



高桩码头全寿命周期的健康监测技术

吴锋¹, 卓杨¹, 刘旭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: 随着智慧水运的蓬勃发展, 基于全寿命周期的高桩码头结构运营安全与健康状态监测越来越受到重视。以某港区新建码头工程为依托, 开展高桩码头全寿命周期的健康监测研究, 基于高桩码头结构荷载条件、运营环境、监测仪器特点进行全寿命周期传感器及其耐久性设计, 线路保护及更换预留设计, 开发与之相适应的监测系统, 并结合数据归一化和动态时间规整对获取的监测数据进行分析。结果表明, 采用的数据处理方法可以较好地量化不同测点数据之间的相似度, 实时监测的数据可用于评价码头结构现有状态, 为码头结构的维修、养护与管理决策提供依据。

关键词: 高桩码头; 全寿命周期; 健康监测; 监测系统

中图分类号: U 656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)02-0044-05

Health monitoring technique of high piled wharf based on life cycle theory

WU Feng¹, ZHUO Yang¹, LIU Xu¹, GAO Gang-gang², SU Jing-bo²

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

2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the vigorous development of intelligent water transportation, the monitoring of operation safety and health of high piled wharf structure based on life cycle has attracted more and more attention. Combining with a new wharf project of a port area, this paper carries out the research on the life-cycle health monitoring system of high piled wharf. Based on the structural load conditions, operating environment and monitoring instrument characteristics of high piled wharf, this paper carries out the life-cycle sensor and its durability design, line protection and replacement reservation design, develops the corresponding monitoring system, and analyzes the obtained monitoring data combining with data normalization, dynamic time warping and numerical modeling methods. The results show that the adopted data processing method can better quantify the similarity between data of different measuring points, and the real-time monitoring data can be used to evaluate the existing state of the wharf structure, which can provide a basis for the decision-making of the repair, maintenance and management of the wharf structure.

Keywords: high piled wharf; life cycle; health monitoring; monitoring system

近年来对码头结构的损伤监测逐渐受到工程界的重视, 对灾害的预警、灾后损伤评估及剩余寿命预测已成为当前各国学者们研究的热点^[1-3]。全寿命设计是指从规划、设计、建设、运营、管理、养护和维修等各个环节采取恰当的方法和措施, 实现结构在其整个寿命期内总体性能最优的一种设计理念和方法。一些发达国家也进行了相

关设施全寿命的理论研究工作, 如在港口基础设施^[4-5]、桥梁、海上风电等方面。在港口工程领域, 全寿命理论的研究目前还停留在理论阶段, 尚未开展过基于全寿命周期的现场监测, 故理论与现场实践相互验证难以实现。

本文以某港区新建高桩码头工程为依托, 采用远程无线自动化监测的手段, 开展了预应力高

收稿日期: 2022-04-28

作者简介: 吴锋(1978—), 男, 博士, 教授级高工, 从事港口工程结构设计。

强度混凝土 (PHC) 管桩应力、变形与位移监测、码头深层土体位移监测、码头纵横梁应力监测、承台位移监测和靠船力监测, 开发了自动化监测系统, 对码头运营期的桩基、梁、周边环境等开展全面的受力或变形监测, 实时掌握码头结构健康状态, 为准确判断码头结构现有应力状态、加强运营期码头设施维护等方面提供有力支撑, 为码头结构的后期可能存在的维修、养护、加固改造与管理决策提供依据和指导。

1 高桩码头结构全寿命周期监测设计

高桩码头结构健康监测是一个多参数的监测项目, 需要利用设置在码头关键部位的监测传感器, 对码头在运营阶段的安全和使用状况进行实时、连续的监测。针对高桩码头结构特点, 监测内容主要包括桩基应力、纵横梁应力、深层土体变形、靠船动力作用特性以及结构耐久性等, 由于依托工程为内河码头, 受氯离子等影响较小, 因此监测中未进行相应的耐久性监测。PHC 管桩与横、纵梁传感器的埋设位置分别为第 126、134 排,

撞击力传感器的埋设位置为第 126、130、134 排, 本文提及的编号均以排架号为开头表示。

1.1 PHC 管桩应力监测

桩基是高桩码头结构中最关键的构件之一, 根据高桩码头的结构特点, 利用在桩身断面上对称布置 2 个传感器监测桩身的受力情况。这种布置方式能够以较少数量的传感器实现 PHC 管桩的内力监测, 从而间接计算出桩的受力情况。监测传感器可选取光纤光栅式和振弦式, 根据监测得到的应变计算出桩身应力、弯矩和桩身挠度曲线。

1.2 纵横梁应力监测

通过对纵横梁的应力监测可以获得码头受载情况, 及时预警避免对码头结构造成不可修复的损伤。选取光纤光栅式和振弦式传感器进行应力监测, 仪器的埋设位置通过数值模拟计算选取。取一个完整的横梁建立数值计算模型, 荷载主要考虑顶板、纵梁自身重力, 码头面均载和岸桥荷载。纵、横梁的应力传感器布置如图 1 所示, 选取的排架编号为 126。

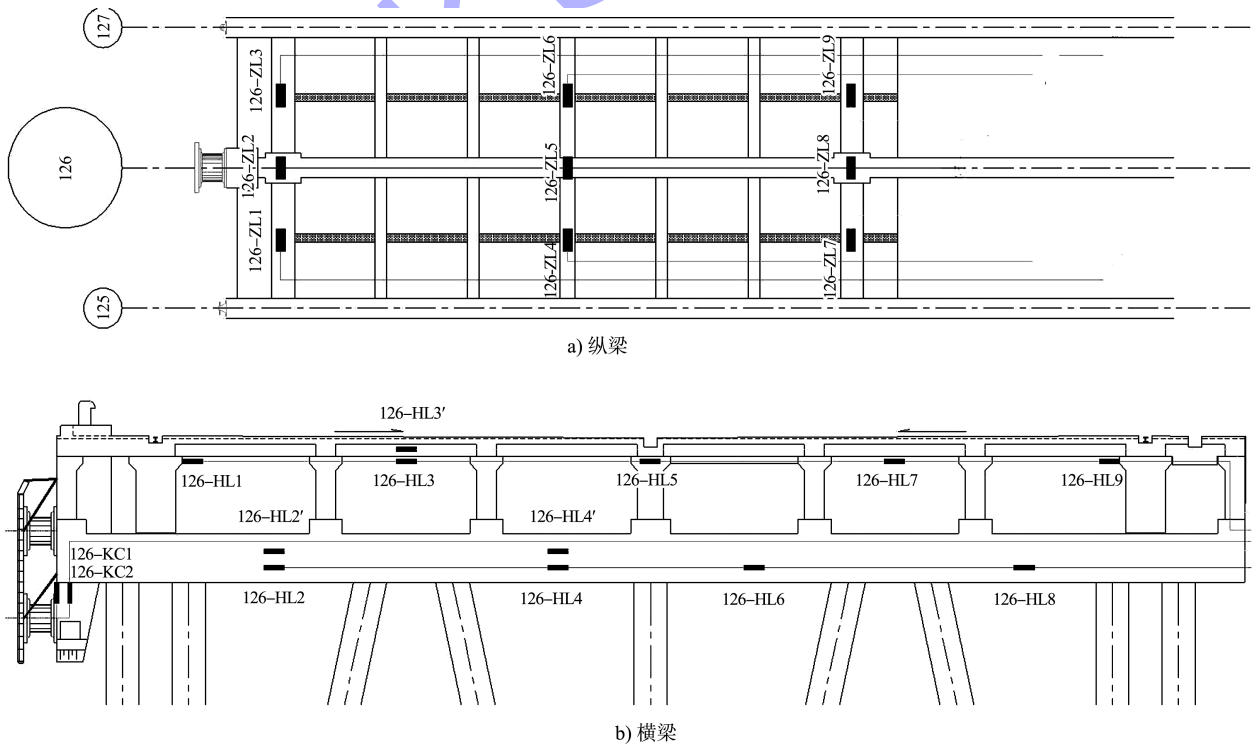
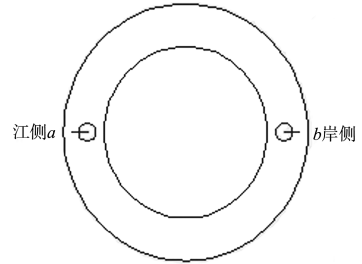


图 1 纵横梁传感器布置

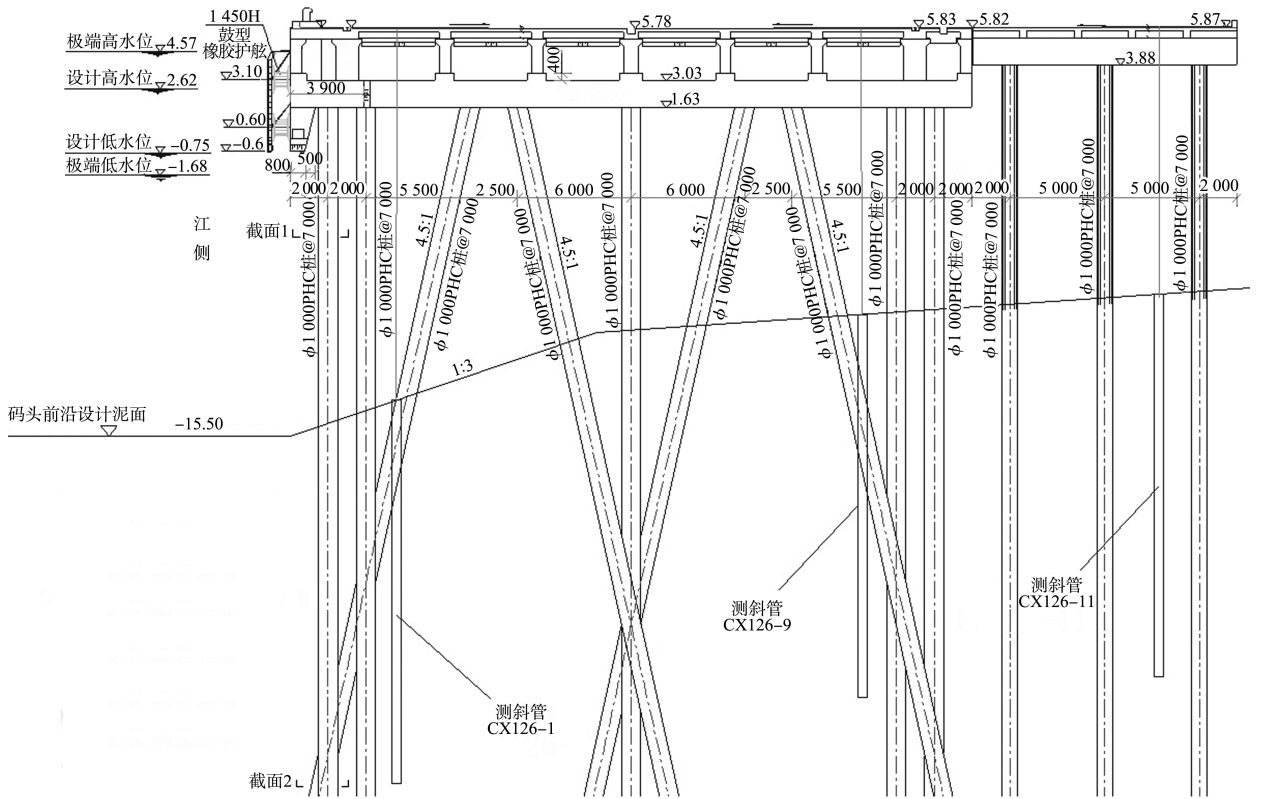
1.3 深层土体位移监测

高桩码头在运营期间，岸坡土体变形会造成桩基结构发生倾斜变形，易造成构件间的连接部位开裂、构件之间出现错位或脱离，严重的会造成基桩折断，对高桩码头的安全造成威胁。因此在码头排架间布置测斜管，实时监测周围土体位移。针对高桩码头工程特点，测斜管分别布置在高桩码头的前端叉桩、后端叉桩以及引桥后端的位置，从测斜管中引出的传输线可通过钢丝软管

和抱箍卡钳固定于直立的 PHC 管桩上。高桩码头第 126 排附近的传感器与测斜管布置见图 2。



a) 截面传感器布置



b) 测斜管布置

图 2 PHC 桩截面传感器与测斜管布置 (尺寸: mm; 高程: m)

1.4 靠泊力监测

船舶靠泊撞击力对码头结构的安全性影响较大，随着水运行业的快速发展，船舶大型化趋势愈发显著，靠泊撞击力增大也增加了码头撞损的概率。船舶靠泊时由于速度控制不当以及人为操作的失误，均会造成船舶撞击力过大，致使码头结构单个或多个构件破损，降低结构的安全性。通过研发专用传感器，安装于护舷与码头结构之间，实时监测船舶靠泊时经过护舷传递到码头结构上的动态力的大小及其变化情况，实现对码头

船舶撞击力实时、准确的自动监测。通过监测数据与码头结构的动态响应数据的对比分析，实现对靠船力实时、准确的感知，掌握靠泊力及靠泊状态对码头结构产生的安全影响，可为大型船舶的安全靠泊提供指导，并为码头结构安全评估提供科学的数据支撑。

2 远程自动化监测系统开发

监测系统包括硬件和软件两大部分，分为5个子系统，分别是传感器子系统、数据采集与传输子

系统、数据存储子系统、数据处理与分析子系统以及数据评估与展示子系统。各个子系统之间通过有线或无线网络连接从而协同工作。其中硬件系统位于码头现场,而软件系统位于远程监控室中。硬件系统中传感器子系统的功能是测量、获取码头健康评估所需的各种重要参数。数据采集与传输子系统主要功能是完成监测数据的采集、预处理及通讯。软件系统中数据存储子系统的主要功能是实现对码头结构工作状态监测过程中所获取数据的存储和管理,通过该系统可进行数据的修改、删除、查询和打印输出等操作;数据处理与分析子系统是对采集及传输到基站的现场监测数据进行处理和分析;数据评估与展示子系统将现场监测数据、瞬时或长期获取的信息进行综合处理,实现数据的分析与解释、健康状况评估以及管理维修决策。

3 监测数据的处理与分析

3.1 PHC 管桩监测数据分析

对第 134 排 PHC 桩采集到的数据发现,PHC 桩在 90 d 内的曲线变化虽然具有一定的波动性,但是整体呈现出较为稳定的状态,PHC 桩内的钢筋应力变化量基本保持在 7 MPa 以内,如图 3 所示。

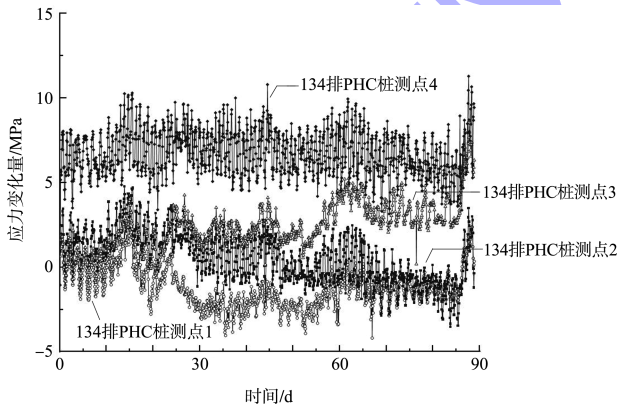


图3 第134排PHC管桩内钢筋90d的应力变化量

通过对比历史数据判断新数据的匹配度,这种方法被称为动态时间规整,也称为DTW(dynamic time warping)。该方法在处理监测数据的相似度方面有一定的作用,可以根据历史状态数据判定结构的实时健康状态,从而实现仅根据实时的监测数据就可以在一定程度上预判结构的工作状态,达到健康监测的目的。为了更好地展示PHC管桩

各测点之间的关系,本文结合归一化方法、动态时间规整和基准曲线对比的方法量化两个时间序列之间的相似度。

DTW方法可以通过计算2个数据集之间的欧氏距离评价其相似度,2个数据集越相似,距离越小。选取同一截面 a 测点的监测数据集为基准数据,与 b 测点进行相似度评价。这里引入一个相似百分比的概念,其计算公式为:

$$S = \frac{DTW_{0-1} - DTW_{待对比}}{DTW_{0-1}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S 为数据集的相似百分比; DTW_{0-1} 为全“0”数据集与全“1”数据集之间的DTW值; $DTW_{待对比}$ 为选取的基准数据集与待对比数据集之间的DTW值。

通过相似百分比计算,结果如图4所示。可以看出,PHC管桩在同一截面的 a 、 b 两个测点的钢筋应力变化值趋势基本贴合,最高相似百分比达到99.30%,这也证明了传感器具有较高的敏感度和准确性,能够很好地反映出PHC管桩的钢筋应力变化量。

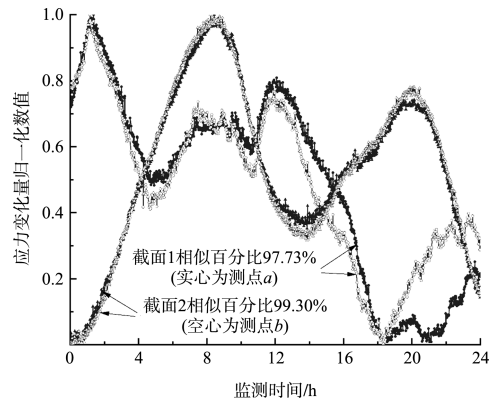


图4 PHC管桩部分截面 a 、 b 测点应力变化量的相似关系

3.2 纵横梁监测数据分析

通过对采集的第126排纵横梁数据进行处理,由于本工程还未投产使用,上部没有使用荷载,可考虑温度变化对传感器的影响,绘制近1年的应力变化量的趋势,如图5所示。在不考虑温度补偿的情况下,可以明显地看出应力变化量受温度影响较大,在1月份处于最低点,7月份处于最高点。通过查询当地在此期间的温度可知,最低气温为 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高温度为 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差达 $44\text{ }^{\circ}\text{C}$,

根据混凝土热膨胀系数和钢筋弹性模量，可推算钢筋应力传感器的应力差约为 90.64 MPa。该值与监测数据中的平均差值基本一致，表明钢筋应力传感器的监测结果较为可靠。

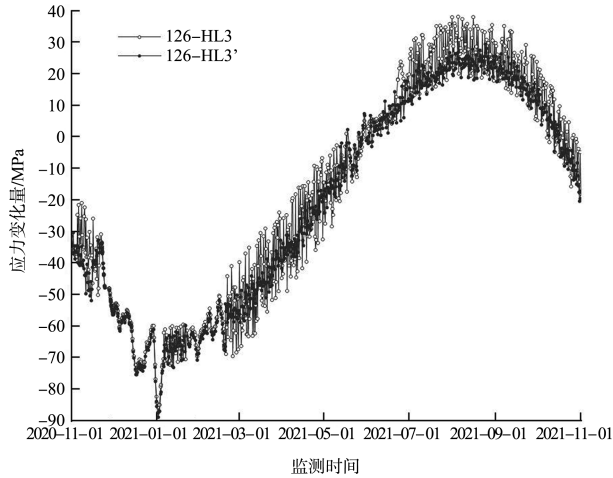


图5 第126排横纵梁部分测点长期应力变化

3.3 测斜仪监测数据分析

通过对采集到的第126排测斜管数据进行分析，如图6所示，其中位移变化量中负值代表岸侧方向。可以发现，靠江侧的测斜仪测点CX126-1的水平位移往岸侧方向变化，靠岸侧的测斜仪测点CX126-9的水平位移往江侧方向变化，而后侧引桥位置的测斜仪测点CX126-11的水平位移变化趋势不明显。

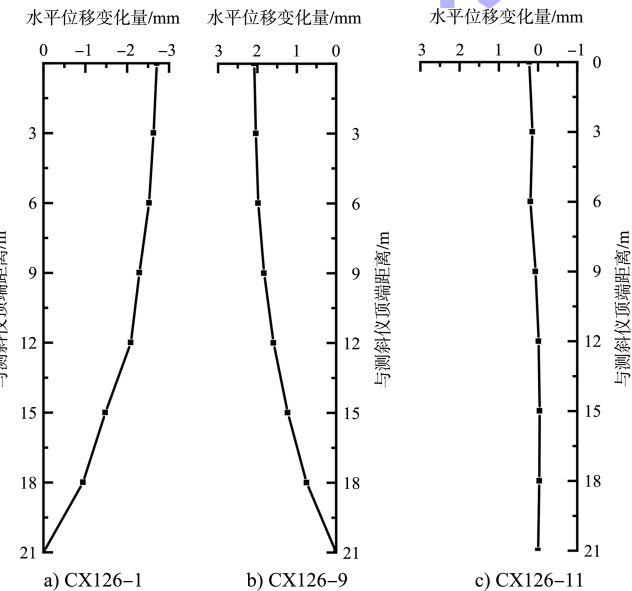
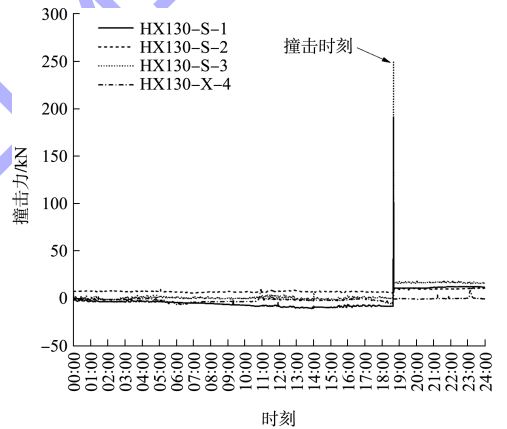


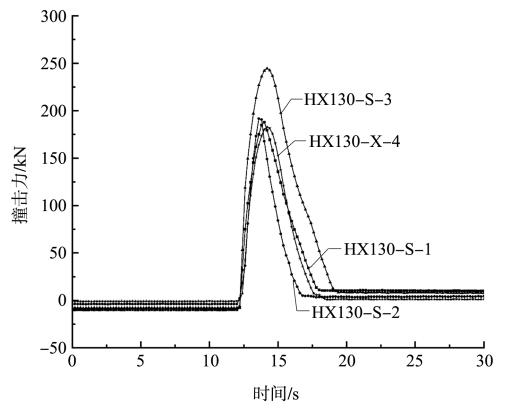
图6 第126排测斜管在一年内的水平位移变化量

3.4 船舶撞击力监测数据分析

对采集到的第130排撞击力传感器的数据进行分析，如图7所示。可以看出，船舶撞击橡胶护舷时，各力传感器基本上同时受到压力作用，说明各传感器工作状态良好，能及时响应外部受力；撞击力上升阶段，大约2 s后达到荷载峰值，各力传感器中最大受力250 kN、最小受力180 kN，说明船舶撞击方向并非正对橡胶护舷中心，产生了偏心荷载作用，从而使各力传感器受力大小产生差异；撞击力下降阶段，大约3 s后外部荷载回归到船舶撞击之前的状态，本阶段时间长于撞击力上升阶段，也反映出靠船过程中船速逐渐减慢的过程。上述工况表明，传感器能够实时地监测到现场船只靠泊时的撞击力过程。



a) 全天监测数据



b) 峰值数据

图7 第130排护舷撞击力采集数据