

传力杆在高桩码头升级改造中的应用*

尹纪龙¹, 孙熙平¹, 李赛峰², 张 飞¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 水工构造物检测、诊断与加固技术交通行业重点实验室, 天津 300456;

2. 宁波市交通工程质量安全监督站, 浙江 宁波 315040)

摘要: 为保证港口安全, 适应沿海港口吞吐量增长和到港船舶大型化发展, 对已建高桩码头进行升级加固改造成为必然趋势。作为一种新型方案, 传力杆技术已在部分高桩码头升级改造中得到应用。结合相应工程实例, 对传力杆加固高桩码头升级改造技术特点、设计计算方法及相应的施工工艺进行系统阐述, 并采用专业软件进行码头整体建模, 对传力杆加固高桩码头效果进行了验证, 结果表明横梁和桩基内力都有一定程度的改善。

关键词: 传力杆; 高桩码头; 升级改造; 结构计算; 施工工艺; 应用实例

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0083-05

Application of upgrading and reconstruction for high-piled wharf based on dowel bar

YIN Ji-long¹, SUN Xi-ping¹, LI Sai-feng², ZHANG Fei¹

(1. Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Safety, Ministry of Transport, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China; 2. Ningbo City Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Station, Ningbo 315040, China)

Abstract: In order to ensure the safety of the port and adapt to the growth of the coastal port throughput as well as large-scale development of the ship, the upgrading and strengthening of the high piled wharf has become an inevitable trend. As a kind of new scheme, the dowel bar technology has been applied to upgrading and reconstruction for high-piled wharf. Combining with engineering examples, the dowel bar of upgrading technical features for high-piled wharf reinforcement, design calculation method and the corresponding construction technology is described; using professional software for the wharf modeling, the dowel bar reinforcement effect of high pile wharf is verified. The results show that the beams and internal force of pile have a certain degree of improvement.

Keywords: dowel bar; high-piled wharf; upgrading and reconstruction; structure calculation; construction technology; application examples

近年来, 随着码头步入深水化、大型化, 为促进港口健康、持续发展, 迫切需要对现有港口设施能力进行加固改造, 以满足港口安全营运的需要。交通部曾专门下发了关于开展沿海港口码头结构加固改造工作要求的《关于沿海港口码头结构加固改造有关事宜的通告》。现阶段, 高桩码头升级改造的内容和结构形式多种多样^[1-3], 升级改造方案主要有结合式和分离式两种。其中, 结

合式方案主要采取增加码头节点和桩基、扩大原有构件截面的方式, 此方案应用最为普遍; 而分离式方案主要采取与老结构相脱离、增加新单独受力结构平台的改造思路。以上两种升级改造方案均存在施工难度大、造价高、作业范围广、施工周期长、影响正常码头作业等问题。为此, 由中交第三航务工程勘察设计院提出通过传力杆连接码头前、后平台, 使后平台能够承受一部分前

收稿日期: 2016-04-16

*基金项目: 交通运输部建设科技项目 (2014328224040)

作者简介: 尹纪龙 (1989—), 男, 硕士, 研究实习员, 从事波浪-结构-地基相互作用、港口结构检测与评估。

平台传递的水平力，以提高码头整体水平承载力的高桩码头升级改造方案应运而生，并成功应用于实践。

1 传力杆结构特点

传力杆指的是在高桩码头前后平台横梁内布置的圆钢筋，要求前后承台的横梁在一条直线上。现场施工时，先将传力杆植入前、后平台的横梁内，然后再在接缝处做防腐蚀处理，为保证码头前、后平台可以上下、左右相对错动，传力杆起到铰接的作用，防腐蚀处理后传力杆外层需要再包覆一定量的柔性材料，包覆厚度一般不小于 20 mm，以达到只传递水平力、不传递弯矩和剪力的目的。图 1 为传力杆包覆断面图，由内到外依次是传力杆（钢筋）、2 度酚醛防锈漆、4 层玻璃纤维（每层内涂树脂胶 1 度）和 4 层聚乙烯胶带。传力杆结构布置见图 2。

2 传力杆设计算例

原设计停靠第二、第三代集装箱船舶的宁波港北仑国际集装箱有限公司 3#~6# 泊位 5 万吨级码头，长期超荷载运行致使码头的相关设施及结构发生损伤。为适应船舶大型化的发展趋势，保证原超设计船型的安全靠泊的需求，对该泊位进行升级改造，使该泊位在码头工艺设备荷载不变的条件下可停靠靠泊 10 万吨级集装箱船型。

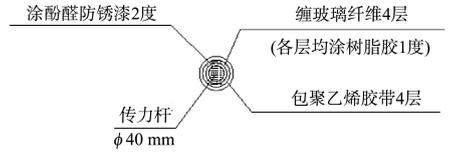


图 1 传力杆包覆断面

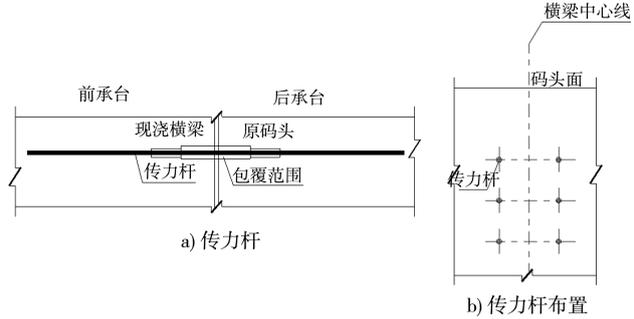


图 2 传力杆结构布置

2.1 设计条件

3#~6# 泊位码头平台长 900 m，总宽度 47 m（西端 206 m 码头总宽度为 40 m），水工建筑物结构安全等级为 II 级，结构重要性系数取 1.0，结构断面见图 3。本区属亚热带季风气候地区，四季分明，属软土地基。受海洋调节作用，年气温适宜，空气湿润。气象资料采用宁波北仑区气象台 1983—2005 年气象统计资料为依据，该台地理坐标 29°58'N、121°45'E。根据 1995—2005 年统计资料，本区常风向为 SE、S 向，统计频率均为 9%，次常风向为 N、NW 向，统计频率均为 8%；强风向为偏北向，N、NW 向最大风速分别为 24 m/s（10 min 平均）、22 m/s，次强风向为偏东向，E、ESE 向最大风速均为 20 m/s。

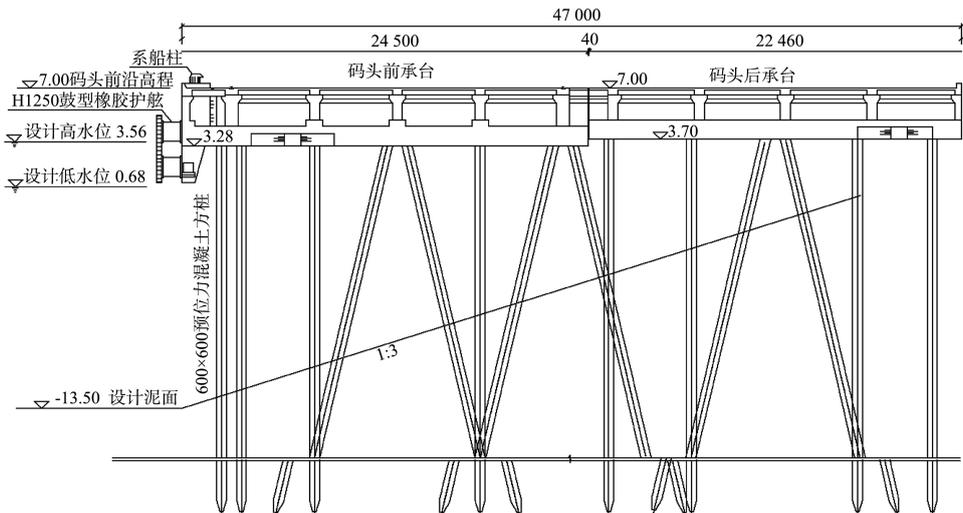


图 3 3#~6# 泊位码头断面（高程：m；尺寸：mm。下同）

本工程潮高基面采用浙江吴淞零点为基准, 该基面在 85 国家高程基面下 1.91 m, 与其他基面之间关系见图 4。

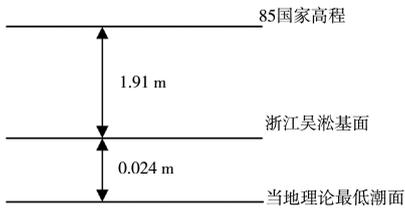


图 4 基面关系

1) 设计水位。

设计高水位为 3.56 m(潮峰累积频率 10%), 设计低水位为 0.68 m(潮谷累积频率 90%), 极端高水位为 4.91 m(重现期 50 a 一遇), 极端低水位为 -0.12 m(重现期 50 a 一遇)。

2) 波浪。

根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[4] 中的有关规定, 通过对工程地区水文气象资料及地形条件分析, 计算本码头前沿重现期 50 a 一遇的设计波浪要素(表 1)。

表 1 码头前沿(重现期 50 a 一遇)设计波浪要素

方向	水位	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{13\%}/m$	T/s	L/m	$C/(m/s)$
	极端高水位	2.83	2.39	1.91	5.65	49.0	8.67
NW	设计高水位	2.80	2.37	1.89	5.65	48.6	8.61
	设计低水位	2.61	2.21	1.77	5.65	47.5	8.42
	极端高水位	3.40	2.88	2.31	6.00	54.6	9.10
NE	设计高水位	3.39	2.88	2.31	6.00	54.1	9.02
	设计低水位	3.30	2.81	2.26	6.00	52.5	8.76

3) 设计荷载。

恒载: 自重; 均载: 装卸桥; 流动机械: FV315HRLY 牵引拖车挂车, B75 调运车, 5 t 铲车, 16 t 内燃式轮胎起重机(起吊质量 16 t)。根据设计船型 10 万吨级集装箱船, 按照 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[5] 有关规定计算船舶系缆力、撞击力及挤靠力等船舶荷载。当停靠 10 万吨级集装箱船时, 船舶接触护弦 10 组, 挤靠力 $F=414$ kN, 对结构不起控制作用; 系泊船舶在波浪作用下有效撞击能量(分配在每组护弦上)为 135 kJ, 小于船舶靠岸时的撞击能量, 护舷设计吸

能量 665 kJ, 护舷设计反力 1 392 kN。系缆力计算按 10 万吨级集装箱船计算, 设计系泊最大风力为 9 级(计算风速 $v=22$ m/s), 流速 $v=1.55$ m/s, 计算得到系缆力标准值 1 330 kN, 使用 1 500 kN 系船柱方可满足 10 万吨船舶的系缆要求。

2.2 改造效果计算

10 万吨级集装箱船舶在限定条件下作业时, 码头上均载数值及布置等同原设计、岸桥荷载按现有参数计算, 系缆力增加为 1 500 kN, 其他设计条件也不变。本文利用 Robot Structural Analysis 进行高桩码头整体建模, 传力杆升级改造后前后平台采用铰接在横梁端部进行连接, 按照整体计算。建模时, 码头横梁、轨道梁、纵梁和桩之间采用固结连接; 码头横梁、轨道梁、纵梁和基桩采用梁单元, 码头面板采用壳单元; 桩-土之间作用采用线弹性 m 法; 桩底采用 Z 向位移弹簧约束、其余自由度固结的方式, 分别对改造前后进行计算。码头整体模型见图 5, 改造前后的模型区别在于前后平台之间是否铰接。

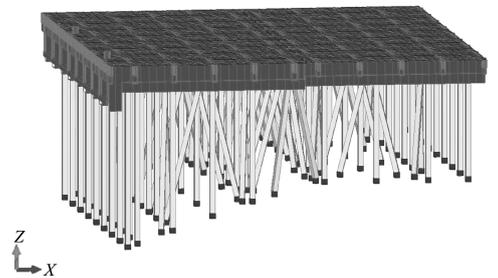


图 5 码头整体模型

表 2 为码头改造前后横梁和基桩内力计算结果, 可以看出, 设计荷载作用下, 前后平台连接之后, 前码头横梁内力降低了约 13%; 桩力及拉桩应力明显减小, 分别降低了 13.4% 和 35.7%; 水平位移值减小了 33.3%; 结构整体受力得到明显的改善, 验证了传力杆加固改造的有效性。

表 2 码头改造前后横梁和桩基内力计算结果

项目	横梁最大正弯矩/(kN·m)	横梁最大剪力/kN	最大桩力/kN	最大拉桩应力/MPa	位移/cm
改造前	1 651	2 879	3 416	-6.53	1.11
改造后	1 438	2 505	2 957	-4.20	0.74
降低量/%	12.9	13.0	13.4	35.7	33.3

2.3 传力杆配置计算

传力杆设计时按照前后平台的水平刚度进行分析计算求得^[6]。在上述模型分别施加单位力,求得前、后平台及前后平台铰接连接之后的各自位移值。将后平台水平刚度作为前平台的水平约束,按照平面排架计算得到的最大位移乘以后平台的水平刚度,该力即通过传力杆传递过来的水平力,最终得到每根横梁处的传力杆所受的轴向力设计值为 237 kN。

1) 传力杆锚固长度计算。

根据 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[7]规定,钢筋锚固长度为:

$$l_a = \alpha \cdot \frac{f_y}{f_t} \cdot d \quad (1)$$

式中: l_a 为钢筋锚固长度(mm); α 为钢筋的外形系数,带肋钢筋取 0.14; f_y 为钢筋的抗拉设计值(N/mm²); f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值(N/mm²); d 为钢筋的公称直径(mm),本文取 32 mm。

本实例选用 HRB400 ϕ 32 作为传力杆,代入相关数值,利用上式可得钢筋锚固长度为 1 057 mm,取 1 200 mm。

2) 传力杆配置数量计算。

根据 JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》^[8]规定,外层混凝土对内部钢筋传力杆的握裹力为:

$$F = \frac{\pi d q_{rk} l_a}{\gamma_d} \quad (2)$$

式中: F 为外层混凝土对内部钢筋传力杆的握裹力; q_{rk} 为钢筋与混凝土的粘结强度标准值(MPa),宜通过试验确定; α 为钢筋的外形系数,带肋钢筋取 0.14; γ_d 为分项系数,取 1.7~1.9。

代入相关数值,利用上式可得握裹力为 112 kN。根据前述求得的轴向力设计值 237 kN,两者相除求得需要传力杆 2.1 根,为确保工程安全、保守起见每榀排架取 4 根。现场施工时进行相关的锚固试验,结果表明单根锚杆的锚固力大于设计值,满足设计要求,进一步验证了传力杆升级改造加固的安全可靠性。

3 传力杆施工工艺

传力杆施工过程主要包括:拆除平台面板→凿除部分横梁→植入传力杆→浇筑横梁、面板。

拆除平台面板、凿除部分横梁过程中,新老混凝土结合面应凿毛,保留原有钢筋,并避免原有钢筋受损,如有破坏损伤,应予以补强。

植入传力杆施工前,传力杆须按破坏性检验方法做现场抗拔力抽检试验,检验方法遵照规范 GB 50367—2006《混凝土结构加固设计规范》^[9]。有关植筋的要求应符合 GB 50367—2006《混凝土结构加固设计规范》,植筋化学锚固剂应采用 A 级胶且耐潮湿环境,满足规范要求,另外传力杆应为整根植入,不允许焊接或采取其他方式连接。现场作业见图 6。



图 6 传力杆植入作业

传力杆植入和外侧钢筋配置完成后,进行浇筑横梁面板施工工序。浇筑前清除表面松散的颗粒后洗净,新老混凝土结合面处使用界面结合剂,界面结合剂材料和性能要满足 JTS 311—2011《港口水工建筑物修补加固技术规范》^[10]要求,新老混凝土结合面应按规范要求处理。横梁施工浇筑效果见图 7。

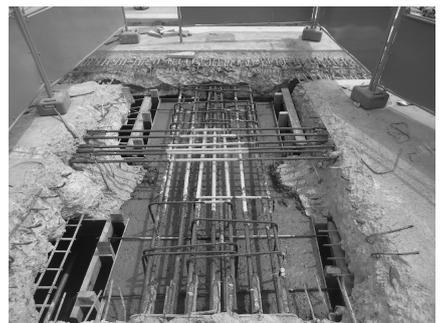


图 7 横梁浇筑效果

4 其他应用工程实例

4.1 江苏苏源谏壁发电有限公司码头扩建工程

江苏苏源谏壁发电有限公司码头采用高桩梁板式结构, 上部结构采用现浇横梁, 预制安装叠合式轨道梁、纵向梁和面板, 通过现浇面层连成整体, 长 224.6 m、宽 16.3 m, 排架间距 6.0 m, 共 39 个排架, 桩基为 800 mm 钢管桩和 600 mm×600 mm 预应力混凝土方桩, 计划在原码头平台的基础上宽度扩建 9 m, 由于扩建平台宽度过窄, 承受水平力能力有限, 码头桩力及位移均超出正常范围, 设计采用在扩建平台和原码头平台的横梁内设置传力杆, 通过传力杆将扩建平台与原码头平台连接起来, 有效提高码头整体刚度, 每根横梁内设置 2 根 $\phi 40$ 传力杆, 所有 39 根横梁均设置传力杆。升级改造后由原来的 2.5 万吨级码头改扩建为 3.5 万吨级, 该码头于 2004 年竣工投产, 目前已运营 12 年, 使用情况良好。码头断面见图 8。

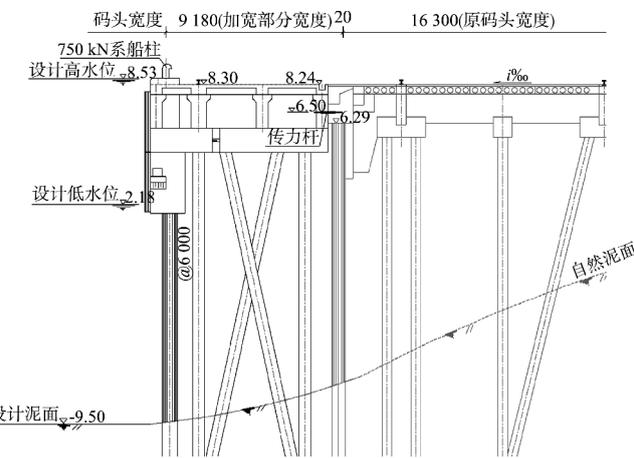


图 8 江苏苏源谏壁发电有限公司码头扩建工程断面

4.2 宁波港镇海港区煤炭作业区 4# 泊位改扩建工程

宁波港镇海港区煤炭作业区 4# 泊位位于甬江口可门段左岸^[1], 此工程为 2 万吨级码头, 长 182.2 m、宽 30 m; 其后平台总宽 15 m, 但分为两部分, 每一部分的宽度都为 7.5 m, 两部分之间分缝宽度 2 cm, 码头后沿有 3 座引桥连接, 引桥长 26 m、宽 9.1 m。本工程改扩建之后作为煤码头使用, 因环保的要求, 两部分平台之间的分缝

必须封闭, 为了使此分缝有效封闭, 结构上需采取措施, 使两部分平台变形协调, 采用传力杆解决此问题, 如图 9 所示, 182.2 m 范围内的 27 根排架内设置传力杆, 每根横梁内设置 2 根 $\phi 40$ 传力杆。该码头于 2008 年竣工投产, 使用至今已 8 年, 使用情况良好。

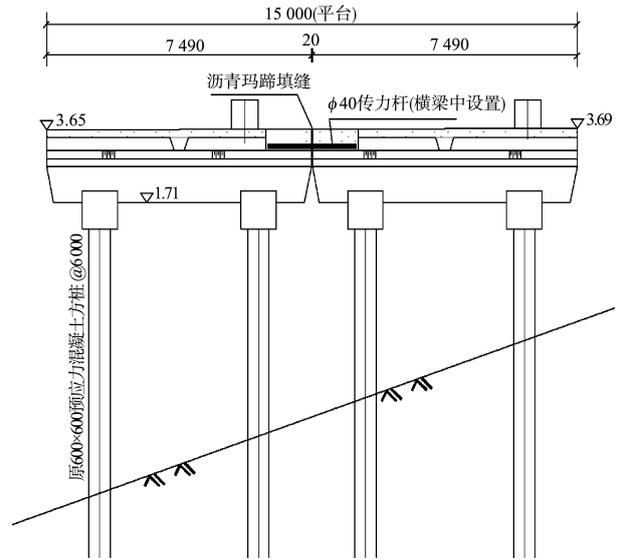


图 9 宁波港镇海港区煤炭作业区 4# 泊位改扩建工程后平台断面

5 结论

1) 相对于传统改造加固方案, 采用传力杆技术具有原结构拆除量少、码头作业施工面小、作业工期短、改造成本低的优点。

2) 结合相应工程实例, 对传力杆在高桩码头升级改造中的设计计算方法、施工工艺进行了相对全面的阐释, 并对传力杆的加固效果进行了软件计算论证。结果表明, 传力杆加固后码头整体受力得到明显的改善。

3) 现阶段, 传力杆技术已经在多个码头改造中得到应用, 使用情况良好, 进一步验证了技术应用的可行性。

参考文献:

[1] 孟晓宁, 边树涛. 高桩码头结构加固改造常用方案[J]. 水运工程, 2015(4): 120-125.