



高桩码头应变监测与结果分析

李瑞刚¹, 朱明友²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 上海国际港务(集团)股份有限公司, 上海 200136)

摘要: 为了解高桩码头理论计算与实际情况之间的吻合状况, 在主要构件上安装应变监测系统, 测得码头构件在船舶靠泊、码头面堆载、岸桥作业 3 种工况下的应变值。分析监测结果, 并与理论计算值进行对比。结果表明: 1) 现场监测结果与理论建模计算的结果存在差异, 但是二者的趋势是一致的; 2) 加固改造方案有效; 3) 对码头构件的实际受力状况有了直观了解。

关键词: 高桩码头; 应变监测; 应变; 理论计算

中图分类号: U 656. 1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0236-05

Strain monitoring and results analysis of high-piled wharf

LI Rui-gang¹, ZHU Ming-you²

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

2. Shanghai International Port(Group) Co., Ltd., Shanghai 200136, China)

Abstract: In order to understand the coincidence between the theoretical calculation and the actual situation of the high-piled wharf, the strain monitoring system is installed on the main components to measure the strain values of the wharf components under three working conditions: ship berthing, stacking on wharf surface, and quay crane operation. The monitoring results are analyzed and compared with the theoretical calculation values. The results show that: 1) There are differences between the field monitoring results and the theoretical modeling results, but their trend is consistent. 2) The reinforcement scheme is effective. 3) We have a direct understanding of the actual stress condition of wharf components.

Keywords: high-piled wharf; strain monitoring; strain; theoretical calculation

高桩码头设计时, 一般将码头结构简化为平面排架, 再将平面排架简化为平面刚架进行分析计算, 根据内力计算结果确定构件的截面与配筋, 计算结果相对理想化和保守; 此外通过有限元软件对码头结构进行空间建模分析计算, 相对平面计算来说更贴近实际, 但是很多输入的参数及边界条件仍然与实际有差别, 计算结果与现实中的码头构件内力值差别较大, 因此有必要通过监测码头结构的实际应变来了解码头在工作中的真实受力状况。

为了摸清上海某升级改造码头结构的性能、受力时码头构件的实际应变情况以及改造前后的效果, 选取码头的典型结构段进行现场应变监测。该码头结构为高桩梁板式(图 1), 码头面顶高程为 7.00 m、宽 42 m, 结构分段长度为 60 m, 排架间距 7 m, 每个分段布置 9 榀排架, 每榀排架布置 13 根 600 mm×600 mm 预应力钢筋混凝土方桩。横梁和纵向梁系均为非预应力叠合梁, 横梁高 2 460 mm、纵梁高 1 960 mm、轨道梁高 2 660 mm, 面板采用叠合板, 厚 550 mm。码头防冲设施采用 SUC1000H

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 李瑞刚(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程设计和研究工作。

(RH)型二鼓一板橡胶护舷, 间距为 14 m。

加固改造方案是在两榀排架中间增加一根斜

桩，利用纵向联系梁将新增桩基与两侧排架连接在一起。

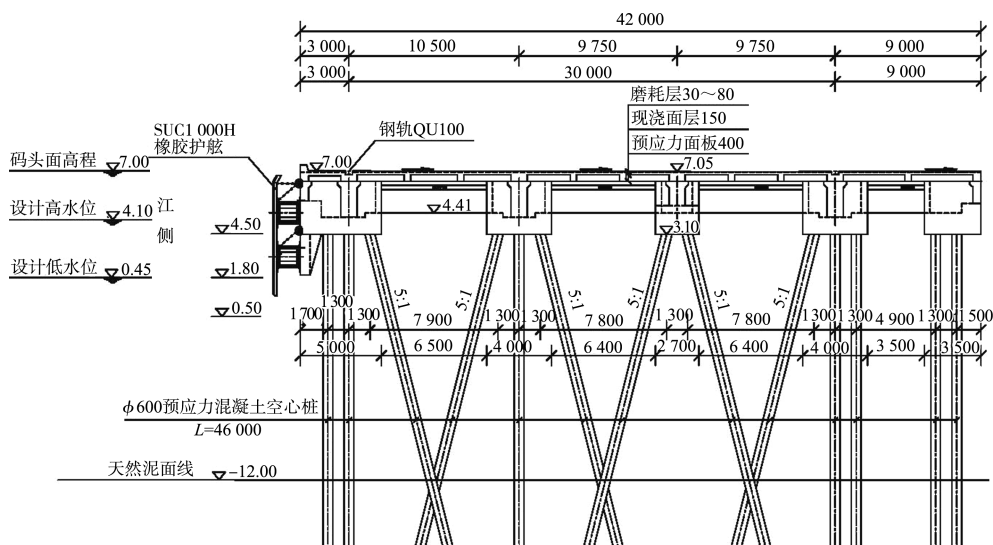


图 1 原码头结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

1 构建监测系统

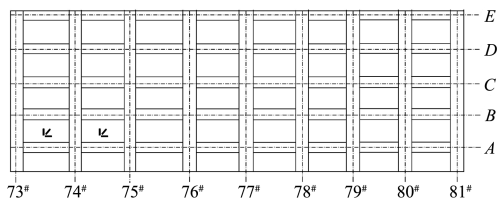
1.1 设定目标

本次监测目的是了解不同工况下活荷载作用于码头时主要构件的实际受力情况。码头作业时的工况条件复杂多样,受条件限制不可能对每个工况都进行监测,选择了3种典型工况进行监测:1)船舶靠泊工况(无竖向附加荷载);2)码头面堆载工况(局部区域堆载重箱1层);3)岸桥吊装重箱工况^[1]。选择监测应变的构件有桩基、横梁、纵向梁系和面板;同时监测船舶靠泊时的护舷反力以便对码头结构的宏观受力情况有所了解。

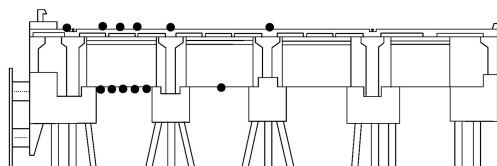
1.2 布置测点

选取码头的—个结构段监测，如果 9 榀排架全面布点则测点数量过多，考虑码头结构段排架布置的对称性、高桩码头水平集中力作用时横向分力在排架中的分配情况的不利位置、船舶靠泊时首先撞击指定排架有困难等因素，选择距离结构缝最近且装有鼓型护舷的 74# 排架、相邻的 73# 排架及邻近的也装有鼓型护舷的 76# 排架作为重点监测对象。

桩基的测点布置于桩帽下 500 mm 位置,江侧和岸侧均布置测点;横梁和纵向梁系的测点主要布置于梁底跨中附近和梁顶节点附近;改造后增加的联系梁测点布置于江侧外露面的中心位置;面板应变监测点采用应变花布置于面板底部;共布置测点 45 个,部分构件布点见图 2。



a) 码头构件平面及面板



b) 74#排架横梁

图 2 监测布点

1.3 系统架构

监测系统由应变感知、数据采集及接收存储 3 个子系统构成^[2]，见图 3。

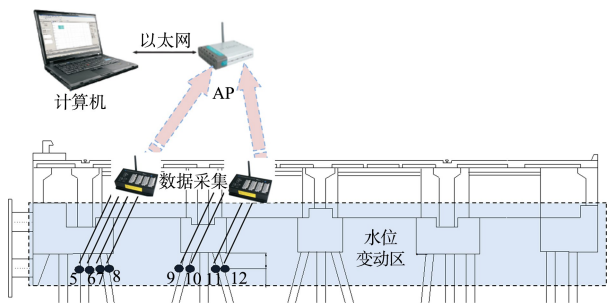


图 3 监测系统架构

应变感知系统采用工具式表面应变传感器，由高弹性材料经过特殊加工并配备高精度电阻应变计作为敏感元件经过粘贴组桥等工艺制作而成。所选传感器标距 L_0 为 125 mm，变化量 ΔL 为 ± 3.0 mm，输出灵敏度 S 为 $\pm 1\,500\,\mu\varepsilon/\text{mm}$ 。

数据采集系统与应变感知系统采用导线连接，所选用的静态应变数据采集器最高分辨率为 $1\,\mu\varepsilon$ ，测量应变范围为 $\pm 20\,000\,\mu\varepsilon$ ，零点漂移的绝对值 $\leq 3\,\mu\varepsilon/(4\,\text{h})$ ，温度漂移绝对值 $\leq 1\,\mu\varepsilon/^\circ\text{C}$ 。

接收存储系统由无线 AP (access point, 接入点)、计算机及采集器操控软件组成，通过操控软件实现对数据采集系统的控制，并将采集到的数据进行分析计算、单位量纲归一化、曲线绘制等处理。数据采集系统通过无线传输的方式将收集到的数据发送到接收存储系统。

2 监测结果分析

2.1 监测结果

本次监测分改造前和改造后两个阶段进行，改造前主要是对船舶靠泊工况的监测，改造后分别对船舶靠泊、码头面堆载、岸桥吊箱作业 3 种工况进行监测^[3]。

2.1.1 船舶靠泊工况

在船舶靠泊码头的瞬时，监测系统在桩基、横梁和面板上均监测到了应变值。

第 1 撞击点为 74#排架，撞击瞬间桩基应变曲线出现明显的峰值，这与理论计算结果趋势一致，见图 4。撞击瞬间横梁顶部出现明显的拉应力，而在横梁底则出现明显的压应力，与理论计算结果在趋势上一致，见图 5。74#排架 AB 轴线之间面板应变曲线见图 6。

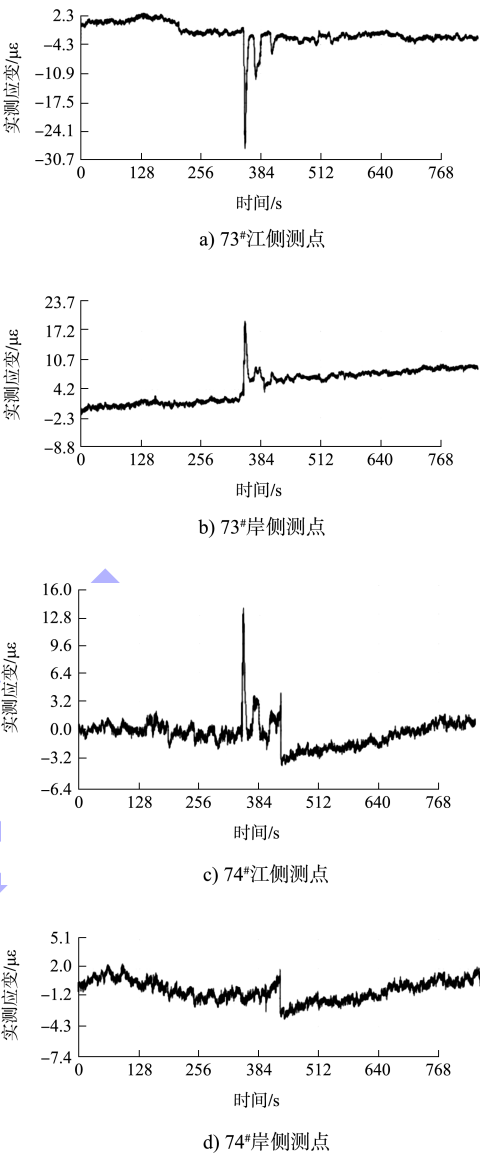


图 4 73#、74#排架 B 轴线江侧斜桩应变曲线

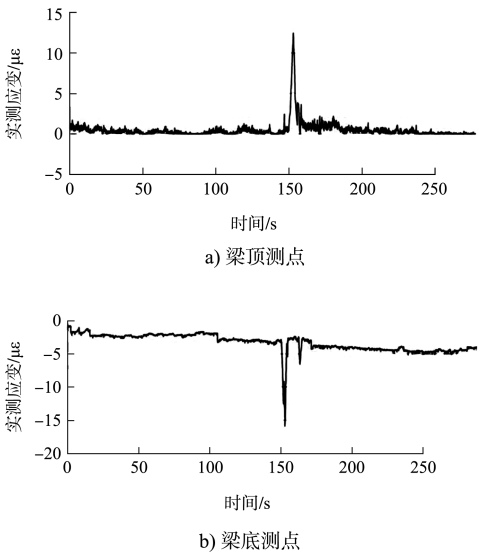


图 5 74#排架 AB 轴线之间横梁应变曲线

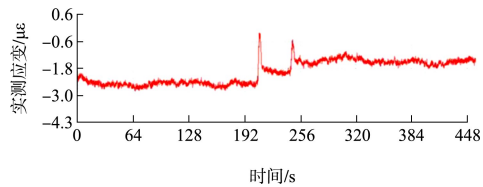


图 6 74#排架 AB 轴线之间面板应变曲线

从图 6 可以看出, 撞击瞬间面板底部出现明显的应力, 表明底板参与了码头的整体受力, 也就是说板的存在能更高效地将第 1 撞击点的力向两侧传递, 板与梁的连接方式及板的刚度对荷载的传递比例应该是有较大影响的。在平面排架的计算中采用固定的分配系数法, 稍微有所差别。这也就解释了高桩码头采用空间有限元方法计算所得结果都要小于采用平面排架简化计算所得结果的原因。

2.1.2 码头面堆载工况

在 74#排架左右两侧 A~B 轴区域进行堆箱。堆箱分两个阶段进行, 第一阶段堆放①~③号箱, 第二阶段堆放④~⑥号箱, 图 7 为堆放④~⑥号箱时横梁顶部的应变曲线。可以看出, 随着重箱逐一放下, 此处梁顶呈现受压状态, 压应力也呈台阶式增大。

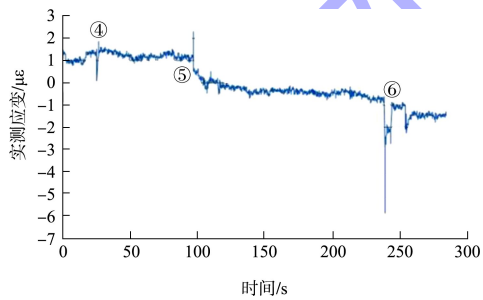


图 7 码头面堆载时 74#排架 AB 轴线之间横梁顶部应变曲线

2.1.3 岸桥吊装重箱工况

岸桥在 74#排架处就位, 从码头上吊起一个重箱后小车运行至外伸臂最远端。由图 8 可以看出, 随着重箱向岸桥外伸臂最远端移动, 轨道梁下的桩基压应力也线性增大。岸侧和江侧测值基本相同。

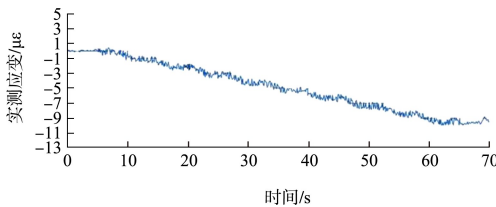


图 8 74#排架 A 轴线江侧桩基应变曲线

2.2 监测数据与有限元计算结果对比

2.2.1 有限元计算结果与监测数据对比

为了研究实测数值与理论计算值之间的差异, 采用有限元软件对整个码头结构分段进行实体建模, 并将现场实测的护舷反力值加载在模型上, 将计算所得构件应变与实测的构件应变进行对比。对比分析认为: 现场监测的结果与理论建模计算的结果有差异, 但是二者的趋势和方向是一致的。导致差异的主要原因有: 1) 现实中的边界条件非常复杂, 建模时进行了简化; 2) 现场监测时监测所得结果或多或少会存在一定的干扰与误差; 3) 混凝土材料的不均匀性。通过以上分析可以发现, 现场监测结果与有限元计算结果进行单点的数据对比研究意义不大, 而应该通过一系列的监测数据形成曲线, 再与计算结果进行比对。

2.2.2 重要构件对比

1) 桩基对比。桩基拉(压)应变主要由轴力和弯矩共同作用产生, 所以通常情况下桩基江侧和岸侧的应变值不同。经实测数据与模拟计算结果对比, 二者趋势完全一致, 只是数值有所差异。

2) 横梁对比。把码头在船撞靠泊工况下的监测数据进行统计分析并绘制成曲线, 与模拟计算结果所绘制的曲线进行对比分析, 见图 9。可以看出, 模拟计算值与实测值之间有差异, 但受力变化趋势基本一致。出现差异的原因除前述原因外, 还有受到监测点数量的限制无法获取整个横梁的所有特征值, 实测值曲线只能由 3~4 个测点数值连线而来, 相对比较平滑; 另一方面有限元模拟建模时桩帽部分未简化导致在节点处出现应变突变^[4]。

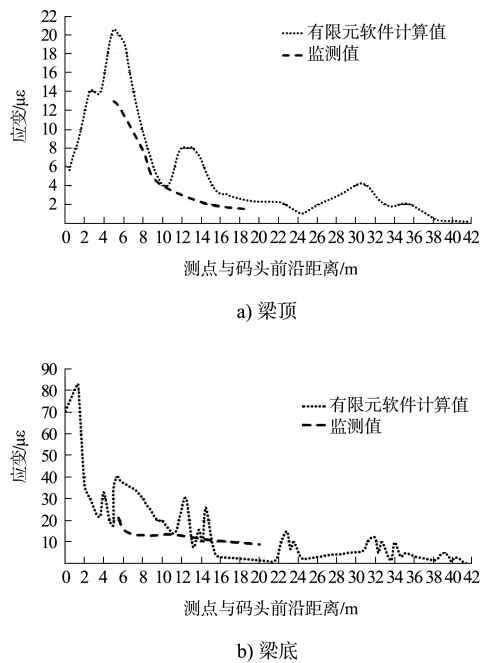


图9 改造后74#排架横梁应变值对比

2.3 从监测数值看码头改造方案的成效

分析码头改造方案的成效，最理想的状态是对改造前后的实测数值进行对比分析。由于现场试验中船舶撞击力大小无法控制，无法直接对比改造前后同一测点的实测数据来得出结论，但可以分析被改造构件受力产生的应变来研判改造成效。从改造后现场实测数据来看，在船舶靠泊、码头面堆载、岸桥吊重箱作业几个工况下，新增的桩基均有应变被捕获，且其应变方向与计算值吻合，特别是在船舶靠泊工况下可以明显看出护舷反力越大桩基的压应变也就越大，说明在这3个工况下新增桩基均参与了码头的受力；同时，从新增联系梁底部布置测点监测到的应变来看，新增联系梁起到了将力传递给新增桩基和相邻排架的作用。综上，本码头改造采用的在两个排架之间增加斜桩的方案是有效的。

2.4 从监测结果看水平力在排架间的分配

从监测结果也可验证水平集中力在排架中的分配。表1是3艘船分别靠泊74#排架(第1撞击点)时获取的监测数据。74#和76#排架横梁顶部对应点的应变之比的算术平均值分别为HYUNDAI UNITY PANAMA轮1.67、HYUNDAI UNITY PANAMA轮1.71和NYK PHOENIX PANAMA轮

1.72；根据JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[5]74#和76#排架的水平力分配系数为0.261和0.161，两个分配系数比值为1.62。可见分配系数的监测数据比值与理论比值非常接近，但也发现第1撞击点处的监测数据比值略高于理论比值。

表1 船舶靠泊74#排架时部分构件应变监测数据

测点位置	测点号	应变/ $\mu\epsilon$		
		HYUNDAI UNITY PANAMA 轮靠泊	HYUNDAI FUTURE 轮靠泊	NYK PHOENIX PANAMA 轮靠泊
74#排架 横梁顶部	24	11	7	12
	25	10	8	10
	26	7	5	9
	27	2	4	7
76#排架 横梁顶部	28	7	5	7
	29	4	4	6
	30	6	3	5
	31	1	2	4

注：HYUNDAI UNITY PANAMA轮、HYUNDAI FUTURE轮、NYK PHOENIX PANAMA轮靠泊时实测护舷反力值分别为92.44、71.82、119.16 kN。

3 结论

- 1) 受边界条件差异和测量误差等因素的影响，现场监测的结果与理论建模计算的结果在数值上存在差异，但是趋势和方向是一致的。
- 2) 码头改造采用的在两个排架之间增加斜桩的方案是有效的。
- 3) 水平力作用在排架间的分配系数比，规范取值与实测值非常接近，监测值略高于理论值。

参考文献：

[1] 李瑞刚,俞红.外高桥码头结构监测技术要求[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2013.

[2] 黄坤耀,李瑞刚,马建明.外高桥码头结构监测实施方案[R].上海:上海维固工程实业有限公司,2013.

[3] 黄坤耀,马建明.外高桥码头结构监测报告[R].上海:上海维固工程实业有限公司,2013.

[4] 罗文斌,李瑞刚,朱鹏宇,等.大型公共码头结构加固改造和能级提升成套技术研究及应用课题总报告[R].上海:上海国际港务(集团)股份有限公司,2014.

[5] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.码头结构设计规范:JTS 167—2018[M].北京:人民交通出版社,2018.