



# 老旧液体散货码头改扩建设设计特点

尹 涛，卓文雅，吴哲丰

(中交水运规划设计院有限公司，北京 10007)

**摘要：**结合宁波协和码头改建项目一期工程，介绍 20 多年前竣工后闲置的一座码头的改扩建设设计。对已建结构复核分析后，认为原安全系数法( $K$ 值法)与现行极限状态设计方法的安全性水平保持总体相当。结合码头现状，采用系泊分析优化改扩建后的码头平台长度及系缆墩布置。码头上部结构采用无纵梁、变厚度板的布置形式，解决了工作平台工艺荷载区域差异大、布置复杂的难题。并通过油污收集改造解决环保问题。

**关键词：**液体散货；改扩建；桩基码头；系泊分析；变厚度板

中图分类号：U 656；U 658.5

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)10-0222-07

## Design features of reconstruction and expansion of old liquid bulk wharf

YIN Tao, ZHUO Wen-ya, WU Zhe-feng

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** Combined with the first phase of the Ningbo Xiehe wharf reconstruction project, this paper introduces the reconstruction and expansion design of a wharf that was idle after completion more than 20 years ago. After rechecking and analyzing the existing structure, it is believed that the safety level of the original safety factor method( $K$  value method) and the current limit state design method remain the same overall. Combining with the current situation of the wharf, the mooring analysis is used to optimize the length of the reconstructed and expanded quay platform and the mooring piers arrangement. The upper structure of the wharf adopts the layout form of no longitudinal beams and variable thickness plates, which solves the problems of large regional differences in the process load of the working platform and complex layout. And the environmental protection problems are solved through oil pollution collection and transformation.

**Keywords:** liquid bulk; reconstruction and expansion; pile dock; mooring analysis; variable thickness plate

随着我国经济和贸易的持续发展，伴随着世界化工品船向大型化方向推进，新时期对液体散货码头的规模和功能有更高的要求，但可供依托后方石化产业而建的液化品泊位岸线却日益紧张。如何科学、合理、有效地统筹港域泊位岸线资源将是未来保障临港工业可持续发展的重要前提。对现有码头进行适当改扩建，以解决泊位规模和能力不足的矛盾，有着重要意义。

本文介绍宁波协和码头改建项目一期工程<sup>[1]</sup>主要问题的应对措施，涉及检测修复、规范对比、

平面布置、结构优化及环保改造等方面内容。

## 1 工程概况

项目位于杭州湾口外穿山半岛东北侧，金塘水道南岸。原工程于 1996 年开工建设，在完成陆域场平和石化码头 7 个泊位水工工程后(图 1)，因诸多原因于 1999 年搁浅。现利用原协和码头二线码头(2#、3#泊位未建)，改建成 1 个 5 万吨级泊位(泊位长度按同时靠泊 3 个 2 000 吨级船舶设计)，泊位总长度为 384 m，设计通过能力为 195 万 t/a。

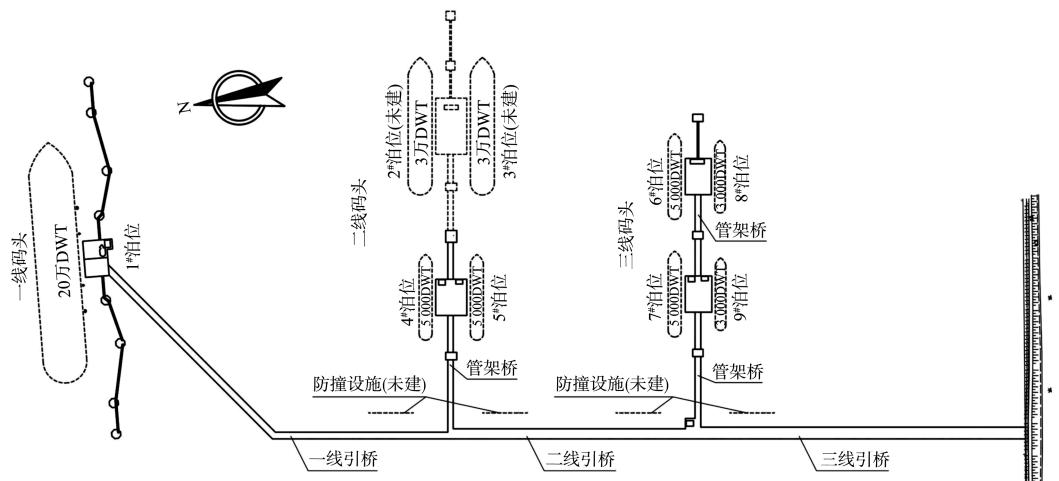


图 1 原工程布置及已实施结构

工程区域自然条件: 设计高水位 3.58 m(当地理论基准), 设计低水位 0.70 m; 50 a 一遇  $H_{1\%}=3.85 \text{ m}$ 、 $H_{13\%}=2.67 \text{ m}$ 、 $\bar{T}=6.4 \text{ s}$ ; 5 a 一遇  $H_{1\%}=2.70 \text{ m}$ 、 $H_{13\%}=2.20 \text{ m}$ 、 $\bar{T}=5.45 \text{ s}$ 、设计流速  $v=1.8 \text{ m/s}$ 。

原工程已建设泊位 7 个, 按布置位置分为一线 1 个泊位、二线 2 个泊位、三线 4 个泊位, 均通过一~三线引桥与陆域相连。本工程针对三线引桥、二线引桥及二线北侧码头进行改扩建, 二线南侧码头仅结构预留。已建三线引桥长

446.9 m、宽 15.9 m、顶面高程 8.5~9.5 m。已建二线引桥长 333.1 m、宽 13.7 m、顶面高程 9.5 m。二线码头已建管架桥 3 段, 已建工作平台 (49 m×42 m) 1 座, 已建系缆墩 2 座。

项目主要建设内容为在已建 5 000 吨级泊位东侧新建码头平台、系缆墩、管架桥及人行桥, 一线引桥根部新建 1 座控制楼平台, 并对已有二线码头、二线管架桥和二线引桥、三线引桥部分结构进行改造(图 2), 以满足改扩建后工艺使用及环保要求。

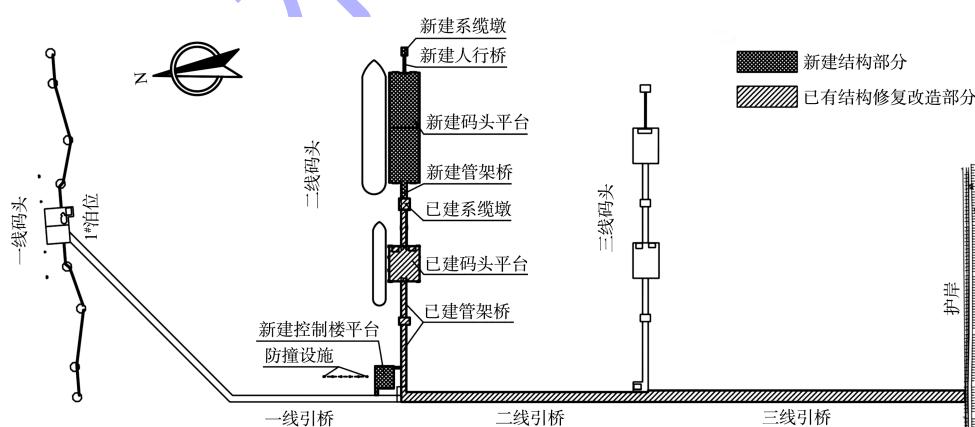


图 2 改扩建范围

工程需要解决的问题和主要设计难点如下:

1) 工程已搁置 20 多年, 需对设计范围内水工建筑物进行检测评估, 并对不同破损程度构件提出修复方案。

2) 原已建工程采用 JTJ 221—1987《港口工程

技术规范》设计, 需根据工艺设计需求对已建所有受力构件采用现行规范进行复核。

3) 船型组合较多, 且工程区域装卸作业条件相对较差, 合理确定改扩建码头平台长度, 并优化系缆布置。

4) 新建码头平台工艺管线密集, 布置复杂, 荷载分布差异性大, 结合设计施工一体化要求, 简化梁板布置。

5) 已建码头、管架桥及引桥需要进行油污收集改造, 以满足新时期环保要求。

## 2 项目设计特点及应对措施

### 2.1 检测评估及破损修复

根据 2013 年 10 月和 2017 年 9 月上海港湾工程质量检测有限公司提供的《协和石化码头检测评估报告》, 工程区域码头和引桥上部结构主要构件外观质量总体情况良好, 主要构件各项耐久性参数正常, 混凝土强度满足设计要求(表 1)。预制桩基 100% 检测, 大部分桩基完整性为 I 类桩, 极少部分 II 类桩, 无 III、IV 类桩, 三线引桥根部灌

注桩有 1 根劣化等级为 C 级、5 根为 D 级。

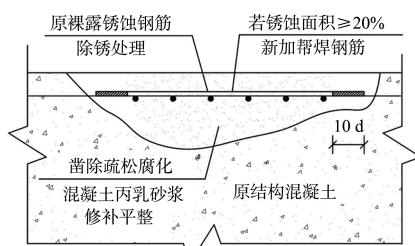
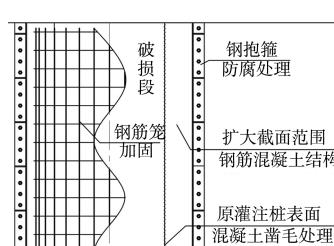
主要问题有 3 种类型: 1) 码头桩帽及三线引桥横梁部分混凝土构件出现裂缝; 2) 少部分存在混凝土破损、露筋等缺陷情况; 3) 钢管桩防腐涂层脱落、锈蚀, 水下无阳极块。

表 1 各单元安全评估等级

评估单元	安全性	使用性	耐久性
二线码头	A	A	B
二线管架桥	A	A	B
二线引桥	A	A	B
三线引桥	A	A	B

针对混凝土构件破损程度和评估等级划分, 分别采用裂缝修补、破损修补<sup>[2]</sup>和结构加固(表 2)。另外, 对于钢管桩进行除锈、喷涂防腐涂层并补充阳极块的处理。检查整个工程区域的防腐涂层结构, 对破损涂层进行剔除后, 重新喷涂。

表 2 典型混凝土构件破损修补加固情况

问题类型	现场图片	修补方式	修补图示
1		裂缝修补, <0.3 mm 封闭处理, ≥0.3 mm 灌浆处理	
2		破损修补, 若钢筋锈蚀面积 ≥ 20% 需加焊补强	
3		结构加固, 扩大截面法, 并钢筋补强	

## 2.2 新旧规范对比复核

本工程须复核计算的已建水工建筑物及其结构形式见表 3。

表 3 已建水工建筑物信息

区域	建筑单体	结构形式	尺度/(m×m)	基础桩型
二线码头	工作平台	高桩梁板	49×42	大管桩
			10×16	
			15×16	钢管桩
二线引桥	管架桥	墩台后张法	193×8.02	大管桩
		I型梁	333.1×13.7	
三线引桥		高桩墩台		PHC 桩
		预应力	446.9×15.9	方桩
		梁板		灌注桩

在满足业主需求的基础上, 为控制结构改造成本, 已建区域工艺管线布置基本沿用原方案, 保证荷载对已建结构的影响降到最低。采用现行行业规范, 按设计荷载需求复核结构, 桩基承载力、混凝土构件的强度及限裂均满足规范要求。

原协和石化工程于 1994 年开展工可设计, 1996 年完成施工图设计, 设计采用的规范为 JTJ 221—1987《港口工程技术规范》。至 2018 年项目改扩建设设计, 20 多年来, 结构设计的主要规范 JTJ 216—1987《高桩码头》和 JTJ 220—1987《混凝土和钢筋混凝土设计》已更新为 JTS 167—2018《码头工程结构设计规范》和 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》。当时港口工程可靠度理论并不完善, 在设计时没有相关设计使用年限的规定, 仅安全性作为主导结构设计的基本标准, 其结构可靠度主要采用安全系数法( $K$  值法)。现阶段, 按 GB 50158—2010《港口工程结构可靠性统一标准》3.0.3 条规定: 永久性港口建筑物的设计

使用年限为 50 a, 在设计年限内, 除要求工程满足安全性以外, 还须满足适用性和耐久性要求。

以分项系数表达的极限状态设计方法是现阶段结合可靠性分析和长期实践经验的实用方法, 各分项系数和设计表达式是通过可靠性分析与实践经验相结合得出的, 其表达的极限状态设计方法与安全系数法的安全性水平保持总体相当。

涉及到本工程的码头整体结构以及构成码头的桩、桩帽、梁、板等构件, 其在安全性方面可以满足现行港口工程相关规范、规程以及标准的要求。然而因其受所处复杂环境的影响, 其耐久性却成为影响工程结构使用年限的决定因素<sup>[3-5]</sup>。根据对沿海港口工程结构破坏和腐蚀情况多次调查结果, 从建筑材料上, 按 JTJ 221—1987《港口工程技术规范》进行设计的码头, 其正常维护保养下使用年限一般能达到 30 a。根据 2017 年 9 月提供的《协和石化码头检测评估报告》, 通过碳化侵蚀模型分析和氯离子扩散模型分析, 工程范围内的面板、纵梁、横梁、桩帽及墩台的剩余使用寿命均大于 32 a, 及时对构件进行耐久性修复措施, 可保障结构的剩余使用年限要求。

## 2.3 新建平台长度及系缆优化

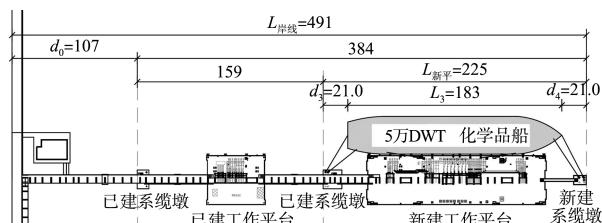
依托已建系缆墩布置来确定新建平台西侧端部起点, 同时新建平台及东侧系缆墩建成后需满足最大 5 万吨级(兼顾 3 万吨级)船舶的安全靠泊, 并同时满足 2 个 2 000 吨级船舶的安全靠泊。

依据规范, 船型组合的泊位长度应满足 1.1~1.3 倍设计船型, 且蝶形布置要求两靠船墩间距为设计船长的 30%~45%。具体船型组合形式见表 4、图 3。

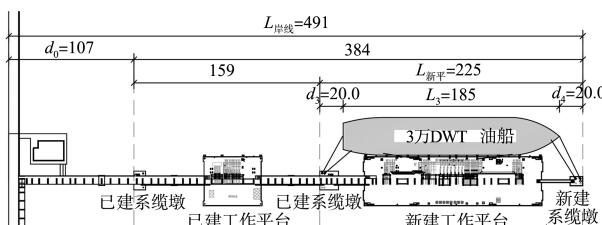
表 4 船型组合计算尺度

组合	船型	$d_0$	$d_1/m$	$L_1/m$	$d_2/m$	$L_2/m$	$d_3/m$	$L_3/m$	$d_4/m$	$L_{新平}/m$	$L_{岸线}/m$
1	1 个 5 万			159			21.0	183	21.0	225	491
2	1 个 3 万			159			20.0	185	20.0	225	491
3	5 000+2 万	107			27.5	114	17.5+32.5	160	32.5	225	491
4	3 个 2 000		41	87	31+13	87	25.0	87	13.0	225	491

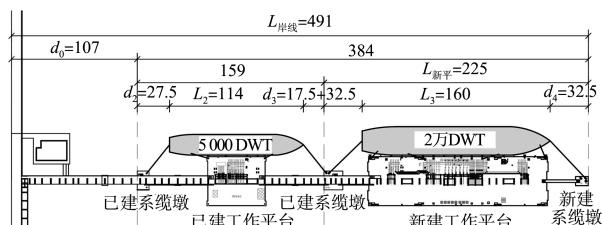
注:  $L_1 \sim L_3$  为设计船长,  $d_0 \sim d_4$  为墩台、船边缘距离。



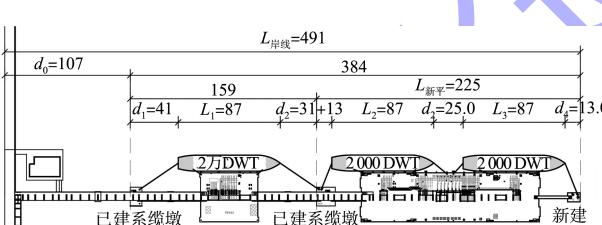
a) 组合1: 1个5万吨级(化学品船)



b) 组合2: 1个3万吨级(油船)



c) 组合3: 5 000个吨级+2万吨级



d) 组合4: 3个2 000吨级

图 3 船型组合图示 (单位: m)

其中, 2个2 000吨级船舶的组合为新建平台长度的控制条件, 平台端部距离装卸区中心(船舶中心)不小于船长的40%的一半, 即不小于40% $L/2=17.4\text{ m}$ , 要求平台尺寸不小于 $17.4\text{ m}+L/2+d+L/2+17.4\text{ m}=146.8\text{ m}$ ( $L$ 为设计船长87 m,  $d$ 为富余距离25 m), 考虑到充分利用平台上工艺设施

的布置空间以及尽量增大小船的船舶靠泊范围, 选取平台边缘距东、西两侧装卸中心分别为22.35 m及19.35 m, 最终确定新建平台长度为153.7 m, 满足其它船型组合对平台长度的要求。

工程区域设计流速1.8 m/s, 泊位前沿线与水流夹角7.5°, 装卸作业的条件相对较差。新建平台有3个装卸区, 尤其平台中间(装卸三区)布置8个输油臂, 当使用该区边缘输油臂时, 船舶须偏心系泊作业, 易导致缆绳受力不均匀。

通过OPTIMOOR系泊分析软件, 对不同工况下系统缆力进行模拟分析(图4), 确定流的影响是控制装卸作业的主要因素, 控制工况为开流+开风+离岸浪。在平台两端第2个排架、距离码头前沿14 m处各设置1个横缆系带点, 提高大型船舶的系泊作业安全, 保证两端缆绳拉力分配均匀。

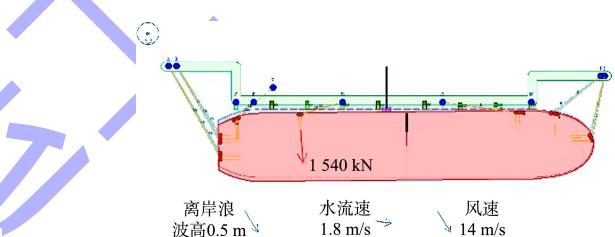


图 4 5 万吨级船舶系缆

船舶系统缆布置应按设计要求进行定点系泊, 建议加强风、浪、流的监测来保障码头的作业安全。尤其大船靠泊时, 应尽量避开较大流速窗口, 或采用拖轮保护。

#### 2.4 简化梁板布置适应荷载需求

新建码头平台荷载分布为2个区域: 平台两端为一般荷载区, 均载10 kPa/m<sup>2</sup>; 平台中部为管架荷载区, 尤其装卸三区, 均为4层管架, 每层管线基本满铺, 根据普通、滑动和高架管架的布置方式, 单墩基础荷载150~300 kN不等, 最大荷载达316 kN。见图5。

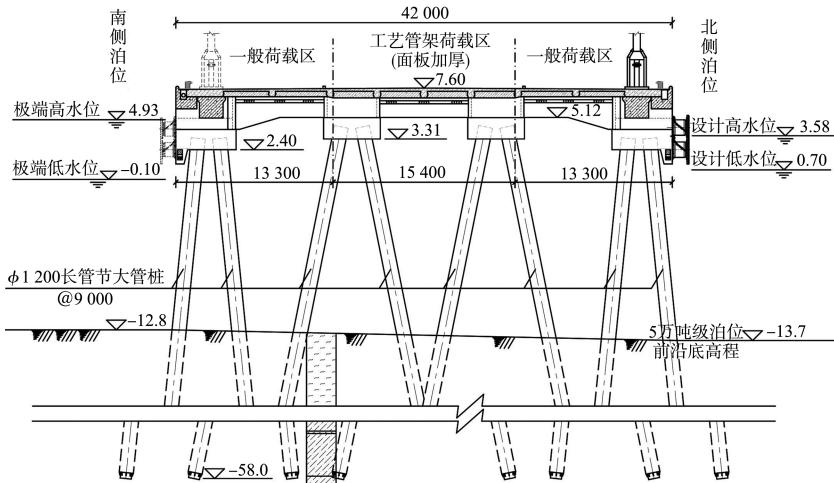


图 5 码头断面 (高程: m; 尺寸: mm)

面板结构承受集中荷载的能力有限, 同时对基础铁件埋深制约性大, 通常大荷载和埋件较深的基础布置在纵、横梁上部或桩帽节点区域。本项目工艺管线接口多、基础分散、埋件布置相对复杂(图 6), 采用常规纵梁+面板的布置方式较困难, 会导致梁、板预制构件类型增多、安装困难、施工工期加长。结合本项目 EPC 总承包工程的特点, 根据当地施工条件和能力, 最终采用变厚度板, 取消码头中部纵梁的结构方案。

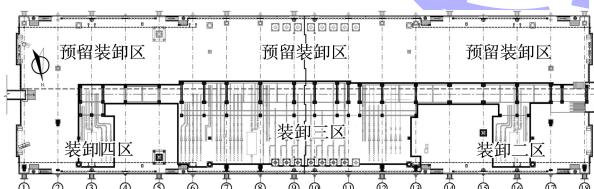


图 6 新建平台管架基础及工艺埋件布置

管架荷载区比一般荷载区的预制面板厚度增大 100 mm, 结合码头散水坡的设置, 叠合板最大厚度差能增大至 200 mm(图 7), 通过采用板单元有限元结构计算, 管架荷载区中跨板每延米组合后跨中弯矩达 337 kN·m、支座弯矩为 127 kN·m, 根据弯矩分布(图 8)可见, 加厚区面板能够充分发挥结构的承载能力, 适应不同区域的荷载分布, 同时面板厚度增大后, 还可以使码头中部基础铁件的埋深满足受力要求。

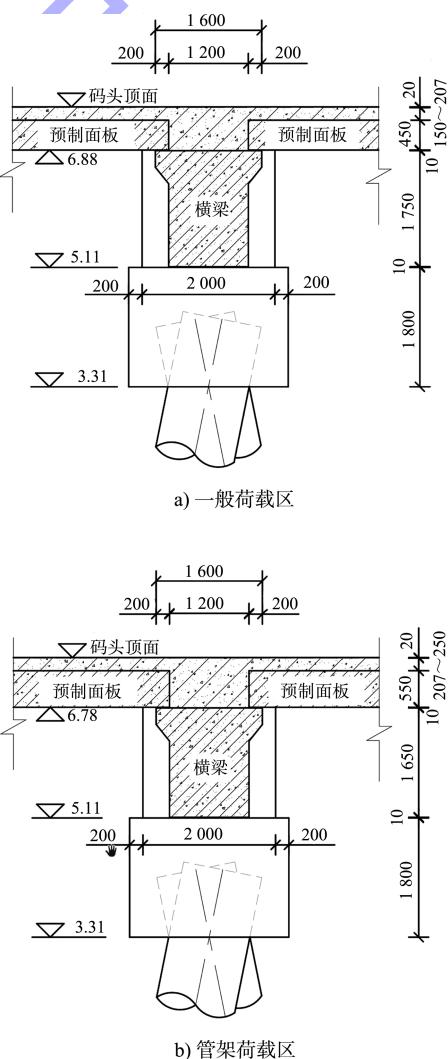


图 7 荷载区结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

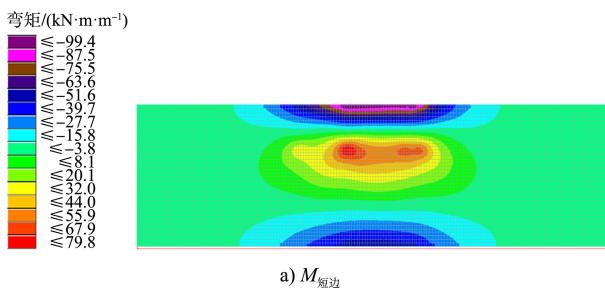
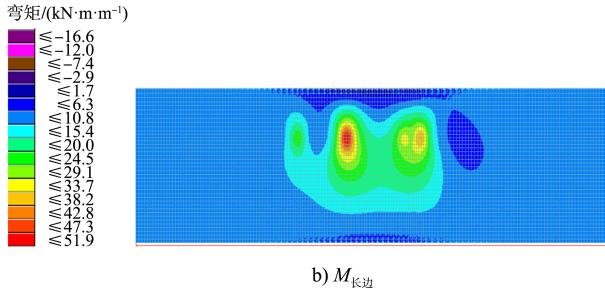
a)  $M_{\text{短边}}$ b)  $M_{\text{长边}}$ 

图 8 管架荷载延米弯矩分布

简化后的梁板布置，上部结构混凝土总量基本不变，但构件种类减少，预制面板 6 种、预制输油臂梁(含边梁)3 种、预制横梁 4 种，能够进一步降低施工成本和难度并缩减工期，给 EPC 项目带来一定的经济效益。

## 2.5 油污收集改造适应环保要求

原协和石化项目对环保要求相对较低，旧规范仅要求在码头装卸区的管线法兰或阀门处设置接油盘即可。工程中途搁置，码头上部设备管线未安装，已建结构上也未见油污收集措施。如：已建码头平台装卸区无拦油槛，面板预留直接排海水孔；管架桥、引桥均为透空式梁系结构。冲洗油污水或含油污水将直接排海，造成环境污染。

为适应新时期环保要求，对已建结构进行油污收集改造。主要有以下几点：1) 酒除旧码头平台磨耗层，根据装卸区布置，后植钢筋设置拦油槛；2) 在旧码头侧面增设油污收集设施，见图 9；3) 原管架桥、引桥透空梁增设封闭盖板，见图 10。

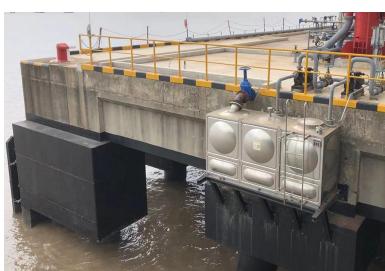


图 9 旧码头侧面增设油污收集设施



图 10 原引桥透空段铺设盖板

## 3 结语

1) 通过对已有结构水上、水下外观检查，各部位混凝土构件强度、弹模、碳化深度、氯离子分布、保护层厚度、钢筋锈蚀等检测，以及地基基础和防腐结构检测，充分掌握结构现状，有针对性地对破损构件进行修补和修复。

2) 旧规范的安全系数法( $K$ 值法)与现行极限状态设计方法的结构安全性水平保持总体相当。保证已有结构的适用性要求，新设计荷载不宜大于原设计荷载。定期对构件进行检测并及时进行修补，可保障结构的耐久性。

3) 由于偏心系泊作业影响，工作平台长度一般受控于小型船舶组合，同时增加长横缆可有效提高大型船舶的系泊作业安全，保证缆绳拉力分配均匀。

4) 采用变厚度板替代跨中纵梁，对复杂荷载布置的适应性强，还可简化码头上部结构梁板布置。

5) 改造旧结构油污收集系统，以适应新时期环保要求。

## 参考文献：

- [1] 中交水运规划设计院有限公司.宁波协和码头改建项目一期工程施工图设计[R].北京:中交水运规划设计院有限公司, 2019.
- [2] 中交四航工程研究院有限公司.港口水工建筑物修补加固技术规范: JTS 311—2011[S].北京:人民交通出版社, 2011.
- [3] 胡家顺, 钱丽.港口工程结构可靠度设计有关问题[J].水运工程, 2006(10): 70-73.
- [4] 胡家顺, 任增金, 吴哲丰.海港码头结构升级改造技术[J].水运工程, 2016(10): 90-94.
- [5] 杨国平, 李荣庆.提高港口工程结构设计使用年限的可行性研究[J].水运工程, 2019(2): 28-33.