

· 港口 ·



高桩码头结构安全监测预警模型及工程应用*

王承强^{1,2}, 王 臣^{1,2,3}, 贾 宇^{1,2}, 梁桂兰^{2,3}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 高桩码头结构在服役期内会出现不同程度的损伤, 导致码头结构安全性降低。为保证码头长期安全运行, 可通过实时监测确定码头运行状态并及时预警。提出一种高桩码头结构安全监测预警模型, 采用不同结构状态的设计控制值作为不同级别的预警阈值, 每级预警阈值对应不同的风险程度, 针对不同级别的预警提出相应处置措施。将该预警模型应用于南京港某高桩码头的安全监测, 对可变荷载作用下码头结构位移和桩基应变进行实时监测, 并计算设置码头结构位移和桩基应变三级安全预警阈值。结果表明, 码头安全预警阈值的设置及安全告警的应对措施科学有效, 实现了码头结构全工况整体技术状态评估和安全预警。

关键词: 高桩码头; 可变荷载; 动位移; 动应变; 安全监测; 阈值

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0015-07

High-pile wharf structure safety monitoring and forewarning model and its engineering application

WANG Chengqiang^{1,2}, WANG Chen^{1,2,3}, JIA Yu^{1,2}, LIANG Guilan^{2,3}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, China;

3. Hohai University, College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Nanjing 210024, China)

Abstract: The high-pile wharf structure is damaged to various degrees during the service life and the safety of structure is degenerated. To ensure the long-term safe operation of wharves, it is necessary to monitor their operating state and timely forewarn the risks through real-time monitoring. In this paper, a forewarning model of high-pile wharf structure safety monitoring is proposed, and design control values of different structural states are used as the forewarning thresholds of different levels. Each level forewarning value corresponds to different risk levels, and the disposal measures are proposed for different-level forewarning. The forewarning model is applied to monitor safety of a high-pile wharf in Nanjing Port, including displacement of the wharf structure and strain of the piles under variable load in real time, and the three-level safety forewarning thresholds of the displacement of the wharf structure and the strain of the piles are calculated and set. The results show that the setting of wharf safety forewarning threshold and the countermeasures of safety alarm are scientific and effective, which can realize the purposes of overall technical state assessment and safety forewarning of all the operating condition of the wharf structure.

Keywords: high-pile wharf; variable load; dynamic displacement; dynamic strain; safety monitoring; threshold value

收稿日期: 2023-08-18

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52109162); 国家重点研发计划项目(2023YFC3206103); 江苏省基础研究计划自然科学基金项目(BK20221192)

作者简介: 王承强(1975—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为水工结构病害诊断。

作为货物装卸运输的平台，码头结构的安全状态对港口生产经营至关重要。在长期服役过程中，由于风浪流等环境荷载、机械荷载和船舶荷载等共同作用，码头结构会出现不同程度的损伤，导致结构抗力降低，对码头结构安全造成威胁。因此，有必要开展码头结构安全监测与预警，保证码头生产运营安全^[1-2]。

由于高桩码头重心较高，在可变荷载作用下结构容易产生较大的整体位移，因此，可根据码头位移评估码头结构安全状态^[3]。基于无源伺服振动传感器^[4-5]与数据分析系统，无基准动态位移测试技术针对高桩码头动位移实时监测的适用性较好。码头结构在可变荷载作用下产生较大的整体位移时，桩基顶部出现较大的应变，通过监测桩基顶部应变可掌握结构变形时的桩基受力情况^[6-7]。

本文利用拾振器、应变计、数据采集仪与视频监控建立高桩码头结构安全监测系统，并应用于南京港某高桩码头的安全监测与预警研究，将现场监测数据与计算分析相结合，提出该码头各级安全预警阈值。通过对码头结构位移与应变进行实时监测和统计分析，了解可变荷载作用下的码头结构整体技术状态，通过计算分析提出码头结构各级安全预警阈值，达到码头结构全工况整体技术状态评估和预警的目的。

1 工程概况

码头原设计为 5 000 吨级，经码头靠泊能力论证，核算靠泊船舶等级为 8 000 t。码头总长 101.6 m、总宽 34.5 m，其中前桩台宽度 19.0 m、后桩台宽度 15.5 m。前桩台分为 2 个结构段，共 18 榀横向排架，排架间距为 6 m；后桩台共 20 榀横向排架，排架间距为 5 m，结构不分段。码头为高桩梁板式结构，前桩台横梁下不设桩帽，后桩台横梁下设有桩帽。前桩台第 A、B 排的桩采用截面边长为 600 mm 的预应力钢筋混凝土方桩，其余桩采用截面边长为 500 mm 的预应力钢筋混凝土方桩；后桩台桩采用截面边长为 500 mm 的预应力钢筋混凝土方桩。码头前桩台结构断面如图 1 所示。

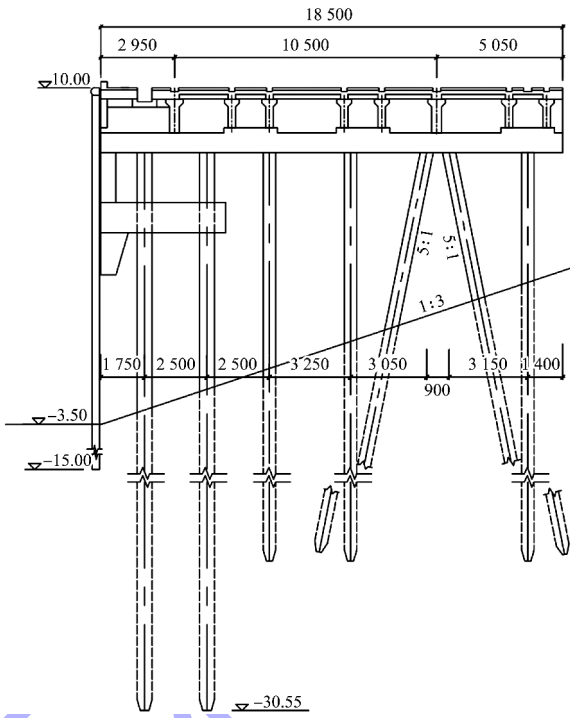


图 1 码头前桩台结构断面（高程：m；尺寸：mm）

2 码头监测预警方案

码头结构安全监测与预警技术路线见图 2。

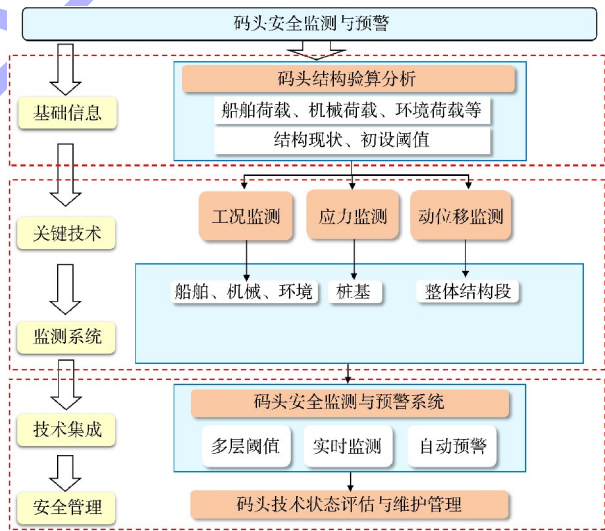


图 2 技术路线

监测系统主要由传感器、数据采集系统、户外机柜及监测软件构成。传感器和采集器之间通过屏蔽信号线连接，各个采集器之间通过交换机同步，由工控机采集数据后通过传输模块传输至因特网。为了实现户外长期运行，交换机、工控机以及无线路由器均存放于现场的防尘防水户外机柜内。平台开发基于 B/S(浏览器/服务器)架构，

实现本地局域网和因特网设备管理及远程监控。
监测系统见图 3。

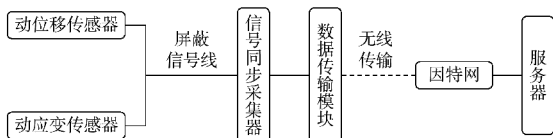
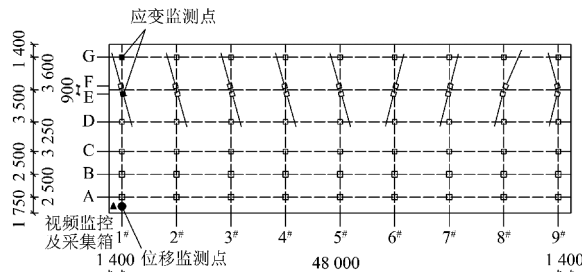


图 3 码头结构安全监测系统

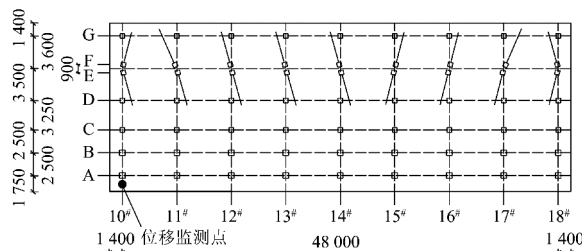
2.1 监测对象、监测指标及监测点布设

根据码头结构的受力特性和重点部位，选择码头前桩台(靠船装卸平台)作为监测对象，着重进行码头前桩台水工结构安全性和适用性监测，监测指标主要包括动应力(应变)、动位移，兼顾结构局部响应监测和结构整体响应监测，达到双重监测的目的。

根据码头结构受力特点，着重考虑船舶撞击力等荷载引起的最不利桩基受力，选择码头前桩台 1 个边排架的 2 根桩(E 和 G 桩)进行动应力(应变)监测，采用表面式应变计，应变计布设在桩顶区域的 4 个侧面；选择码头前桩台 2 个结构段的 2 个前沿角点进行码头横向和纵向动位移监测，采用无源伺服式拾振器配合放大器实现动位移监测，测点布设在 2 个边排架横梁上方位置。经检测，码头实体结构整体基本完好，码头桩基桩身结构完整或基本完整，未见明显缺陷桩；码头整体结构无明显功能性退化，目前仍然保持原设计承载能力，码头结构及主要构件未见承载引起的结构性裂缝和明显变形。通过监测，可实时获得码头桩基的应变和码头结构整体位移，实时判断并预警码头结构安全状况。监测系统布置如图 4 所示。



a) 1#~9#排架



b) 10#~18#排架

图 4 码头监测系统布置 (单位: mm)

2.2 分级预警及阈值确定

不同级别的预警阈值可通过 2 种方法确定：
1) 确定一种结构状态的设计控制值，设定该控制值的不同百分比为不同级别的预警阈值；2) 分别采用不同结构状态的设计控制值作为不同级别的预警阈值。

推荐采用不同结构状态的设计控制值作为不同级别的预警阈值，有利于对每级预警的风险程度有直观的掌握，不同级别预警的处置措施也将更有针对性。预警级别按工程风险由大到小分为：一级、二级和三级告警，预警控制标准见表 1。每级告警对应的应力控制标准和位移控制标准总体接近，应力和位移之一达到告警控制标准即触发告警，充分利用应力和位移监测反映的码头局部技术状态信息和整体技术状态信息，达到双重预警效果。

表 1 预警控制标准

告警级别	应变监测告警控制标准	位移监测告警控制标准
一级	桩基轴向力监测值达到桩基承载力,或者桩基混凝土法向表面拉应力达到混凝土的预压应力与混凝土抗拉强度之和(裂缝控制等级为二级)	位移监测值达到位移限值
二级	桩基轴向力监测值达到桩基轴向力设计值,或者桩基混凝土法向表面拉应力达到混凝土预压应力(裂缝控制等级为一级)	位移监测值达到位移设计值
三级	桩基轴向力监测值达到桩基轴向力设计值的 70%,或者桩基混凝土法向表面拉应力达到混凝土预压应力的 70%	位移监测值达到位移设计值的 70%

按照 JTS 147-7—2022《水运工程桩基设计规范》^[8]计算桩基承载力。按照 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[9]进行码头结构计算,考虑承载力极限状态的荷载效应组合,计算桩基轴向力设计值;考虑正常使用极限状态的荷载组合,进行桩基抗裂验算,并计算码头位移设计值,位移限值则根据码头使用的需要进行控制。

根据 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[10],混凝土构件裂缝控制等级为二级时,构件应满足式(1);混凝土构件裂缝控制等级为一级时,构件应满足式(2)。

$$\sigma_{ek} \leq \sigma_{pc} + \alpha_{et} \gamma f_{tk} \quad (1)$$

$$\sigma_{ek} - \sigma_{pc} \leq 0 \quad (2)$$

式中: σ_{ek} 为混凝土法向拉应力,MPa; σ_{pc} 为混凝土的预压应力,MPa; α_{et} 为混凝土拉应力限制系数; γ 为受拉区混凝土塑性影响系数; f_{tk} 为混凝土的轴心抗拉强度标准值,MPa。

由码头竣工资料可知,码头桩基混凝土预压应力为 3.3 MPa,混凝土强度等级为 C40,其抗拉强度标准值为 2.4 MPa,弹性模量为 32.5 GPa。经计算,码头各级安全预警阈值见表 2。

表 2 码头各级安全预警阈值

告警 级别	桩基拉应变 预警阈值/ 10^{-6}	桩基压应变 预警阈值/ 10^{-6}	位移预警 阈值/mm
一级	157	-284	15
二级	102	-93	10
三级	71	-50	7

3 码头结构动态响应规律及统计分析

船舶在靠泊、离泊时会对码头产生撞击力,门机作业过程中的起吊、摆动、行走等动作均对码头结构产生作用力,船舶荷载和门机作业荷载是引起码头结构水平位移的主要可变荷载。

码头结构在风、浪、流等环境荷载作用下的结构响应一般较小,但在大风天气等极端恶劣条件下,环境荷载对码头结构的作用效应仍然不可忽视。

3.1 环境荷载作用下码头结构响应

统计了在无船舶在泊、码头无作业的情况下,主要由环境荷载引起的近 20 组码头结构动位移和

桩基动应变。统计结果表明,在环境荷载作用下最大位移为 0.1 mm,最大桩基应变为 10^{-6} ,与船舶撞击力和门机作业荷载引起的码头位移和桩基应变相比,可忽略不计。

3.2 门机作业工况下码头结构响应

在码头门机作业过程中,不可避免地会产生较大的码头结构位移响应和应变响应,有时可以明显感受到码头结构的晃动。统计门机作业过程码头结构位移监测数据与应变监测数据,分析门机作业工况下码头结构的响应规律,对优化门机作业工艺、提升操作水平起到技术支撑作用。门机作业时码头结构典型位移时程曲线和桩基应变时程曲线见图 5。可以看出,门机作业时,位移时程曲线与应变时程曲线同步变化,呈正相关性。

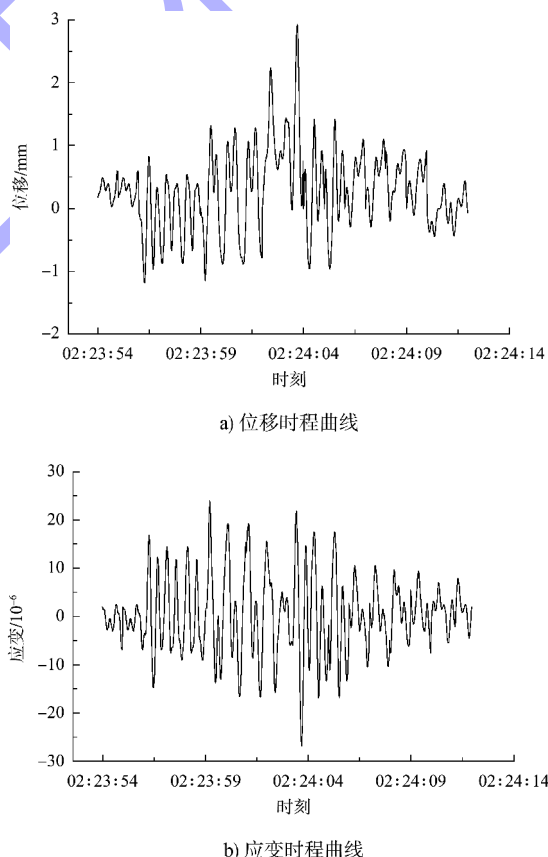


图 5 门机作业时码头结构响应曲线

统计了 2022 年 9—12 月门机作业引起的码头位移和桩基应变共 74 组数据,结果见表 3。可以看出,在此期间门机作业过程中,码头最大位移为 3.6 mm,桩基最大应变为 60×10^{-6} ,监测指标

位移和应变均小于三级告警阈值, 未发生码头结构安全告警; 码头位移响应和应变响应呈正相关性, 门机作业位置距离边排架较近时, 码头结构位移响应值和桩基应变响应值较大。

表 3 门机作业引起的码头结构响应监测结果

日期	最大位移 监测值/mm	最大应变 监测值/ 10^{-6}	门机所在 排架位置	日期	最大位移 监测值/mm	最大应变 监测值/ 10^{-6}	门机所在 排架位置
2022-09-02	1.0	13	3 [#] ~5 [#]	2022-11-06	-1.5	-23	3 [#] ~5 [#]
2022-09-04	1.1	11	4 [#] ~6 [#]	2022-11-08	1.1	-17	4 [#] ~6 [#]
2022-09-06	-0.9	8	4 [#] ~6 [#]	2022-11-10	-1.5	12	3 [#] ~5 [#]
2022-09-08	-1.4	16	4 [#] ~6 [#]	2022-11-17	-1.2	13	4 [#] ~6 [#]
2022-09-10	1.1	-13	4 [#] ~6 [#]	2022-11-19	-1.1	-12	3 [#] ~5 [#]
2022-09-12	-1.5	-14	4 [#] ~6 [#]	2022-11-21	-2.8	-26	3 [#] ~5 [#]
2022-09-13	1.3	17	4 [#] ~6 [#]	2022-11-23	1.2	-12	4 [#] ~6 [#]
2022-09-14	1.1	10	4 [#] ~6 [#]	2022-11-24	1.2	-13	4 [#] ~6 [#]
2022-09-15	-1.5	17	3 [#] ~5 [#]	2022-11-26	1.3	15	4 [#] ~6 [#]
2022-09-16	-1.3	13	4 [#] ~6 [#]	2022-11-27	-2.4	27	3 [#] ~5 [#]
2022-09-17	2.6	15	3 [#] ~5 [#]	2022-11-28	1.5	15	3 [#] ~5 [#]
2022-09-18	-2.8	5	3 [#] ~5 [#]	2022-11-29	-1.3	22	3 [#] ~5 [#]
2022-09-20	-1.4	18	3 [#] ~5 [#]	2022-12-02	-1.6	24	3 [#] ~5 [#]
2022-09-21	1.2	-13	4 [#] ~6 [#]	2022-12-03	1.3	-18	3 [#] ~5 [#]
2022-09-23	1.4	-21	3 [#] ~5 [#]	2022-12-04	1.6	17	3 [#] ~5 [#]
2022-09-25	-1.6	20	3 [#] ~5 [#]	2022-12-05	-1.7	26	3 [#] ~5 [#]
2022-10-08	-1.0	14	4 [#] ~6 [#]	2022-12-07	-1.2	17	4 [#] ~6 [#]
2022-10-10	-2.0	19	3 [#] ~5 [#]	2022-12-08	-1.6	20	3 [#] ~5 [#]
2022-10-12	-1.0	8	4 [#] ~6 [#]	2022-12-09	0.9	11	4 [#] ~6 [#]
2022-10-13	1.4	-15	4 [#] ~6 [#]	2022-12-10	1.2	13	4 [#] ~6 [#]
2022-10-15	-1.2	9	4 [#] ~6 [#]	2022-12-11	-2.6	53	3 [#] ~5 [#]
2022-10-16	1.0	9	4 [#] ~6 [#]	2022-12-11	-2.8	56	3 [#] ~5 [#]
2022-10-17	1.0	-13	4 [#] ~6 [#]	2022-12-13	-1.6	11	3 [#] ~5 [#]
2022-10-19	1.4	16	4 [#] ~6 [#]	2022-12-14	1.3	13	4 [#] ~6 [#]
2022-10-20	1.4	-15	4 [#] ~6 [#]	2022-12-15	-1.6	53	3 [#] ~5 [#]
2022-10-21	-1.6	18	3 [#] ~5 [#]	2022-12-16	-1.8	51	3 [#] ~5 [#]
2022-10-23	-2.0	15	3 [#] ~5 [#]	2022-12-17	-1.5	22	3 [#] ~5 [#]
2022-10-24	1.7	20	3 [#] ~5 [#]	2022-12-18	1.5	-14	3 [#] ~5 [#]
2022-10-25	-2.0	18	3 [#] ~5 [#]	2022-12-19	1.3	12	4 [#] ~6 [#]
2022-10-26	-1.2	14	4 [#] ~6 [#]	2022-12-23	-1.8	18	3 [#] ~5 [#]
2022-10-27	1.0	14	4 [#] ~6 [#]	2022-12-24	1.8	19	3 [#] ~5 [#]
2022-10-29	-1.5	-18	3 [#] ~5 [#]	2022-12-25	-1.1	17	4 [#] ~6 [#]
2022-10-30	-1.7	-25	3 [#] ~5 [#]	2022-12-27	-2.4	56	3 [#] ~5 [#]
2022-10-31	-1.0	-12	4 [#] ~6 [#]	2022-12-28	-1.7	52	3 [#] ~5 [#]
2022-11-03	-1.1	13	4 [#] ~6 [#]	2022-12-28	3.6	52	3 [#] ~5 [#]
2022-11-04	-1.0	17	4 [#] ~6 [#]	2022-12-29	-2.5	60	3 [#] ~5 [#]
2022-11-05	-1.2	13	4 [#] ~6 [#]	2022-12-31	1.9	18	3 [#] ~5 [#]

3.3 船舶撞击工况下码头结构响应

在船舶靠泊、离泊过程中, 不可避免地会对码头产生撞击。统计船舶靠泊、离泊过程中码头结构位移监测数据与应变监测数据, 分析船舶撞

击力作用下码头结构的响应规律, 可为评估和优化船舶靠离泊方案提供基础数据。船舶撞击时的码头结构典型位移时程曲线和桩基应变时程曲线见图 6。

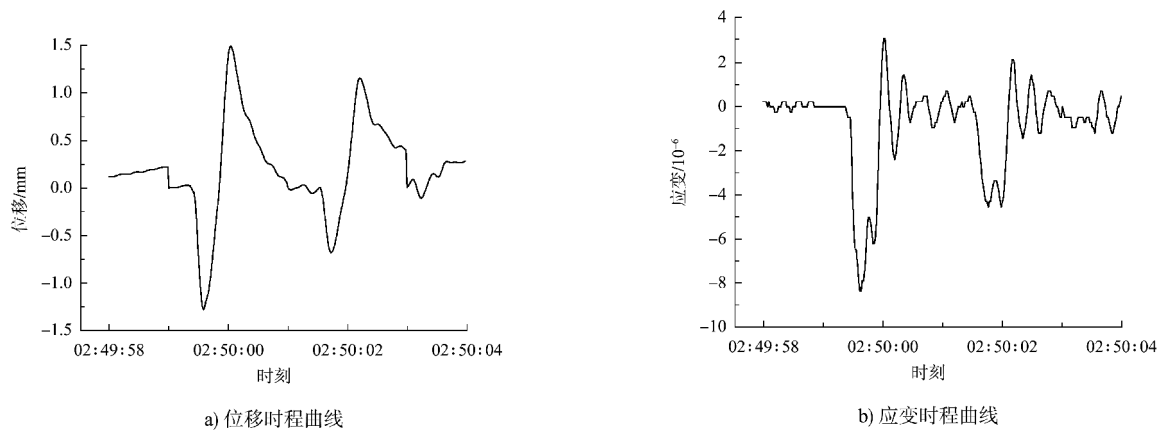


图 6 船舶撞击时码头结构响应曲线

统计了 2022 年 9—12 月船舶撞击所引起的码头位移和桩基应变共 32 组数据，结果见表 4。可以看出，在此期间船舶靠离泊过程中，码头最大位移为 5.7 mm，桩基最大应变为 92×10^{-6} ，发生 5 次三级告警，未发生二级和一级告警。

表 4 船舶撞击引起的码头结构响应监测结果

日期	最大位移 监测值/mm	最大应变 监测值/ 10^{-6}	门机所在 排架位置	日期	最大位移 监测值/mm	最大应变 监测值/ 10^{-6}	门机所在 排架位置
2022-09-14	-5.7	-92	1 [#]	2022-11-22	-4.0	92	1 [#]
2022-10-22	-0.7	3	13 [#]	2022-11-23	1.6	1	13 [#]
2022-10-23	-0.8	11	1 [#]	2022-11-25	0.9	11	1 [#]
2022-10-27	0.6	-4	1 [#]	2022-11-27	-1.1	11	1 [#]
2022-10-28	0.9	11	1 [#]	2022-11-28	1.2	-10	1 [#]
2022-10-29	-0.6	8	1 [#]	2022-12-04	-0.6	7	1 [#]
2022-10-30	1.1	15	1 [#]	2022-12-05	1.1	-14	1 [#]
2022-10-30	0.9	3	13 [#]	2022-12-11	1.1	15	1 [#]
2022-11-04	-0.8	-9	1 [#]	2022-12-11	-0.9	13	1 [#]
2022-11-04	-0.6	10	1 [#]	2022-12-12	-2.3	73	1 [#]
2022-11-05	-2.0	53	1 [#]	2022-12-12	-1.1	13	1 [#]
2022-11-08	-0.8	8	1 [#]	2022-12-13	0.6	4	13 [#]
2022-11-09	-2.8	57	1 [#]	2022-12-15	-2.2	29	1 [#]
2022-11-11	0.5	3	13 [#]	2022-12-18	-1.7	13	1 [#]
2022-11-13	1.8	-12	1 [#]	2022-12-26	2.5	71	1 [#]
2022-11-20	2.8	91	1 [#]	2022-12-31	-1.2	19	1 [#]

4 告警分析及应对措施

4.1 监测预警结果分析

2022 年 9—12 月监测期间，触发安全告警的统计结果见表 5。

表 5 触发安全告警的情况

日期	工况	最大位移 监测值/mm	最大应变 监测值/ 10^{-6}	告警
2022-09-14	船舶离泊	-5.7	-92	三级
2022-11-20	船舶离泊	2.8	91	三级
2022-11-22	船舶离泊	-4.0	92	三级
2022-12-12	船舶离泊	-2.3	73	三级
2022-12-26	船舶靠泊	2.5	71	三级

由表 3~5 的监测结果可见：1) 监测到的桩基最大应变为 92×10^{-6} ，结构最大位移为 5.7 mm。2) 码头在此期间运行过程中，共触发了 5 次码头结构安全三级告警，均是由船舶靠离泊过程中撞击码头引起的，未发生码头结构安全二级和一级告警，码头结构技术状态处于设计使用状态范围内；此时应加强码头监测分析，关注码头环境、荷载情况，加强码头巡查。3) 码头结构具有足够的承载能力，码头变位变形在设计允许范围内，码头结构安全性符合国家有关标准要求。

4.2 告警应对措施

进行码头结构安全预警的目的是为了在码头结构出现安全风险时能够及时预警,及时采取行之有效的应对措施,保证码头结构安全使用。

结合每级预警阈值对应的风险程度,在确保安全的前提下兼顾生产管理,针对不同告警级别,建议处置措施为:1)三级告警时,加强码头监测分析,关注码头环境、荷载情况,加强码头巡查;码头可正常装卸作业,新到港船舶可正常靠泊码头。2)二级告警时,加强码头监测分析,密切关注码头环境、荷载情况,对码头结构进行专项检查;码头可正常装卸作业,暂停新到港船舶靠泊码头,若检查码头结构无损伤则可恢复正常靠泊。3)一级告警时,加强码头监测分析,对码头结构安全性进行专项检测评估,查明告警原因,提出处置或预防措施;码头暂停装卸作业,暂停新到港船舶靠泊码头,待码头结构专项检测评估后,再决定能否恢复正常作业和靠泊。

5 结论

1) 本文建立高桩码头结构安全监测预警模型,提出结构状态的设计控制值作为预警阈值,分级预警,并针对不同级别的预警提出了相应处置措施。预警阈值有利于直观理解不同预警级别所对应的风险程度,使得不同级别预警的处置措施更具针对性。应用该模型的码头监测预警工程实践结果表明,安全预警阈值的设置及安全告警的应对措施科学有效,可供类似结构安全监测预警工程参考使用。

2) 通过码头现场实时监测,获得了码头在可变荷载作用下的水平位移和桩基应变,监测数据可为评估码头技术状态提供重要数据支撑。

3) 对于高桩梁板式码头,船舶撞击力是码头水平位移和桩基内力的主要控制荷载之一,门机在起吊作业、纵向行走的启动和制动等过程中能够引起较大码头水平位移,码头结构在风、浪、流等环境荷载作用下的结构响应一般较小,但在台风等极端恶劣条件下,环境荷载对码头结构的作用效应仍然不可忽视。

参考文献:

- [1] 栗凤进.高桩码头健康监测系统中桩基应变监测位置的选择与实施[J].中国水运(下半月),2017,17(12):165-167.
- [2] 黄长虹,韦灼彬.海港码头结构健康监测[J].水运工程,2009(4):106-109.
- [3] 王承强,陈忠华,贾宇,等.离岸码头结构无基准动态位移测试技术[J].水运工程,2021(1):48-55.
- [4] 黄浩华,杨学山,黄振平.891型测振仪:无源伺服技术的应用[J].地震工程与工程振动,1991(3):94-101.
- [5] 匙庆磊,杨学山,尚帅锟.无源伺服反馈多输出低频振动传感器[J].仪器仪表学报,2017,38(1):105-111.
- [6] 李瑞刚,朱明友.高桩码头应变监测与结果分析[J].水运工程,2021(10):236-240.
- [7] 葛浩,黄坤耀,朱鹏宇.高桩码头在船舶撞击力作用下的应变监测研究[J].水运工程,2015(1):63-69.
- [8] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司.水运工程桩基设计规范:JTS 147-7—2022[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2022.
- [9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司,中交第三航务工程勘察设计院有限公司,中交第四航务工程局有限公司.码头结构设计规范:JTS 167—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [10] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程混凝土结构设计规范:JTS 151—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

(本文编辑 王璁)