



基于现场监测数据的 高桩码头结构受荷响应研究*

刘旭¹, 吴锋¹, 卓杨¹, 高刚刚², 苏静波²

(1. 中交上海港湾工程设计研究院有限公司, 上海 200032; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要: 为完善高桩码头结构在实际复杂运营环境中的受荷响应研究, 基于某高桩码头现场监测数据, 结合船讯网、现场监控以及监测系统多方位信息融合技术, 对高桩码头结构的受荷响应进行分析。结果表明, 多方位信息融合技术能够高效准确地判断并识别船舶靠泊监测节点, 靠船撞击力较为符合右偏的对数正态分布; PHC 管桩应力响应受码头上部岸桥荷载影响明显, 同时地基土体约束使泥面下方桩基的应力响应相较于上方桩基出现滞后现象; 岸桥移动过程中横纵梁应力监测数据变化明显, 且对岸桥荷载作用位置较为敏感。

关键词: 高桩码头; 现场监测; 靠船力; 受荷响应

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0075-07

Load response of high pile quay structures based on field monitoring data

LIU Xu¹, WU Feng¹, ZHUO Yang¹, GAO Ganggang², SU Jingbo²

(1. CCCC Shanghai Harbour Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To improve the load response study of a high pile quay structure in the actual complex operational environment, the load response of a high pile quay structure is analyzed based on the field monitoring data of a high pile quay, combined with the multi-dimensional information fusion technology of shipxy.com, field monitoring and monitoring system. The results show that the multi-directional information fusion technology can efficiently and accurately determine and identify the vessel berthing monitoring nodes, and the berthing impact forces are found to be more in line with the right-skewed log-normal distribution. The monitoring data varies significantly during the movement of the bridge and is sensitive to the location of the bridge load.

Keywords: high pile quay; field monitoring; ship leaning force; loaded response

我国的港口建设中, 高桩码头具有较高的承载能力, 消浪能力出色, 最重要的是其适用于软土地基的特点^[1], 因此应用广泛。现阶段, 高桩码头的受荷响应研究已有较多的学术成果, 其中主要集中在温度效应影响、水平荷载影响以及竖向荷载影响等方面。汤益佳等^[2]针对某高桩框架式码头结构, 采用 ANSYS 有限

元软件建立温度应力作用下的高桩框架式码头实体模型, 研究温度变化对结构造成的不利影响。王浩天等^[3]通过 ANSYS 软件建立高桩码头参数化数值模型, 综合考虑失效模式之间的联系, 计算码头的水平向极限承载力。王元战等^[4]建立了高桩码头结构整体极限承载力分析的非线性有限元数值模型, 同时将蒙特卡洛方

收稿日期: 2023-08-25

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (51679081)

作者简介: 刘旭 (1989—), 男, 博士, 高级工程师, 从事结构工程监测。

法与有限元数值模型相结合,得出堆载下高桩码头结构整体极限承载力的概率分布及其统计参数。目前多采用有限元方法对高桩码头结构受荷响应进行研究,但高桩码头运营环境和承受荷载复杂,码头结构的监测手段尚不完善,因此高桩码头结构受荷响应研究理论和现场实践的相互验证难以实现。

本文依托某港区新建梁板式高桩码头的全寿命周期监测系统,监测采集靠船力、预应力高强度混凝土(high strength concrete, PHC)管桩应力和码头纵横梁应力监测时序数据,结合船讯网、现场监控以及监测系统多方位信息融合技术,对高桩码头结构的受荷响应进行分析,旨在为高桩码头的设计和实际运营管理提供借鉴。

1 高桩码头结构监测系统

1.1 监测设备

监测设备主要包括动态光纤光栅解调仪(型号为 NZS-FBG-A04)、光纤光栅反力计(型号为 NZS-FBG-AF)、光纤式钢筋计(型号为 BGK-FBG4911)、温度计(型号为 BGK-FBG4700)、振弦式钢筋计(型号为 BGK-49)、护舷防护板等。在结构钢筋上安装传感器,施工完成后将导线统一引入控制室的光栅解调仪中,并在现场控制室中设置服务器

对数据进行采集与存储,并通过远程控制实现云端数据的分析整理。

1.2 监测内容

高桩码头监测内容包括靠船力、PHC 管桩应力和纵横梁应力 3 项。在整个监测过程中,选取码头面空载情况下的数据进行分析。

1.2.1 靠船力监测

靠船力监测传感器分别安装于 126、130、134 共 3 个排架上。每排架含 2 个橡胶护舷, 3 个排架共需要 6 套靠船力监测传感器, 包含 24 个力传感器、6 个预埋定位板、6 个护舷保护板、96 个预埋 M16 高强螺栓和 36 个 M52 加长螺杆。靠船力监测传感器总体布置如图 1 所示,除伸缩缝两侧的排架间距为 5 m,其它排架之间的间距均为 7 m。安装靠船力监测传感器是为了实时监控船舶靠泊,避免大吨位船舶靠泊的撞击力超过码头承载极限,同时采集在役码头运营中撞击力荷载的时间分布和变化规律^[5]。靠船力监测传感器按照排架号由小到大、高程由高到低、力传感器由上顺时针方向依次排序的方法进行编号,如 HX126-S-1 表示 126 排上侧鼓型护舷上面第 1 个力传感器, HX130-X-4 表示 130 排下侧鼓型护舷从上面第 1 个力传感器开始顺时针旋转 270°的第 4 个力传感器。传感器编号方法如图 2 所示。

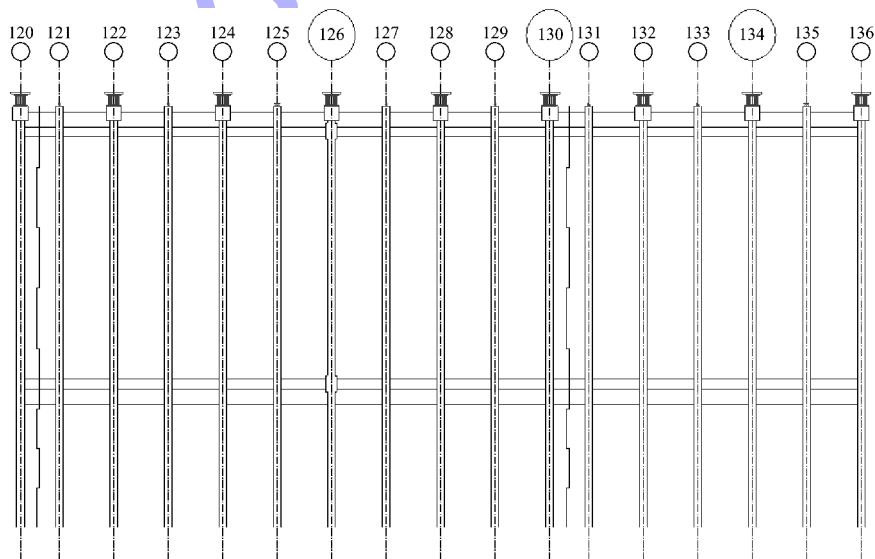


图 1 靠船力监测传感器总体布置

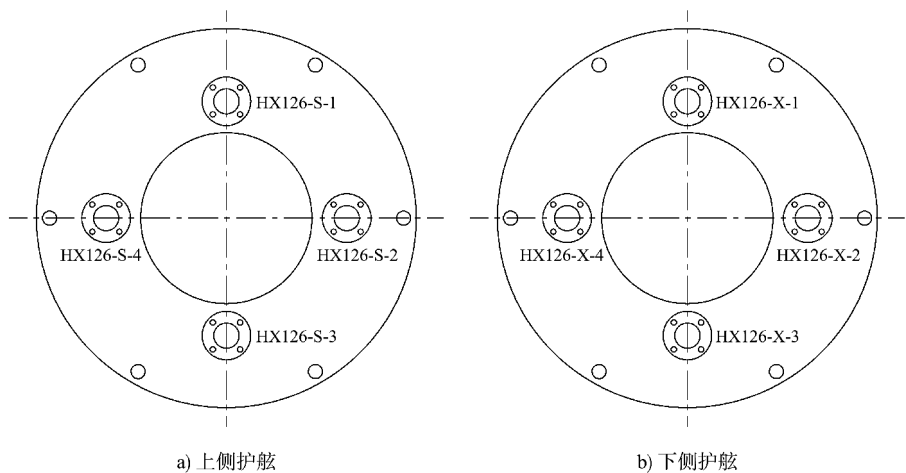


图 2 靠船力监测传感器编号

1.2.2 PHC 管桩应力监测

PHC 管桩应力测试传感器全部采用绑扎的形式与待测受力钢筋连接，监测 PHC 管桩为高桩码头 126、134 排桩，传感器布置如图 3 所示。传感器按

照桩排、桩号、测试截面号等特征进行编号，其中后缀 a 代表靠江侧传感器，后缀 b 代表靠岸侧传感器，如 126-1-5-b 表示 126 排①号桩第 5 个测试截面（测试截面由高到低依次编号）的靠岸侧传感器。

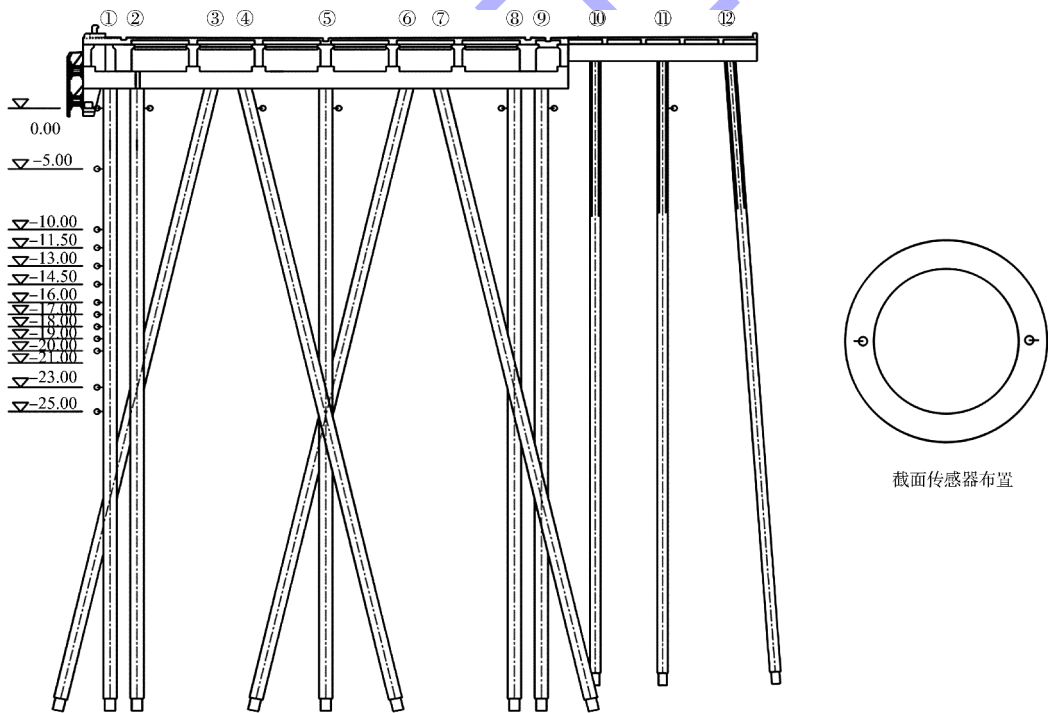


图 3 PHC 管桩传感器布置（单位：m）

1.2.3 PHC 横纵梁应力监测

横纵梁传感器布置在 126、134 排，按照排号、位置（从江心至岸侧）依次编号，如 126-HL1 表示

126 排横梁从江心向岸侧第 1 个位置的传感器，而 126-ZL1 表示 126 排纵梁从江心向岸侧第 1 个位置的传感器。横纵梁传感器布置及命名如图 4 所示。

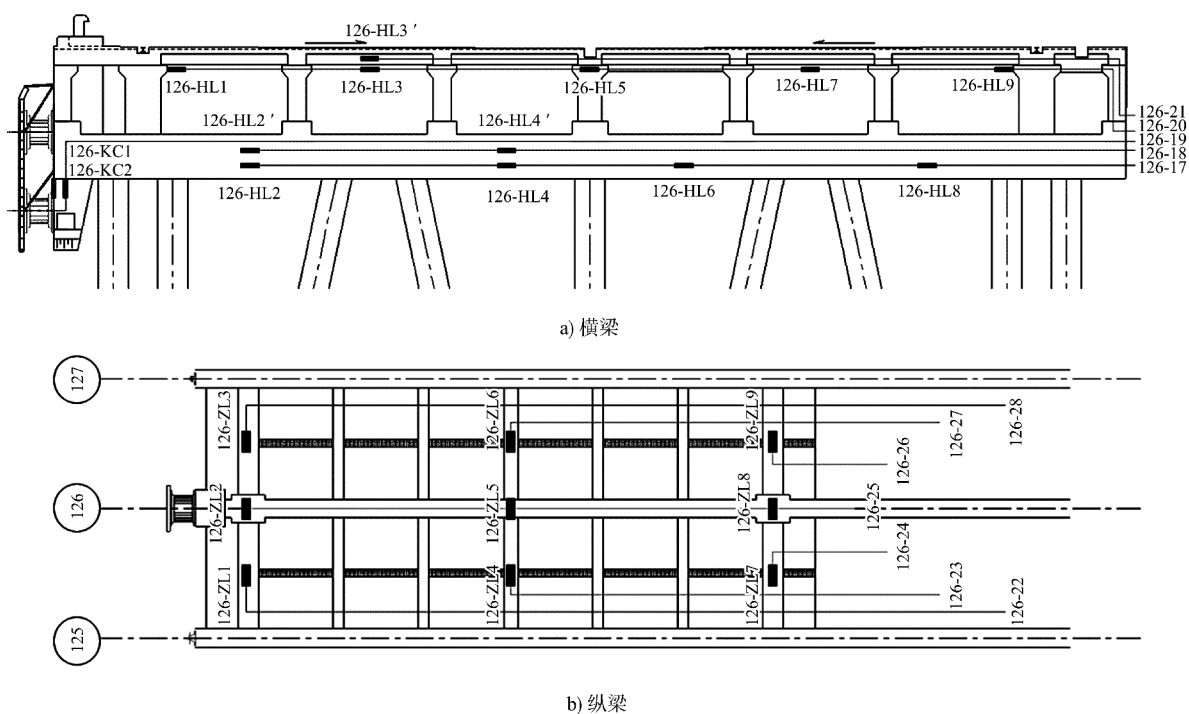


图4 横纵梁传感器编号及位置对照

2 监测数据分析

2.1 靠船力实测数据分析

高桩码头健康监测系统记录了1次典型的船舶靠泊时码头结构响应的数据联动情况,通过船讯网、现场监控以及监测系统多方位信息融合,获取整个过程的监测数据。此次靠泊发生于2022-11-02—2022-11-03,靠泊船舶是巴拿马籍货轮“新隆运88”号。通过查询微档案可知,该船长158.56 m,船宽22.6 m,总质量1.189 1万t,最大吃水8.1 m,与本工程设计船型的1万吨级船型基本一致,具有代表性。

通过调取高桩码头在船舶靠泊时间段的码头现场监控画面,2022-11-02T17:31:00 监控视频发生强烈振动,此时船舶与高桩码头发生靠泊碰撞,2022-11-02T17:41:00 视频振动停止,此时靠泊阶段完成。图5为船舶靠泊时间段内126、130和134排的靠船力传感器的撞击力变化量。

从靠船力传感器监测数据可以看到,在2022-11-02T17:31:00,130和134排的靠船力传感器同时出现峰值,而126排传感器的峰值出现稍有延迟。根据现场的监控视频与撞击力传感器的数据结果可知,“新隆运88”在靠泊时由西向东航行。从传感器数据的变化可以推断,该船于17:31:00同时

挤靠了130与134排架的护舷,船尾挤靠了126排架,该情况完全符合船讯网的船速信息与现场视频中船舶靠泊时的情形,同时也表明护舷中的撞击力传感器的对力学响应的实时性与准确性。

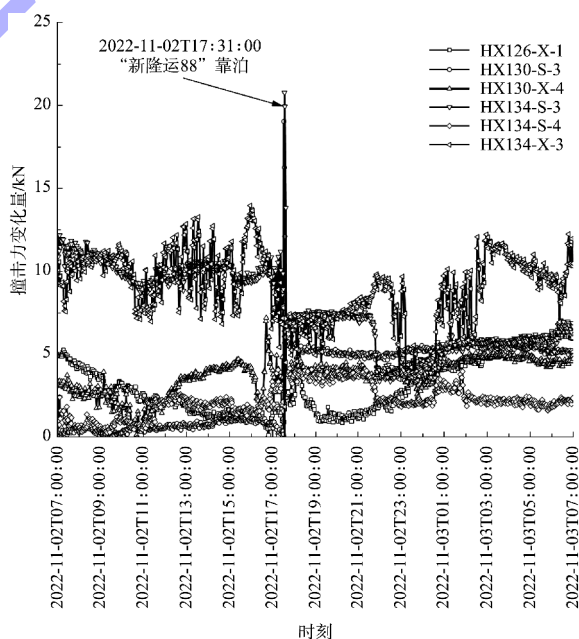


图5 靠船力传感器监测数据

2020年10月—2022年11月,根据监测数据产生突变的时间点与突变的图形,通过整理典型撞击力数据进行频率汇总,如图6所示。从图中可知,高桩码头在运营后,126、130以及134排

架所受的撞击力等级大部分数值为 200~500 kN, 占比 64.9%; 500~1 000 kN 的撞击力占比为 22.1%; 超过 1 000 kN 撞击力的占比约为 9.1%; 而 200 kN 以下的撞击力占比较小, 仅为 3.9%。

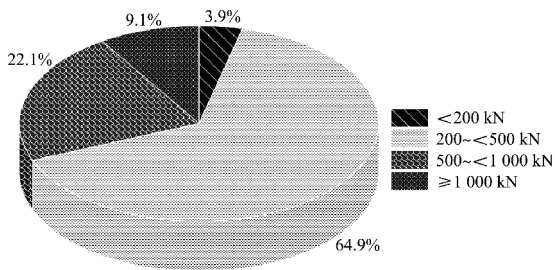


图 6 撞击力监测数据频率

高桩码头的设计撞击力为 1 836 kN, 截止到目前, 现场测得的撞击力均处于 1 800 kN 以内, 如图 7 所示。为了更直观地获取撞击力的统计规律, 将所有撞击力汇总后进行概率分布类型的拟合。由于撞击力均为正值且柱状图具有右偏的特征, 综合比较常见的概率分布类型后, 选取对数正态分布、Weibull 分布、Gamma 分布分别拟合其统计特征。从图中可以看出, 撞击力较为符合右偏的对数正态分布, 其均值约为 350 kN, 可能是由于码头还处于运营初期、作业船舶吨位还较小的原因。

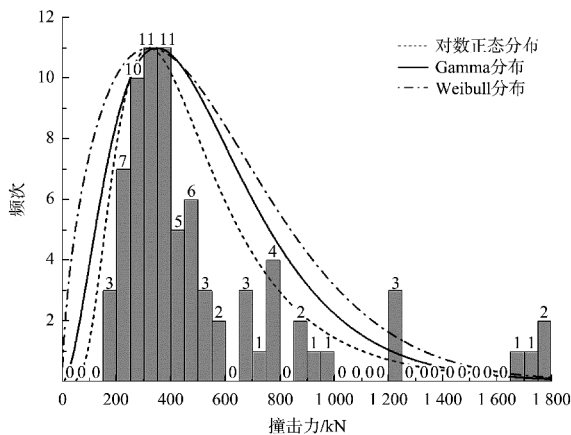


图 7 撞击力监测数据频次统计直方图

2.2 PHC 管桩实测数据分析

在船舶靠泊结束后, 高桩码头健康监测系统记录了一次典型的岸桥移动全过程的高桩码头 PHC 管桩力学响应的数据联动情况, 通过现场监控和监测系统的多方位信息融合, 获取整个过程的监测数据。此过程发生于 2022-11-02T17:08:00—2022-11-03T05:07:00。对此次岸桥移动全程监测数据进行归一化分析, 其中 126~135 排架和岸桥连接方式平面布置如图 8 所示, 图中给出了 2022-11-03T05:07:00 现场 16 号岸桥进入 130 排架时的位置。图 9 为岸桥移动过程中 126 排架第 1 列靠岸侧 PHC 管桩的应力变化量曲线。

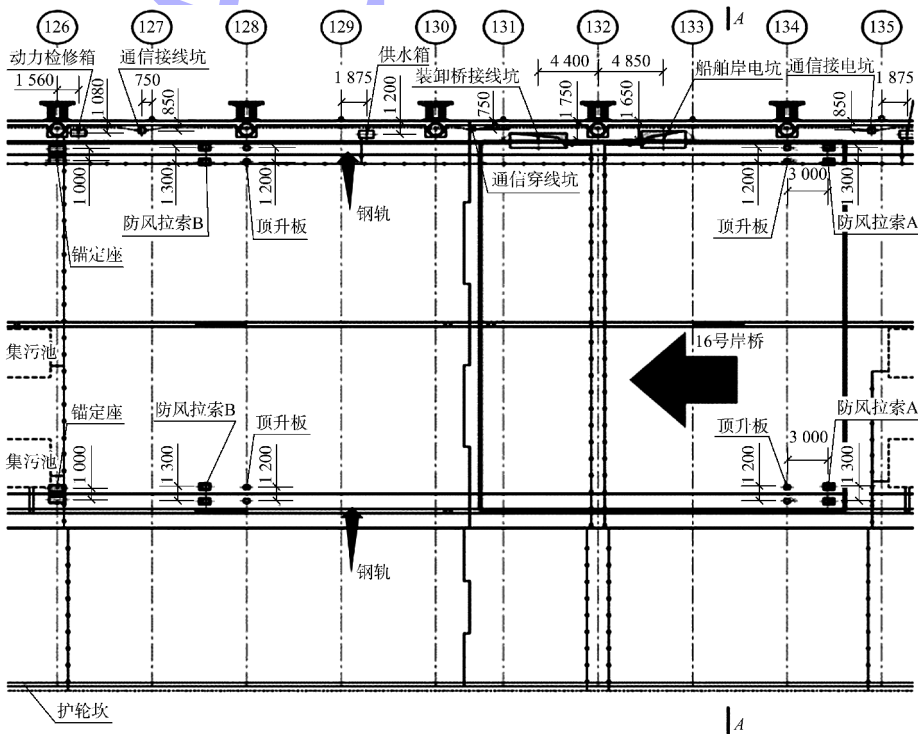


图 8 排架和岸桥连接方式平面布置 (单位: mm)

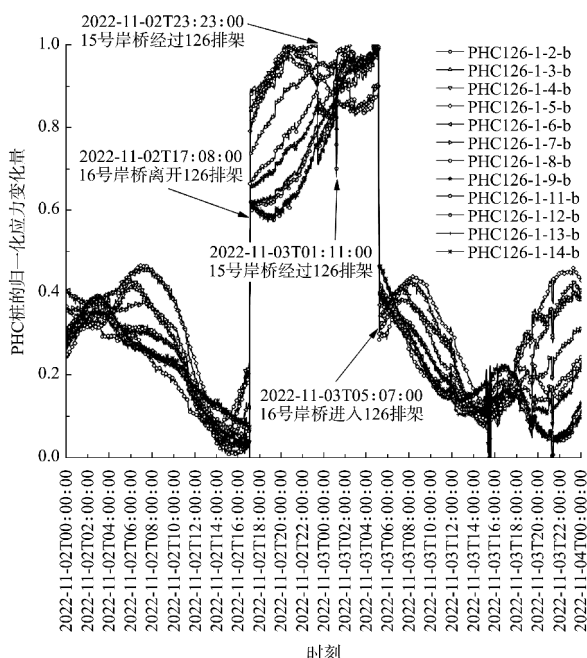


图9 岸桥移动过程 PHC 管桩归一化应力变化量曲线

从图中可以看到, 2022-11-02T17:08:00 出现了第 1 个应力突变, 这是因为 16 号岸桥整体移出了第 13 分段, 导致 126 排架处突然卸载, 该突变往正应力方向变化, 符合实际情况。第 2 个应力突变出现在 2022-11-02T23:23:00, 此时 15 号岸桥开始向码头东侧移动, 首先是将其整体荷载全部施加于第 13 分段, 然后部分进入第 14 分段, 此时 126 号排架会先承受 15 号岸桥的全部重力, 突变往负应力方向变化, 随着 15 号岸桥的运动, 分担的岸桥荷载逐渐减少。而第 3 个应力突变出现在 2022 年 11-03T01:11:00, 此时 15 号岸桥又开始返回第 12 分段, 中间路过第 126 排架位置, 因此出现负应力方向的突变。最后在 2022-11-03T05:07:00, 由于 16 号岸桥开始返回第 13 分段, 出现了第 4 个负应力方向的突变。

另外, 在第 1 个应力突变发生后, 各传感器的应力突变幅度并不相同, 泥面以上的应力突变明显高于泥面以下, 且埋设越深的传感器所受的应力突变幅值越小, 这是因为在竖向荷载突然卸除后, 泥面以上的 PHC 管桩可以对荷载的变化作出瞬时响应, 但是泥面以下的 PHC 管桩因土体对管桩产生瞬间的侧向摩阻力导致监测数据出现了一定的滞后响应。随着时间的推移, 侧向摩阻力消散, 不同幅度的突变会逐渐与泥面以上的应力值同步, 这一点在第 2 个应力突变上也能反映出来。

2.3 横纵梁实测数据分析

图 10 为 2022-11-02T12:00:00—2022-11-03T11:00:00(岸桥移动全过程)码头横梁上部测点的实测数据, 为了更直观地分析其规律, 对实测应力变化量进行归一化。图 11 为 2022-11-02T12:00:00—2022-11-03T12:00:00(岸桥移动全过程)码头纵梁上部测点的实测数据, 同样对实测应力变化量归一化进行分析。表 1 为 2022-11-02T17:06:00—2022-11-03T05:08:00 的 7 个关键时间点以及这些时刻岸桥的运行状况和所处位置。

测点中单数编号位于横梁上侧, 双数编号位于横梁下侧。从图 11 中可以明显看出 15 号和 16 号岸桥在移动过程中各测点的应力联动响应, 在 4 个关键时间点均有统一的应力突变。其中测点 126-HL2' 与 126-HL4' 在岸桥卸载后均往拉应力方向突变, 且测点 126-HL4' 位置的轴应力突变比测点 126-HL2' 位置更大。测点 126-HL3、126-HL3'、126-HL5、126-HL7、126-HL9 在岸桥卸载后均往压应力方向突变, 且测点 126-HL3、126-HL3' 和 126-HL7 的突变幅度基本相同, 而测点 126-HL9 的突变幅度较小。

表 1 关键时刻岸桥运行状态

工况	时间	岸桥运行状态
A	2022-11-02T17:06:00—17:08:00	16 号岸桥由西向东经过伸缩缝, 并停在 134 排架附近
B	2022-11-02T20:13:00—20:14:00	16 号岸桥由东向西移动, 停后西侧轮横跨伸缩缝
C	2022-11-02T23:25:00—23:27:00	15 号岸桥由西向东移动, 并横跨伸缩缝; 16 号岸桥位置同工况 B
D	2022-11-03T01:10:00—01:11:00	15 号岸桥由东向西移动, 返回第 12 分段原始停机位
E	2022-11-03T02:25:00—02:26:00	16 号岸桥由东向西移动, 停后横跨伸缩缝
F	2022-11-03T04:35:00—04:36:00	16 号岸桥由西向东移动, 并停在第 134 排架附近
G	2022-11-03T05:07:00—05:08:00	16 号岸桥由东向西移动, 返回第 13 分段原始停机位

注: 伸缩缝位于 130、131 排架之间。

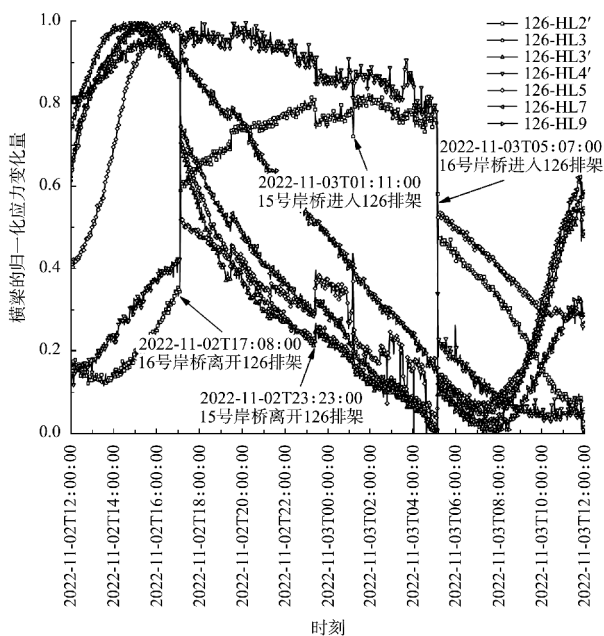


图10 岸桥移动全程横梁轴向应力变化量归一化

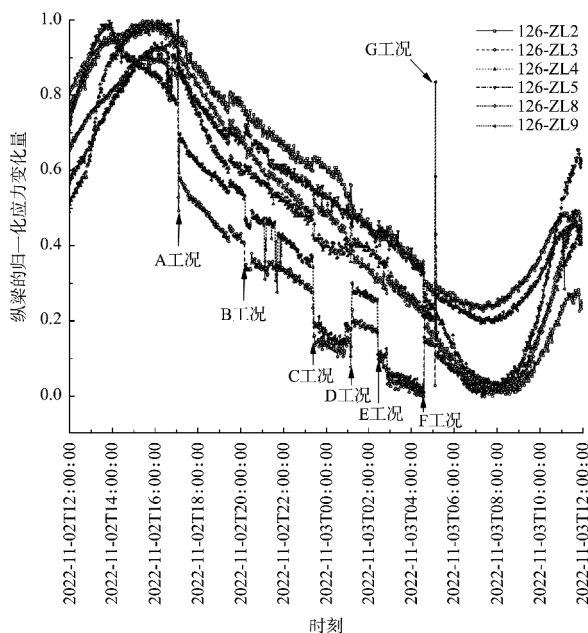


图11 岸桥移动全程纵梁轴向应力变化量归一化

选取具有代表性的位置测点,包括126排架的靠江侧、结构中间、靠岸侧纵梁的测点126-ZL2、

126-ZL5、126-ZL8,126与127排架之间的靠江侧和靠岸侧纵梁的跨中测点126-ZL3、126-ZL9,以及125排架与126排架之间的中间纵梁跨中测点126-ZL4。从图11中可以明显看出,15号和16号岸桥在移动过程中各测点在7个关键时间点均有统一的应力突变。

3 结论

1) 结合船讯网、现场监控以及监测系统多方位信息融合技术能够高效准确地判断并识别船舶靠泊监测节点。监测到的撞击力较为符合右偏的对数正态分布,其均值约为350 kN,可能是由于码头还处于运营初期、作业船舶吨位还较小的原因。

2) PHC管桩应力响应受码头上部岸桥荷载影响明显,同时地基土体约束使泥面下方桩基的应力响应相较于上方桩基出现滞后现象。

3) 横纵梁应力监测数据在岸桥移动过程变化明显,且对岸桥荷载作用位置较为敏感。

参考文献:

- [1] 吴锋,庞丹丹,张章.高桩码头运营期耐久性模糊评估方法[J].水运工程,2013(2):62-67.
- [2] 汤益佳,李伟,孙鹏,等.高桩框架式码头结构的温度效应影响分析[J].水运工程,2023(3):65-72.
- [3] 王浩天,董胜.水平荷载作用下高桩码头整体可靠度研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2021,51(8):65-71.
- [4] 王元战,李姐.堆货荷载下高桩码头结构整体安全度分析[J].水道港口,2013,34(5):430-436.
- [5] 吴锋,卓杨,刘旭,等.高桩码头全寿命周期的健康监测技术[J].水运工程,2023(2):44-48,53.

(本文编辑 王传瑜)