

· 港口 ·



## 基于无基准动态位移监测的 江苏某高桩码头变位特征与安全预警\*

王承强<sup>1,3</sup>, 贾宇<sup>1,3</sup>, 王臣<sup>2</sup>, 王恩准<sup>1,3</sup>, 刘志浩<sup>1,3</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;  
3. 水文水资源和水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 高桩码头服役环境复杂, 船舶与门机等可变荷载作用下结构变位安全问题突出。然而, 高桩码头通常不具备参照基准, 且在离岸严苛条件下服役是常态, 动态位移监测成为挑战。采用码头无基准动态位移监测技术, 对江苏某高桩码头进行实时位移监测。详细分析门机作业和船舶撞击条件下码头位移响应规律, 基于码头适用性、安全性提出该码头的两级预警指标。结合数值仿真计算, 提出该码头不同吨级船舶靠泊建议。研究表明: 门机的作业位置是影响码头位移响应大小的直接因素。码头第一结构段在船舶撞击作用下, 因引桥等边界条件的影响, 导致 $A_2$ 监测点的位移响应在 $X$ 、 $Y$ 方向上均较大。一级预警指标由码头主要荷载作用组合的最大值推算, 位移响应值为15.39 mm。二级预警指标由混凝土抗拉极限应力值为评判标准, 位移响应值为19.14 mm。相应地, 1万吨级船舶靠泊时法向速度不应超过0.19 m/s, 5 000吨级船舶靠泊时法向速度不应超过0.22 m/s。

**关键词:** 高桩码头; 动态位移; 船舶撞击; 门机荷载; 安全预警

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0035-08

### Displacement characteristics and safety warning of a high pile wharf in Jiangsu Province based on dynamic displacement monitoring without reference

WANG Chengqiang<sup>1,3</sup>, JIA Yu<sup>1,3</sup>, WANG Chen<sup>2</sup>, WANG Enzhun<sup>1,3</sup>, LIU Zhihao<sup>1,3</sup>

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

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The service environment of high-pile terminals is complex, and the safety problem of structural displacement under variable loads such as ships and portal cranes is prominent. However, dynamic displacement monitoring is a challenge when high-pile terminals often do not have a reference frame and service is the norm in harsh offshore conditions. In this paper, the dynamic displacement monitoring technology without reference is used to monitor the real-time displacement of a high-pile terminal in Jiangsu. The displacement response law of the terminal under the condition of portal crane operation and ship impact is analyzed in detail, and a two-level early warning index of the terminal is proposed based on the applicability and safety of the terminal. Combined with numerical simulation calculation, the berthing suggestions of ships of different tonnage of the terminal are proposed. It is concluded that the operating position of the portal crane is a direct factor affecting the displacement response of the terminal. Under the influence of ship impact, the displacement response of  $A_2$  monitoring point is large in the  $X$  and  $Y$  directions due to the influence of boundary conditions such as approach bridges. The first-level early warning index is calculated

收稿日期: 2023-06-14

\*基金项目: 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, 正高级工程师, 研究方向为水工结构病害诊断。

from the maximum value of the main load action combination of the terminal, and the displacement response value is 15.39 mm; The secondary warning index is judged by the tensile limit stress value of concrete, and the displacement response value is 19.14 mm. The normal speed of 10,000-ton ships should not exceed 0.19 m/s when berthing, and the normal speed of 5,000-ton ships should not exceed 0.22 m/s when berthing.

**Keywords:** high pile wharf; dynamic displacement; ship impact; portal crane load; safety warning

高桩码头作为货物流通的重要转运平台,其结构安全对区域经济发展至关重要,及时地掌握码头结构的健康状况是保障港口安全的关键<sup>[1]</sup>。除环境荷载之外,高桩码头还承受船舶荷载、机械荷载等可变荷载作用,结构存在从高频到低频、从动态到准静态的不同类型动态位移响应,这对监测设备和分析方法提出了新要求。高桩码头高效运行与苛刻服役环境,加剧了工程风险。通过服役全过程监测码头变位,可第一时间发现结构灾变,及早指导加固处置,避免工程事故。

目前码头位移监测主要集中在静态位移观测,通常采用大地测量、GPS、光纤监测等技术<sup>[2]</sup>。光学仪器观测<sup>[3-4]</sup>和光纤监测<sup>[5-6]</sup>要建立基准点,采用相对位移测量方法。而对于离岸深水码头,难以在码头观测点与岸上基准点或工作基点之间建立起有效的观测网。GPS 测量<sup>[7-8]</sup>针对结构静态变位,观测时间不宜少于 30 min,测点附近不宜有障碍物和电磁辐射源。因此,以上监测方法不适用于高桩码头动态变位测试。

无基准动态位移测试技术基于无源伺服振动传感器<sup>[9-10]</sup>与综合数据分析系统,针对高桩码头变位实时监测具有良好的适用性<sup>[11]</sup>。无源伺服振动传感器采用惯导系统,属于动圈往复式拾振器。由于结构变位过程中同时具有速度和加速度,动圈往复式拾振器可通过此信号计算得到变位位移<sup>[12]</sup>。

研究位于江苏镇江港某重件码头,综合码头结构无基准动态位移远程监测与现场视频监控设备,形成了可变荷载作用下码头结构动态位移无基准监测成套系统。采集码头在门机与船舶靠泊

作用下的动态位移数据,对典型工况下的位移响应规律进行分析。提出码头两级预警指标,结合有限元仿真技术模拟船舶靠泊时结构动力响应,为现场靠泊作业要求提供建议。

## 1 工程概况

江苏镇江港某重件码头建设 2 个 5 000 吨级(水工结构兼靠 1 万吨级)泊位,结构采用高桩梁板式。码头长 249.4 m、宽 20 m、排架间距 9 m,共 27 榀排架。上部采用现浇横梁、预制纵梁、预制面板结构,桩基采用  $\phi 800$  mm PHC B 型管桩,桩长 38 m。码头上游 19.1 m 处设置系缆墩,结构形式为高桩墩台。系缆墩长 4.5 m、宽 6.0 m、厚 2.5 m;采用  $\phi 900$  mm( $\delta=16$ )钢管桩,桩长 40 m。码头结构剖面见图 1。

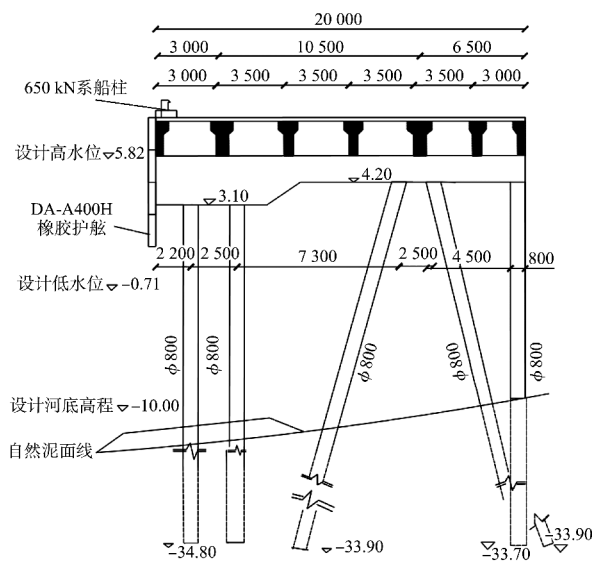


图 1 码头结构剖面(尺寸: mm; 高程: m)

现场监测系统布设有 3 处位移监测点、1 处视频监控点和 1 处数据采集点。每处监测点布设 2 个位移传感器,分别为平行于码头长度方向(X 方向)

和垂直于码头长度方向( $Y$ 方向),监测系统布置见图2。

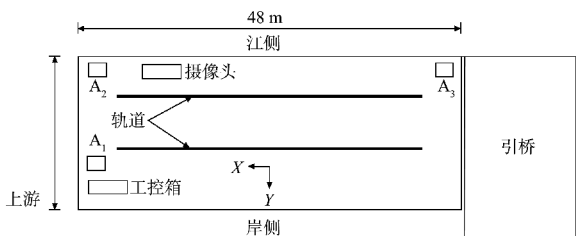


图2 码头监测系统布置

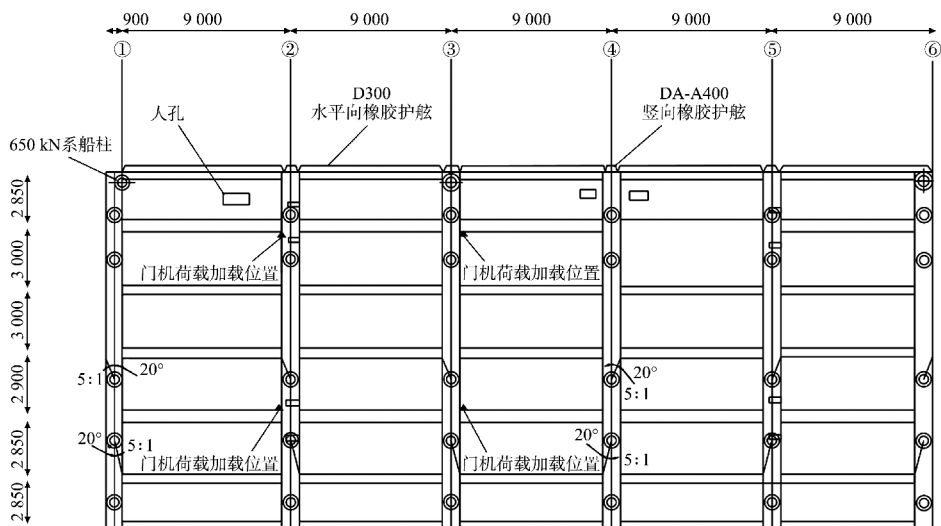


图3 门机荷载作用位置(单位: mm)

表1 门机作业位移响应

测点	各监测点位移值/mm		
	1 <sup>#</sup> ~3 <sup>#</sup> 排架	2 <sup>#</sup> ~4 <sup>#</sup> 排架	3 <sup>#</sup> ~5 <sup>#</sup> 排架
$A_{1,X}$	0.32	0.33	0.41
$A_{1,Y}$	1.71	1.34	1.18
$A_{2,X}$	0.53	0.44	0.56
$A_{2,Y}$	3.18	1.82	0.63
$A_{3,X}$	0.51	0.83	0.61
$A_{3,Y}$	0.21	0.64	0.98

由表1可知,码头平台 $X$ 方向的位移值均较小,且不超过1 mm,码头 $X$ 方向晃动基本处于无感状态。由于 $A_3$ 处 $Y$ 方向的位移响应规律比 $A_2$ 处 $Y$ 方向弱,因此选取 $A_{2,Y}$ 处的位移幅值为代表值,对门机作业影响进行统计。

根据门机作业时的位移时程曲线与现场视频照片,对 $A_{2,Y}$ 处最大位移值筛选统计375组,时间分布于5—7月中旬的各个时段。统计规律为:门机在

## 2 码头动态位移规律统计分析

### 2.1 门机作业工况下码头位移响应规律

传感器在门机作用下输出的位移响应信号呈现出连续的正/余弦信号,并且响应幅值明显大于环境荷载产生的幅值。

试验中统计门机在不同位置作业时,3个测点处传感器的位移响应数据。门机荷载作用位置见图3,门机作业时各测点的位移值见表1。

1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>排架处作业时,产生的位移分别为3~5 mm和2~3 mm,数据出现频次对应为23和103次;在2<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>排架作业时,产生的位移为1~2 mm,出现频次为114次;在3<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>排架作业时,产生的位移在1 mm以下,出现频次为135次。统计结果与现场门机作业习惯基本相似。统计位移频次分布见图4。

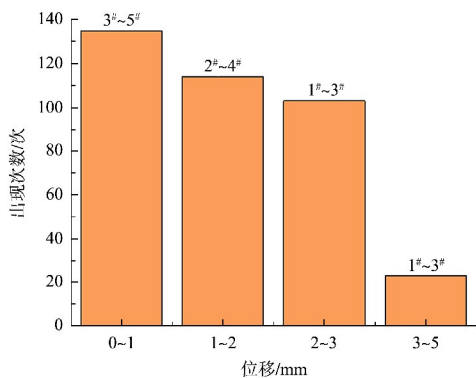


图4 门机作业位移响应分布

## 2.2 船舶撞击工况下码头位移响应规律

统计码头在不同船舶撞击作用下的各监测点的位移响应,为码头模型仿真提供数据。环境荷载对码头的位移作用很小,且船舶靠泊时,门机未作业,因此船舶靠泊时对码头的位移作用可近似看成由船舶撞击力产生。船舶撞击过程也通过视频进行监控,选取船舶撞击时的传感器位移时程响应进行数据分析。

统计过程中选取 6 组典型工况,获取不同撞击力产生位移值,将  $A_{2,x}$  和  $A_{2,y}$  作为代表值进行统计,其 6 组典型工况见表 2。

表 2 船舶撞击信息统计

工况	时间	船名	法向靠泊速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	排水吨位/ t	撞击位置
1	9月18日	中源 5656	0.09	7 500	1#排架
2	1月3日	皖江联 1547	0.18	5 000	1#排架
3	9月18日	中源 5656	0.27	4 500	1#排架
4	9月19日	宇环 11	0.13	6 500	1#排架
5	9月19日	翔运 1566	0.18	3 800	1#排架
6	9月21日	水阳江 20686	0.16	5 800	1#和 2#排架

由 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》<sup>[13]</sup>可知:船舶靠岸时撞击力标准值应根据船舶撞击的有效能量、橡胶护舷性能曲线和靠船结构的刚度确定。

船舶撞击时的有效撞击能量  $E_0$  可按下式计算:

$$E_0 = \frac{\rho}{2} m v_n^2 \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为船舶靠岸时的有效撞击能量, kJ;  $\rho$  为有效动能系数,取 0.7~0.8;  $m$  为船舶质量(按设计船型满载排水量计算), t;  $v_n$  为船舶靠岸法向速度, m/s。

高桩码头可看做具有一定柔度的结构,受船舶撞击后,变形不可忽略。根据功能转化原理,船舶有效靠泊动能为平台、护舷、船体 3 部分吸收能量之和:

$$E_0 = nE_f + \frac{1}{2}k_s\Delta_s^2 + \frac{1}{2}k_d\Delta_d^2 \quad (2)$$

式中:  $E_f$  为单个护舷吸收的能量, kJ;  $n$  为船舶撞

击时接触的护舷数量;  $k_s$ 、 $k_d$  为船舶和平台的弹性系数, kN/m;  $\Delta_s$ 、 $\Delta_d$  为船体和平台的变形, m。

根据弹性变形理论,船舶撞击力  $F_x$  可表示为:

$$F_x = nF_f = k_s\Delta_s = k_d\Delta_d \quad (3)$$

式中:  $F_x$  为船舶靠泊撞击力, kN;  $F_f$  为护舷反力, kN。

综上所述可得:

$$E_0 = nE_f + \frac{n^2 F_f^2}{2k_s} + \frac{n^2 F_f^2}{2k_d} \quad (4)$$

根据《海港工程设计手册》中各类护舷的性能计算护舷反力,即船舶撞击力。经计算 6 组典型工况中的船舶撞击力结果见表 3。

表 3 船舶撞击力

工况	撞击力/ kN	位移/mm		撞击位置
		$A_{2,x}$	$A_{2,y}$	
1	190	1.13	2.89	1#排架
2	947	3.53	10.39	1#排架
3	1 180	7.49	14.92	1#排架
4	342	1.44	3.32	1#排架
5	600	3.15	7.10	1#排架
6	463	2.33	3.89	1#和 2#排架

将计算得到的撞击力与位移对比发现,当船舶撞击在 1#排架,撞击力约为 1 200 kN 时,  $A_{2,y}$  的位移约为 15 mm,此时位移最大;撞击力为 600 kN 时,  $A_{2,y}$  的位移约为 7 mm;撞击力为 450 kN 时,  $A_{2,y}$  位移约为 4 mm;撞击力为 947 kN 时,  $A_{2,y}$  位移约为 11 mm。由于码头结构的原因,船舶靠泊撞击使 1#排架产生了较大位移。

在此基础上选取  $A_2$  监测点处的位移作为船舶撞击时码头位移响应的代表值。对 5—9 月所采集的数据进行统计,结果见表 4。

表 4 船舶撞击位移值统计

序号	日期	作用周期/s	位移/mm	
			$A_{2,x}$	$A_{2,y}$
1	5月13日	4.0	3.92	7.10
2	5月18日	1.8	0.43	1.82
3	5月22日	1.5	1.69	3.94
4	5月26日	1.0	1.39	5.00
5	5月29日	2.0	1.88	7.17

续表4

序号	日期	作用 周期/s	位移/mm	
			$A_{2,x}$	$A_{2,y}$
6	5月30日	1.5	4.50	13.14
7	6月05日	2.0	2.83	8.96
8	6月07日	3.0	4.47	11.59
9	6月07日	1.5	2.85	8.84
10	6月07日	1.5	1.26	4.04
11	6月11日	2.0	2.48	7.17
12	6月18日	2.5	0.76	2.41
13	6月19日	3.0	0.58	2.09
14	6月20日	2.0	1.82	5.08
15	6月22日	3.0	1.40	2.55
16	6月23日	1.5	0.49	1.30
17	6月25日	1.5	1.25	4.50
18	6月25日	4.0	0.42	0.99
19	6月28日	4.0	0.86	1.87
20	6月30日	3.0	1.80	5.41
21	7月05日	2.0	4.14	8.91
22	7月05日	1.8	0.55	1.46
23	7月08日	4.0	0.46	2.17
24	7月09日	3.0	0.33	1.21
25	7月09日	1.8	0.31	1.18
26	7月11日	4.0	2.29	7.31
27	8月04日	1.0	2.18	7.80
28	8月09日	3.0	3.90	10.53
29	9月18日	1.0	7.49	15.92
30	9月18日	1.5	1.13	2.89
31	9月18日	2.0	0.77	2.16
32	9月19日	1.5	1.69	4.01
33	9月19日	3.0	1.44	3.32
34	9月19日	3.5	1.63	3.20
35	9月21日	1.5	2.33	3.89

注:表中周期与位移已经过溯源处理。

将表4统计结果绘制成图5,分析可知,船舶撞击1#排架时,1万吨级半载状态产生的位移响应约为10~15 mm,共出现4次;5 000吨级产生的位移响应较大,约为7~10 mm,共出现7次;5 000吨级船舶规范靠泊时产生的位移响应为3~7 mm,共出现10次。3 mm以下的位移数据多为船舶靠泊时撞击2#~4#排架时所产生。船舶撞击对码头产生的位移响应最大值分别为:7.49 mm( $X$ 方向)、15.92 mm( $Y$ 方向)。 $Y$ 方向上 $A_2$ 测点位移响应幅值与出现频次见图6。

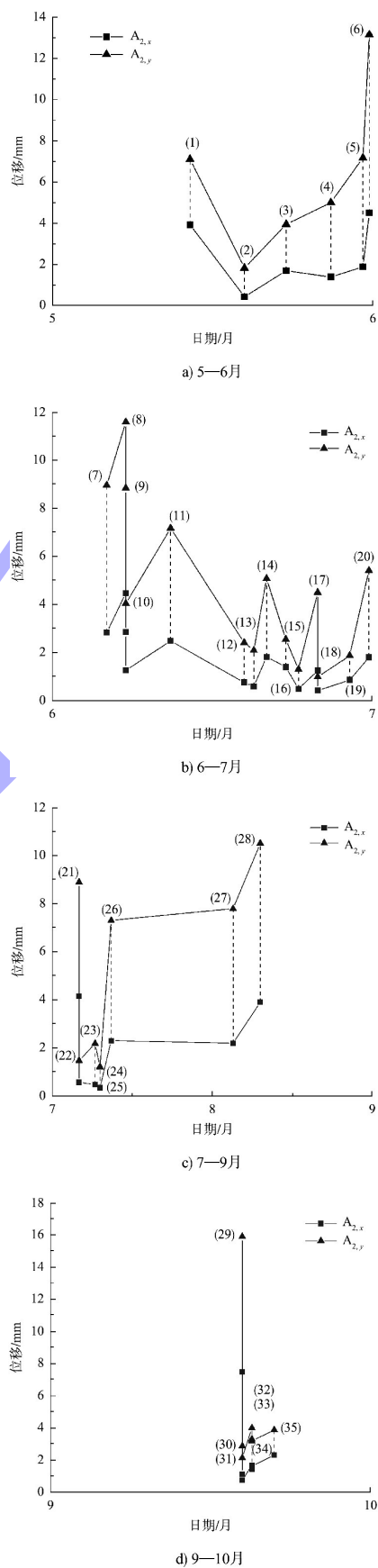


图5 船舶撞击位移统计



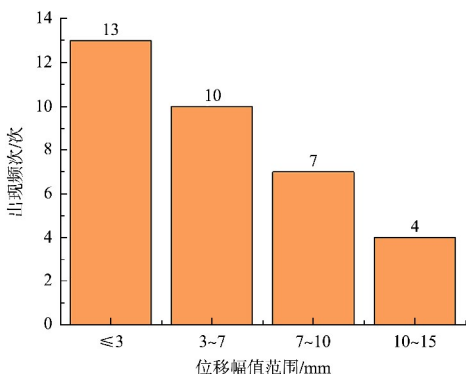


图 6  $A_{2,y}$  测点上船舶撞击频次分布

### 3 高桩码头动态位移数值仿真研究

#### 3.1 建立有限元模型

根据码头的实际结构进行有限元建模，其面板、横梁与纵梁均采用 C30 混凝土，基桩采用 C80 混凝土。码头结构共 6 榀排架，基桩有限元模型依据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》<sup>[14]</sup> 中的假想嵌固点法进行固接。混凝土弹性与塑性参数设定参照表 5，张劲等<sup>[15]</sup> 已验证参数。依据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》<sup>[16]</sup> 和 JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》<sup>[17]</sup> 规定，建筑结构的阻尼比通常取 0.05。模型采用 C3D8R 单元，网格形式为结构网格。

表 5 混凝土模型参数

混凝土类型	泊松比	弹性模量/GPa	膨胀角度/(°)	偏心率	黏性参数	$k$	$f_{bo}/f_{ca}$
C30	0.2	30	30	0.1	0.000 5	0.666 7	1.16
C80	0.2	38	30	0.1	0.000 5	0.666 7	1.16

#### 3.2 高桩码头模型相似性验证

高桩码头的相似性验证主要为门机、船舶荷载作用下的码头实际位移响应与有限元模拟计算之间的对比。首先进行门机荷载作用下的码头模型相似性验证，然后将门机竖向荷载作为轨道荷载加载至船舶撞击过程的相似性验证过程中。

##### 3.2.1 门机作业下的模型相似性验证

码头现场门机信息见表 6，门机吊臂位置见图 7。

门机荷载根据《港口工程荷载规范》规定进行计算。由表 1 和图 4 统计可知，门机在 1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>排架

作业时， $A_{2,y}$  的位移响应幅值最大。

表 6 门机信息

门机类型	支腿轮数/个	轨距/m	基距/m	轮压/kN
Mh-25-30	6	10.5	10.5	250

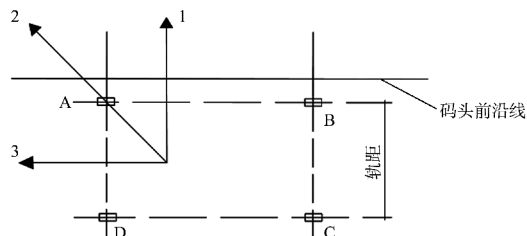


图 7 吊臂位置

门机作业时，吊臂的位置在 1<sup>#</sup>与 2<sup>#</sup>吊臂之间进行往复作业。因此对吊臂处于 1<sup>#</sup>与 2<sup>#</sup>位置时，有限元模拟计算水平荷载，结果见表 7。

表 7 门机作业  $A_{2,y}$  计算位移幅值

支腿位置 吊臂位置	$A_{2,y}$ 位移/mm	
	吊臂 1 位置	吊臂 2 位置
1 <sup>#</sup> ~2 <sup>#</sup> 排架	4.40	4.83
2 <sup>#</sup> ~3 <sup>#</sup> 排架	2.74	2.71
3 <sup>#</sup> ~4 <sup>#</sup> 排架	0.47	0.45

对比表 7 与图 4 可知，仿真与统计规律相似，即越靠近 1<sup>#</sup>排架，码头的位移响应越大，可以反映码头的实际运行状态。

##### 3.2.2 船舶撞击下的模型相似性验证

船舶靠泊撞击时存在冲击荷载，一般为半正弦曲线<sup>[18]</sup>，冲击荷载的时程曲线见图 8。

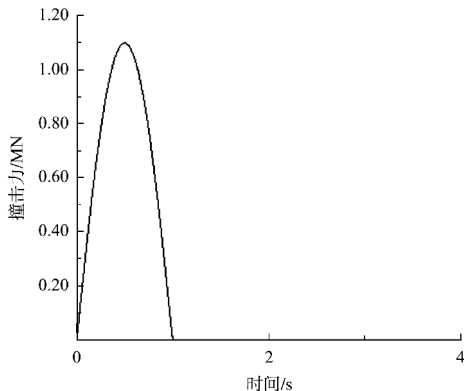


图 8 撞击荷载时程曲线

结合现场统计情况对冲击荷载进行模拟，撞击位置、撞击力周期与撞击力大小均按表 2、3 的

船舶撞击信息进行施加。撞击力设置为 470、600、950 kN 共 3 种工况,门机的竖向荷载均加载至 4#~5#排架。将有限元模拟与现场 3 处传感器监测的时程曲线对比,结果见表 8。

表 8 监测值与计算值对比

传感器 编号	470 kN 工况		600 kN 工况		950 kN 工况		3 种工况下各测点的 平均误差/mm
	监测值/mm	计算值/mm	监测值/mm	计算值/mm	监测值/mm	计算值/mm	
A <sub>1,X</sub>	0.32	0.52	0.14	0.78	0.70	1.25	0.46
A <sub>1,Y</sub>	3.82	3.89	6.24	7.17	10.99	11.65	0.55
A <sub>2,X</sub>	1.22	1.68	1.81	3.27	3.77	5.24	1.13
A <sub>2,Y</sub>	3.88	3.97	6.56	7.17	11.20	11.59	0.36
A <sub>3,X</sub>	1.28	1.92	2.31	3.41	3.84	5.38	1.09
A <sub>3,Y</sub>	0.38	0.32	0.10	0.60	1.17	0.81	0.31

由表 8 可知,模拟情况与船舶撞击时各监测点的位移响应规律相符。A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 监测点的 Y 方向位移响应较大,A<sub>3</sub> 监测点的 Y 方向位移较小;A<sub>1</sub> 点的 X 方向位移响应最小。模拟的 3 组工况来看,第 1 组工况最大误差存在 A<sub>3,X</sub> 处,误差为 0.64 mm;第 2 组工况 X 方向上的最大误差为 1.46 mm,Y 方向上的最大误差为 0.93 mm;第 3 组工况 X 方向上的最大误差为 1.54 mm,Y 方向上的最大误差为 0.66 mm。3 组工况下各测点的最大平均误差为 1.13 mm。

4 基于动态位移的高桩码头风险预警

完成高桩码头有限元模型相似性验证后,依据 JTS 304—2019《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》<sup>[19]</sup> 中码头适用性、安全性评估提出了码头风险两级预警指标。将正常使用极限状态下码头位移设计值作为一级预警指标,以及将承载能力极限状态下码头位移设计值作为二级预警指标。通过有限元计算码头位移监测预警指标,为码头安全运营监测提供参考依据。进行码头变位监测时,依据码头变位的实时监测值,围绕码头适用性进行一级预警判断;当监测值达到或超出一级预警值时进行一级预警,并围绕码头安全性进行二级预警判断;当监测值达到或超出二级预警值时进行二级预警。

4.1 基于码头适用性的位移预警指标

该码头为 5 000 吨级兼 1 万吨级靠泊的设计结构,计算 1 万吨级船舶在规范靠泊时对码头产生的最大位移响应。5 000 吨级船舶与 1 万吨级

船舶参考《海港总体设计规范》附录 A 散货船设计船型尺度,并取最大载重吨数,满载排水吨位按《港口工程荷载规范》附录 H 进行取值,法向靠泊速度均按规范中相应排水吨位的最大值取值,见表 9。

表 9 船舶信息

船舶 类型	载重 吨数/万 t	排水量/ 万 t	法向靠泊 速度/(m·s <sup>-1</sup> )
5 000 吨级	0.75	1.00	0.17
1 万吨级	1.25	1.71	0.15

按照船舶撞击力计算公式展开计算,1 万吨级船舶按规范靠泊时最大的撞击力为 1 200 kN。在主要作用效应组合中,轨道荷载随门机位置而变化。为明确门机在不同位置处停放时对船舶撞击下码头位移的影响,模拟了门机在不同位置处,1 200 kN 撞击码头 1#排架时,A<sub>2,Y</sub> 监测点的位移响应。结果见表 10。

表 10 船舶撞击时门机不同位置的 A2 监测点位移计算

门机竖向 荷载加载位置	位移/mm	
	A <sub>2,X</sub>	A <sub>2,Y</sub>
1#~2#排架	6.71	14.69
2#~3#排架	6.59	14.81
3#~4#排架	6.72	14.97
4#~5#排架	6.89	15.17
5#~6#排架	6.92	15.39

由表 10 可知,门机在不同位置处对船舶撞击所造成的位移响应幅值最大相差 0.70 mm。结合现场门机作业结束停靠的位置,将 15.39 mm 作为码头 A<sub>2,Y</sub> 的一级预警监测值。

## 4.2 基于码头安全性的位移预警指标

在一级预警指标对应船舶撞击力 1 200 kN 的基础上,逐步增加撞击力撞击 1<sup>#</sup>排架,直至受拉损伤云图显示的损坏单元应力超出混凝土抗拉应力标准值。此时对应的船舶撞击力为 1 400 kN,其模拟位移云图与时程位移曲线见图 9、10,损伤单元处的应力曲线见图 11,此时  $A_{2,y}$  的位移响应幅值达到 19.14 mm。

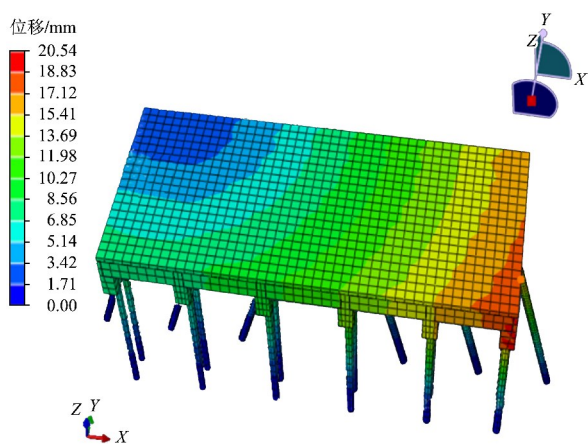


图 9 1 400 kN 船舶撞击下码头位移云图

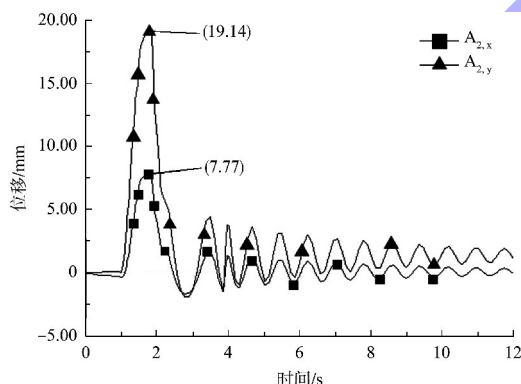


图 10 1 400 kN 船舶撞击下码头位移时程曲线

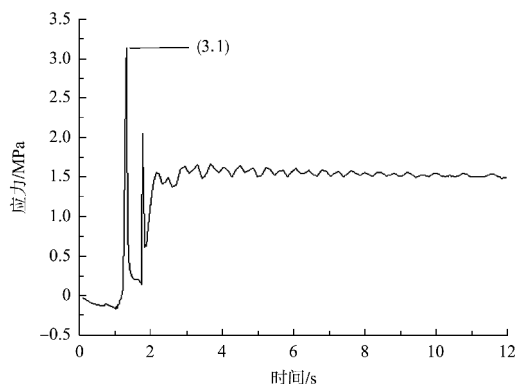


图 11 损伤点应力曲线

基于位移响应幅值 19.14 mm 进行反演,得出船舶法向靠泊时的速度:5 000 吨级船舶满载撞击 1<sup>#</sup>排架,当最大速度达到 0.22 m/s 时(超出规范靠泊),可能对码头结构产生破坏;1 万吨级船舶满载撞击 1<sup>#</sup>排架,当最大速度达到 0.19 m/s 时(超出规范靠泊),可能对码头结构产生破坏。

## 5 结论

1) 依据不同工况,将采集的动态位移信息进行分类,得出门机的作业位置是影响码头位移响应大小的直接因素。码头第一结构段在船舶撞击作用下,因引桥等边界条件的影响,导致  $A_2$  处监测点的位移响应在 X、Y 方向上的位移均较大。

2) 基于码头适用性、安全性提出该码头的两级预警指标:一级预警指标基于码头正常使用极限状态作用组合的最大值推算,位移响应值为 15.39 mm;二级预警指标基于码头承载能力极限状态作用组合的最大值推算,位移响应值为 19.14 mm。

3) 基于二级预警位移反演分析,提出船舶靠泊建议:船舶靠泊时应保持较低的速度,特别是 1 万吨级船舶靠泊时,法向速度不能超过 0.19 m/s;5 000 吨级船舶法向靠泊时,法向速度不能超过 0.22 m/s。船舶靠泊该结构段时,应尽量减小船舶与码头前沿线的夹角,均匀地靠泊在 2<sup>#</sup>与 3<sup>#</sup>排架的橡胶护舷,然后通过位置调整到达规定位置作业。

## 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] 陈俊.两种码头桩定位方法的比较与分析[J].港口科技,2010(5):5-7.
- [4] PUGH A J, MAUNDER E A W, BELMONT M R. An optical displacement monitor [J], Measurement, 1993, 12(2), 159-170.

(下转第 48 页)