与构件破损优先级,制定分阶段施工流程:第 1 阶段处理桩帽、靠船构件、基桩等水下及潮间带构件,利用落潮时段(每天约 3 h)施工,优先修复直接接触海水的破损部位,避免海水持续侵蚀;第 2 阶段处理横梁、纵梁、面板等上部结构,安排在非汛期且天气晴朗时段,确保灌浆、浇筑等工艺不受雨水影响;第 3 阶段处理引桥构件,引桥交通量较小,采用半幅施工半幅通行的方式,减少对港口运营的影响;第 4 阶段进行整体防腐处理,在所有构件修复完成后集中开展,确保防腐涂层连续完整。

### 4.2 多工艺协同

依据构件受力差异与破损形态,建立协同修复机制。横梁采用“化学灌浆+挂铁网支设锚杆”协同,先灌浆填充裂缝,再通过锚杆与铁网增强结构整体性,针对承重构件双重保障。桩帽采用“早强混凝土浇筑+防腐涂料”协同,先修复劈角缺损部位,再通过防腐涂层隔绝海水,针对潮间带构件“修复+防护”结合。靠船构件采用“钢筋除锈+阻锈剂+聚合物砂浆+防腐涂料”协同,从除锈、阻锈、修补到防护形成全流程处理,针对锈蚀破损构件多环节管控。

### 4.3 潮汐适配措施

针对黄骅港潮汐规律(平均潮差 2.5 m,每天 2 次涨落潮),制定专项适配措施:编制潮汐施工日历,提前 7 d 获取准确潮汐时间,每批次施工前明确落潮时段,确保潮间带构件施工在干地条件下进行。桩帽浇筑采用“潮汐窗口施工法”,在落潮前 1 h 完成立模,落潮后立即浇筑混凝土,利用 3 h 终凝时间确保混凝土在涨潮前达到初凝

强度,同时准备防水苫布,若遇突发涨潮及时覆盖保护。基桩修复采用临时挡水设施,在基桩周围设置可拆卸挡水围堰,高于最高潮位 0.5 m,确保干施工环境。

## 5 质量控制措施与效益分析

### 5.1 质量控制措施

#### 5.1.1 材料质量控制

水泥选用 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,初凝时间  $\geq 45$  min,终凝时间  $\leq 360$  min,氯离子含量  $\leq 0.06\%$ 。选用中砂,细度模数 2.3~3.0,含泥量  $\leq 3\%$ ,泥块含量  $\leq 1\%$ 。碎石选用 5~20 mm 连续级配,含泥量  $\leq 1\%$ ,泥块含量  $\leq 0.5\%$ 。早强剂选用高效减水剂与早强组分复合产品,确保混凝土浇筑后 24 h 抗压强度达标。防腐涂料各项性能符合 GB/T 27806—2011《环氧沥青防腐涂料》要求,附着力  $\geq 5$  MPa,耐盐雾性  $\geq 1000$  h 无锈蚀。所有材料进场前进行抽检,抽检频率为水泥 200 t/批次,砂石 400 m<sup>3</sup>/批次,涂料 10 t/批次,不合格材料严禁进场。

#### 5.1.2 过程质量监督

立模浇筑混凝土采用分层浇筑,每层厚度 300~500 mm,采用插入式振捣器振捣,振捣时间 20~30 s,直至混凝土表面无气泡逸出。化学灌浆过程中采用压力监测仪实时监控压力,确保压力稳定在 0.5~0.8 MPa,每根横梁灌浆完成后采用超声波检测裂缝填充情况。聚合物水泥砂浆涂抹前检查基层含水率,确保含水率  $\leq 8\%$ ,涂抹分 2 次进行,第 1 次涂抹厚度为 5~10 mm,初凝后涂抹第 2 次至设计厚度。防腐涂料涂刷前检查基层平整度,涂刷过程采用湿膜测厚仪控制厚度,确保各层厚度达标。

#### 5.1.3 后期检测验收

修复完成后按规范开展检测验收。结构完整性采用超声波检测,横梁、桩帽等关键构件检测覆盖率 100%,无空洞、裂缝等缺陷。表面光滑度采用 2 m 靠尺检查,偏差  $\leq 3$  mm。尺寸准确性采用钢尺测量,修复部位尺寸偏差符合设计要求,允许偏差  $\pm 5$  mm。混凝土强度采用回弹法检测,28 d 抗压强度达标率 100%,最低强度不低于设计强度的 95%。防腐涂层采用附着力测试仪检测,附着力达标率 100%,无起皮、剥落现象。所有检测结果均符合《港口基础设施维护技术规范》与《环氧沥青防腐涂料》要求。

## 5.2 经济分析

本次修复工程总造价 850 万元，材料费占比最高，主要因采用早强混凝土、环氧改性砂浆等专项材料，虽单价较高，但可缩短施工周期，减少港口运营损失，整体经济性更优。修复后经专业评估机构测算，码头结构使用寿命延长 15~20 a，减少维护费用 20 万元/a。港口吞吐量恢复至设计能力，增加经济效益 500 万元/a，而且避免了因结构破损导致的停航风险。综合测算，本次工程投资回收期约 1.5 a，预期经济效益可观，同时提升了码头运营安全性，为港区后续发展奠定了基础。

## 6 结语

针对黄骅港河口港区 3 号、4 号码头修复工程进行研究，得到以下结论：1) 明确恶劣海洋环境下多构件破损的定量描述方法进而依据《港口基础设施维护技术规范》划分破损等级，为修复工艺选择提供了依据；2) 奠定了“破损类型→成因分析→工艺匹配”的修复机制，同时针对不同构件破损特点制定专属修复方案，如横梁采用协同灌浆工艺、桩帽潮汐适配浇筑工艺同时增加修复精

准性；3) 构建包含材料管控、过程监督、后期检测质量保障体系继而结合潮汐规律改进施工组织，确保修复质量和施工效能；4) 经济分析说明，专项材料投入虽扩大材料费占比，但可缩短工期、增加结构耐久性，整体经济效益显著。

本文研究仍存在不足，缺乏各个修复工艺的长期耐久性数据，如化学灌浆裂缝的长期抗渗性、防腐涂层的长期耐候性，需进一步跟踪监测。部分工艺如潮汐适配施工的精细化可增加，将来可结合 BIM 技术改良施工时序，后续将核心开展修复构件的长期性能监测从而奠定耐久性数据库，探索智能化施工技术如自动灌浆设备、机器人除锈，增加施工效能与质量，针对不同海洋环境改良工艺参数形成更具普适性的修复技术体系。

### 参考文献：

- [1] 梁光先, 廖家艳. 海港码头胸墙混凝土裂缝成因及修补研究[J]. 西部交通科技, 2018(7): 193-195, 204.
- [2] 程路. 高桩码头挡土墙沉降原因分析及修补工艺[J]. 智能城市, 2018, 4(5): 111-112.
- [3] 魏小明. 码头预应力管桩裂缝检测及修补加固工艺探讨[J]. 中国水运, 2018(3): 58-59.