

· 信息技术 ·



南京某高桩码头靠泊能力仿真分析与 在线监测预警*

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

(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 210024;
3. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要: 高桩码头服役环境复杂, 码头结构在数十年的运行期内会发生不同程度的损伤, 影响码头的安全运营。在码头运行过程中, 船舶荷载是高桩码头结构的主要荷载, 对码头结构的安全性、耐久性影响较大。本文对南京港某码头靠泊能力进行了有限元仿真分析, 提出船舶靠泊过程中的三级安全预警阈值; 结合长期在线监测, 为码头结构安全服役提供技术支持。研究表明: 在船舶撞击1#排架的情况下, 船舶撞击力达到238 kN时, 码头结构响应达到三级预警指标, 码头位移为3.8 mm, 桩基顶部应变为 69×10^{-6} ; 船舶撞击力达到323 kN时, 码头结构响应达到二级预警指标, 码头位移为5.1 mm, 桩基顶部应变为 100×10^{-6} ; 船舶撞击力达到471 kN, 码头结构响应达到一级预警指标, 码头位移为7.5 mm, 桩基顶部应变为 156×10^{-6} 。在线监测预警结果表明, 码头结构具备5 000吨级船舶靠泊能力, 在规范靠泊的前提下, 能够满足8 000吨级船舶靠泊的结构安全要求。

关键词: 高桩码头; 靠泊; 动位移; 动应变; 监测预警; 阈值

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0185-08

Simulation analysis and online monitoring and early warning of berthing capacity of high pile wharf in Nanjing

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

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

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

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

Abstract: The service environment of high pile wharf is complex, and the wharf structure will be damaged to varying degrees during the operation period of decades, affecting the safe operation of the wharf. During the operation of the wharf, the ship load is the main load of the high-pile wharf structure, which has a great impact on the safety and durability of the wharf structure. In this paper, the berthing capacity of a wharf in Nanjing Port is simulated by finite element method, and the three-level safety early warning threshold in the berthing process of ships is proposed. Combined with long-term online monitoring, it provides technical support for the safe service of the wharf structure. The results show that when the ship hits the 1[#] rack, the impact force of the ship reaches 238 kN, the wharf structure response reaches the third-level warning index, the wharf displacement is 3.8 mm, and the top strain of the pile foundation is 69×10^{-6} . When the impact force of the ship reaches 323 kN, the wharf structure response reaches the second-level warning index, the wharf displacement is 5.1 mm, and the top of the pile foundation is 100×10^{-6} .

收稿日期: 2023-10-27

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52109162); 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。

通讯作者: 贾宇(1991—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为水工结构病害诊断。E-mail: yjia@nhri.cn

The impact force of the ship reaches 471 kN, the wharf structure response reaches the first-level warning index, the dock displacement is 7.5 mm, and the top of the pile foundation is 156×10^{-6} . The online monitoring and early warning results show that the wharf structure has the berthing capacity of 5,000-ton ships, which can meet the structural safety requirements of 8,000-ton ships under the premise of standardized berthing.

Keywords: high pile wharf; berthing; dynamic displacement; dynamic strain; monitoring and early warning; threshold

高桩码头是货物装卸运输的重要平台，其安全状态直接影响货物装卸运输过程的安全性，及时了解码头结构安全状况对于码头安全生产经营至关重要^[1]。由于工作环境复杂，码头结构在长期服役过程中，构件将不可避免地出现不同程度的损伤，影响码头结构在后续服役期间的使用性能，对码头结构的安全运营造成严重威胁。因此，对码头结构进行安全监测，构建码头结构安全预警体系成为码头安全运营的必要条件^[2]。

作为高桩码头结构的主要荷载，船舶撞击对高桩码头的安全性、耐久性具有较大的影响^[3]。随着经济的飞速发展，船舶吨位逐年增大，运载货物的船舶在运动中具有较大的动量，船舶在靠泊过程中存在较大的撞击力，码头结构将产生较大位移和桩基应变，因此针对船舶撞击工况进行监测与分析，对码头结构的安全性与耐久性具有重要意义^[4]。

无基准动态位移测试技术基于无源伺服振动传感器^[5-6]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。作为高桩码头关键受力构件，桩基关键位置的应变也是一个重要的监测指标。码头结构产生较大变形时，桩基通常也将发生较大的应变变化，通过监测桩基应变的变化了解桩基实际受力情况，从而了解码头结构的安全状态^[7-8]。

本文利用拾振器、应变计、数据采集仪与视频监控建立的高桩码头结构安全监测系统，对南京港某高桩码头进行应变、位移监测与损伤预警研究，并结合现场监测数据与有限元仿真模拟，提出该高桩码头各级安全预警阈值。通过位移与

应变监测，获得可变荷载作用下码头结构的整体技术状态，借助仿真模拟，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

码头总长 101.6 m、总宽 34.5 m，其中前平台宽 19.0 m，后平台宽 15.5 m。前平台分为 2 个结构段，共 18 榀横向排架，排架间距为 6 m；后平台共 20 榀横向排架，排架间距为 5 m，结构不分段。码头结构为高桩梁板式，前平台横梁下不设桩帽，后平台横梁下设置桩帽。前平台第 A 排、第 B 排的桩采用 600 mm×600 mm 预应力钢筋混凝土方桩，其余采用 500 mm×500 mm 预应力钢筋混凝土方桩；后平台采用 500 mm×500 mm 预应力钢筋混凝土方桩。码头结构剖面见图 1。

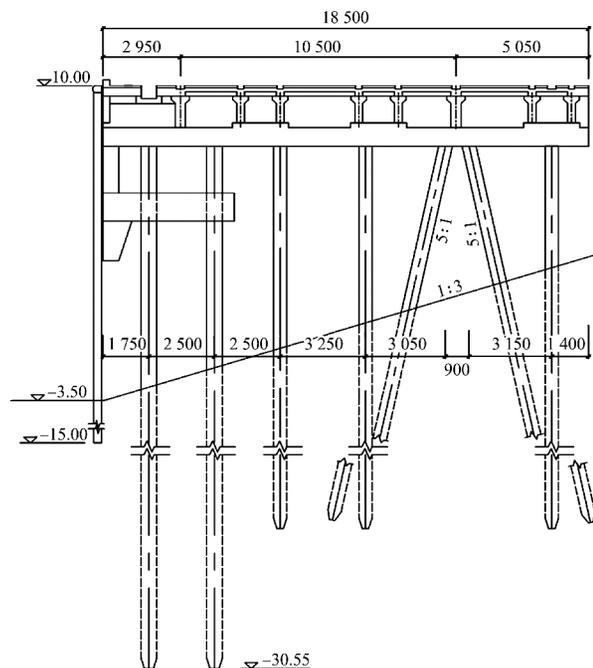
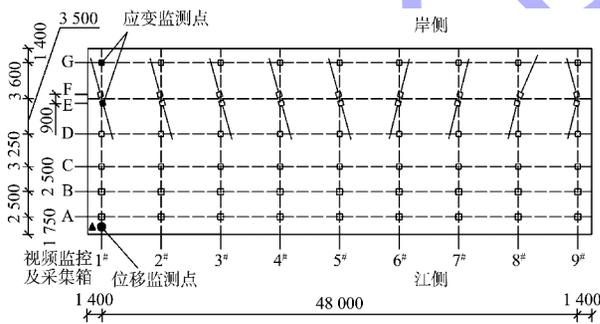


图 1 码头结构剖面 (尺寸: mm; 高程: m)

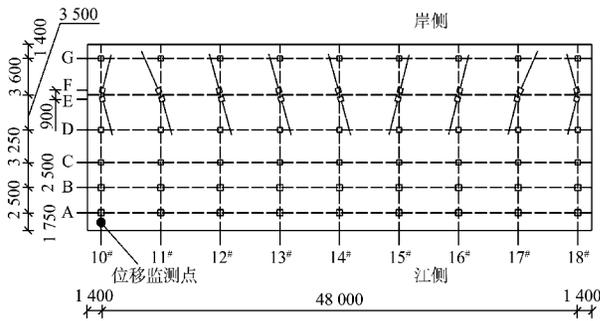
码头原设计为 5 000 吨级泊位, 经码头靠泊能力论证, 该码头核算靠泊船舶等级为 8 000 吨级。由于码头建成年代久远, 为进一步验证码头靠泊能力, 加强码头动态监测, 安装码头靠泊能力在线监测预警系统, 为当前码头结构的安全使用提供技术支撑。

根据船舶靠泊过程中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变、动位移, 兼顾了结构局部和整体响应监测, 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)进行动应变监测, 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, 采用无源伺服式拾振器配合放大器进行码头横向和纵向动位移监测, 测点布设在 2 个边排架横梁上方位置。通过监测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。监测系统布置见图 2。



a) 1[#]~9[#]排架



b) 10[#]~18[#]排架

图 2 码头监测系统布置 (单位: mm)

2 船舶靠泊引起的码头结构响应分析

2.1 船舶撞击力计算

该码头前沿采用 $\phi 300$ mm 钢管桩与 $\phi 900$ mm 钢浮筒(外裹橡胶垫)组成的靠船桩吸能系统缓冲船舶撞击力。靠船桩等效为下端嵌固在地基中的悬臂梁, 通过在上端受到船舶撞击后产生较大的变形吸收船舶撞击能量。一般在靠船桩周围设置浮式靠船构件, 提高靠船桩的吸能效果^[9]。

由于柔性靠船桩计算船舶撞击力的计算方法不完善, 吴同情等^[10]将 $p-y$ 曲线法、NL 法和布拉姆(Blum)法结合工程实例进行比较; 周春儿^[11]对比西德规范法、汤姆林森方法, 并结合工程实例, 均得出 $p-y$ 曲线法通过将靠船桩受力近似简化为受重复荷载问题, 结合 $p-y$ 曲线求解, 较为科学合理地计算靠船桩的内力, 更准确地计算出船舶撞击力大小。

在船舶撞击工况下码头结构响应监测数据中, 选择不同吨位船舶靠泊码头不同排架的 6 组典型工况, 计算撞击力的大小, 分析撞击力大小、位置与结构位移响应、桩基应变响应的关系。各典型工况靠泊信息及船舶撞击力计算结果见表 1。

表 1 船舶靠泊典型工况

工况	船名	排水量/ t	法向靠泊 速度/($m \cdot s^{-1}$)	撞击力/ kN	撞击 位置
1	新长江 25021	5 011	0.11	103	1 [#] 排架
2	皖金源 9988	7 784	0.19	410	1 [#] 排架
3	博达 001	4 371	0.12	157	13 [#] 排架
4	皖鸿顺 816	7 402	0.17	289	13 [#] 排架
5	江集运 1237	6 132	0.14	205	1 [#] 排架
6	昌盛 9898	7 430	0.10	170	13 [#] 排架

2.2 有限元模型

通过有限元软件建立码头模型, 根据码头的设计资料, 码头结构的横梁、纵梁与码头面板等上部结构均采用 C30 混凝土, $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 和 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 预应力空心方桩均采用 C40 混凝土。由 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[12]可知, 混凝土参数见表 2。码头有限元模型选择 C3D8R 实体单元, 该单元在收敛性方面具有独特优势^[13]。选择结构化网格形式, 并对需要重点研究的斜桩和直桩增加网格划分密度。码头有限元模型见图 3。

表2 混凝土模型参数

混凝土强度等级	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$)	泊松比
C30	2 450	30.0	0.2
C40	2 450	32.5	0.2

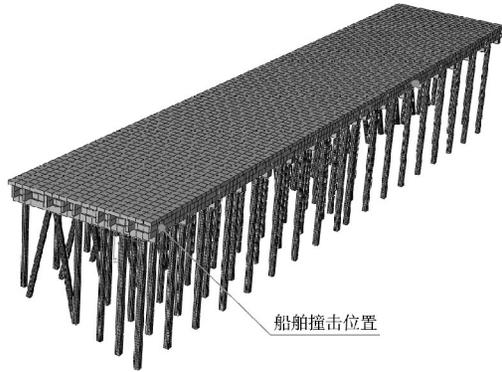


图3 码头结构有限元模型

有限元模型桩土关系根据假想嵌固点法确定，计算得出钢筋混凝土空心方桩受弯嵌固点距泥面深度为4.23 m。综合码头前方平台各桩的布置和自然泥面坡度，完成每个桩长度的确定。

2.3 数值计算与在线监测结果对比

船舶撞击码头结构并非瞬间完成，在船舶与码头结构接触时开始，船舶的动能将逐渐转化为码头护舷的变形能，经过护舷缓冲后，间接作用到码头结构上；然后船舶被码头护舷反弹，变形能逐渐转化为船舶的动能^[14]。船舶靠泊过程中，船舶撞击力视为冲击荷载，一般为半正弦的曲线形式^[15]。船舶撞击力随时间变化的曲线见图4。船舶撞击力以集中荷载的形式撞击在图3中的标注位置。

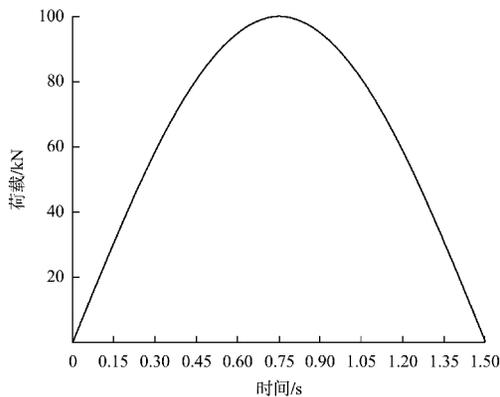


图4 撞击荷载时程曲线

在已统计的船舶撞击典型工况中选择工况1~3(表1)进行有限元仿真计算，将有限元计算结果与现场监测数据进行对比，位移对比结果见表3。应变对比结果见表4。

表3 船舶撞击时各位移监测点的监测值与计算值对比

工况	传感器编号	计算值/mm	监测值/mm	误差/mm
1	$A_{1,x}$	0.12	0.20	-0.08
	$A_{1,y}$	1.31	1.53	-0.22
	$A_{2,x}$	0.11	0.19	-0.08
	$A_{2,y}$	0.17	0.19	-0.02
2	$A_{1,x}$	1.17	1.16	0.01
	$A_{1,y}$	6.83	6.67	0.16
	$A_{2,x}$	0.36	0.37	-0.01
	$A_{2,y}$	0.37	0.58	-0.21
3	$A_{1,x}$	0.01	0.18	-0.17
	$A_{1,y}$	0.03	0.17	-0.14
	$A_{2,x}$	0.24	0.24	0
	$A_{2,y}$	0.57	0.56	0.01

表4 船舶撞击时各应变监测点的监测值与计算值对比

工况	传感器编号	计算值/ $\times 10^{-6}$	监测值/ $\times 10^{-6}$	误差/ $\times 10^{-6}$
1	CH ₁	3.57	2.42	1.15
	CH ₂	6.72	6.53	0.19
	CH ₃	4.55	3.43	1.12
	CH ₄	2.76	0.26	2.50
	CH ₅	6.02	1.01	5.01
	CH ₆	25.57	14.57	11.00
	CH ₇	9.70	2.20	7.50
	CH ₈	13.10	8.90	4.20
2	CH ₁	14.96	17.70	-2.47
	CH ₂	34.69	39.42	-4.73
	CH ₃	22.01	22.22	-0.21
	CH ₄	6.81	2.04	4.77
	CH ₅	12.31	11.22	1.09
	CH ₆	139.52	135.23	4.29
	CH ₇	18.18	11.28	6.90
	CH ₈	48.66	51.66	-3.00
3	CH ₁	1.41	0.24	1.17
	CH ₂	1.42	0.78	0.64
	CH ₃	1.30	0.79	0.51
	CH ₄	1.18	0.25	0.93
	CH ₅	1.27	1.25	0.02
	CH ₆	4.34	1.92	2.42
	CH ₇	2.66	0.98	1.68
	CH ₈	1.33	1.24	0.09

由表3、4可见,3组工况下最大的位移误差出现在 $A_{1,x}$ 处,大小为0.22 mm,最大的应变误差出现在 CH_6 处,大小为 11×10^{-6} ;误差处于合理范围内,有限元模型能够有效反映码头结构在船舶撞击工况下的实际运营情况。

3 码头结构靠泊能力安全预警

3.1 预警分级及预警控制标准

由于高桩码头结构处于特殊水环境,且码头结构需承受船舶靠泊的频繁撞击力、门机作业时的荷载等作用,码头结构的安全性和耐久性尤为重要。混凝土裂缝是影响混凝土性能的重要隐患^[16]。当码头桩基混凝土出现裂缝时,会加剧钢筋的锈蚀,降低码头构件的承载力,影响码头结构安全,因此选择混凝土裂缝控制等级作为码头安全预警阈值的控制标准。

船舶撞击码头结构时,边排架斜桩江侧面顶部的应变响应值最大,根据混凝土裂缝控制等级,边排架斜桩江侧面顶部预警级别按工程风险由小到大分为三级。

选择预应力混凝土桩基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作为一级预警指标;预应力混凝土桩基混凝土法向表面拉应力达到混凝土的预压应力作为二级预警指标。此外,为更好地保障码头安全运营,选择桩基混凝土法向表面拉应力达到混凝土预压应力的0.7倍时,其码头结构响应值作为三级预警指标,在码头发生三级预警时加强监测分析与巡查,确保码头的结构安全。

三级预警是二级预警的提前警示,系数可根

据码头运行情况、风险程度和提前警示需要设置,0.7倍系数较为适宜。

应变和位移其中之一达到预警控制标准即触发预警,充分利用应变和位移监测反映码头局部和整体技术状态信息,达到双重预警效果。

3.2 预警阈值的确定

3.2.1 一级预警阈值

由码头设计资料可知,码头结构中混凝土桩基预应力为3.3 MPa,混凝土强度等级为C40,抗拉强度标准值为2.4 MPa。由码头竣工资料可知,码头桩基混凝土预压应力为3.3 N/mm²,混凝土强度等级为C40,抗拉强度标准值为2.4 N/mm²,弹性模量为32.5 kN/mm²。

根据《水运工程混凝土结构设计规范》,混凝土构件裂缝控制等级为二级时,构件应满足公式(1);混凝土构件裂缝控制等级为一级时,构件应满足公式(2)。

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

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

式中: σ_{ck} 为混凝土法向拉应力,N/mm²; σ_{pc} 为混凝土的预压应力,N/mm²; α_{ct} 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,N/mm²。

因此桩基混凝土预压应力和抗拉强度标准值之和为5.1 MPa。

在统计的最大船舶撞击荷载的基础上,逐步增加荷载,直至码头结构混凝土桩基顶部应力值达到桩基混凝土预压应力和抗拉强度之和,此时船舶撞击力为471 kN。其模拟位移云图与应力时程曲线见图5、6。

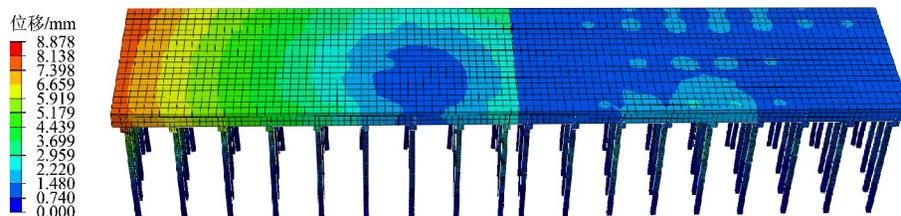


图5 一级预警状态船舶撞击1#排架时码头位移云图

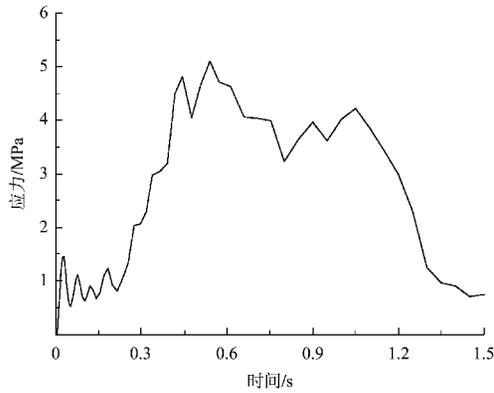


图6 一级预警状态船舶撞击1#排架时码头应力时程曲线

码头有限元模拟计算结果显示, 471 kN 的船舶撞击力施加在码头结构上时, 预应力混凝土桩基裂

缝控制等级为一级, 码头结构段边排架桩基顶部的法向拉应力达到混凝土预压应力和抗拉强度标准值之和, 混凝土即将开裂。此时码头边排架水平位移为 7.5 mm, 边排架桩顶部位混凝土表面应变为 156×10^{-6} 。

3.2.2 二级预警阈值

预应力混凝土桩的预压应力为 3.3 MPa。在一级预警阈值对应的船舶撞击力的基础上, 逐步减小船舶撞击力, 直至码头结构混凝土桩基顶部应力值达到桩基混凝土预压应力, 船舶撞击力为 323 kN。此时模拟位移云图与应力时程曲线见图 7、8。

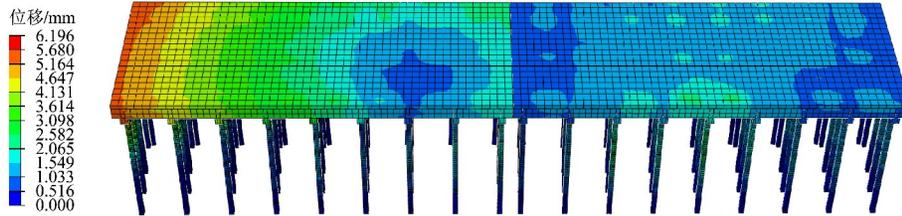


图7 二级预警状态船舶撞击1#排架时码头位移云图

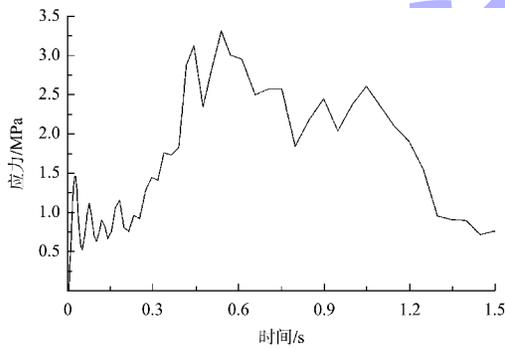


图8 二级预警状态船舶撞击1#排架时码头应力时程曲线

从码头有限元模型仿真计算结果可以看出, 当船舶撞击力达到 323 kN 时, 码头边排架斜桩桩基顶部的法向拉应力达到桩基混凝土的预压应力, 此时, 码头结构段受到船舶撞击的边排架水平位移为 5.1 mm, 边排架斜桩桩基江侧面顶部的应变值为 100×10^{-6} 。

3.2.3 三级预警阈值

为了更好地保障码头结构的安全, 选择桩基

混凝土法向表面拉应力达到混凝土的预压应力的 0.7 倍时的码头整体水平位移响应值和桩基顶部应变响应值作为三级预警指标。混凝土桩基的预压应力为 3.3 MPa, 所以码头结构三级预警的混凝土法向拉应力为 2.3 MPa, 混凝土拉应力达到三级预警阈值时船舶撞击力为 238 kN。此时模拟位移云图与应力时程曲线见图 9、10。

由码头模型有限元仿真计算结果可知, 船舶撞击力达到 238 kN 时, 码头边排架斜桩顶部的法向拉应力为桩基混凝土预压应力的 0.7 倍, 达到码头结构三级安全预警控制标准。此时, 码头结构段边排架水平位移为 3.8 mm, 边排架斜桩桩基江侧面顶部的应变值为 69×10^{-6} 。

各级安全预警阈值见表 5, 位移监测值和应变监测值二者之一达到该级预警阈值即触发相应级别的预警。

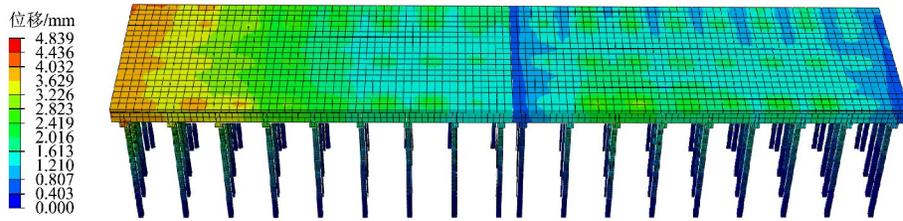


图 9 三级预警状态船舶撞击 1#排架时码头位移云图

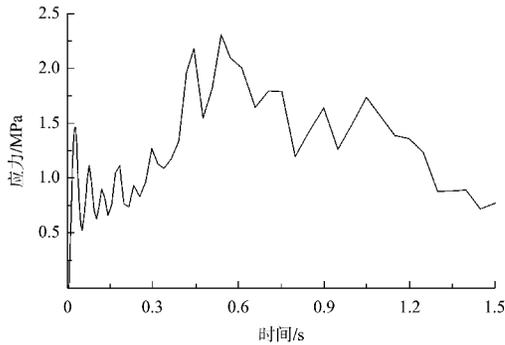
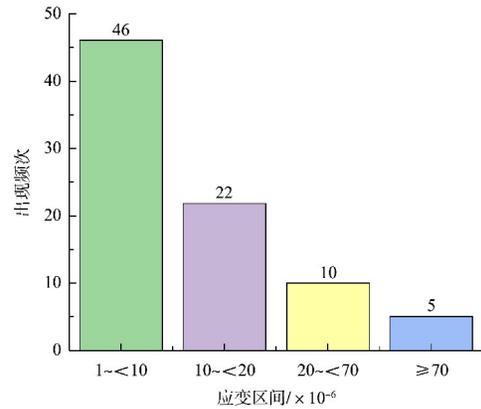


图 10 三级预警状态船舶撞击 1#排架时码头应力时程曲线



b) 最大应变响应分布

表 5 码头各级安全预警阈值

预警级别	位移安全预警阈值/mm	应变安全预警阈值/ 10^{-6}
一级预警	7.5	156
二级预警	5.1	100
三级预警	3.8	69

注: 位移为结构段边排架水平位移, 应变为边排架桩顶部混凝土表面应变。

图 11 船舶靠泊过程中码头结构响应分布

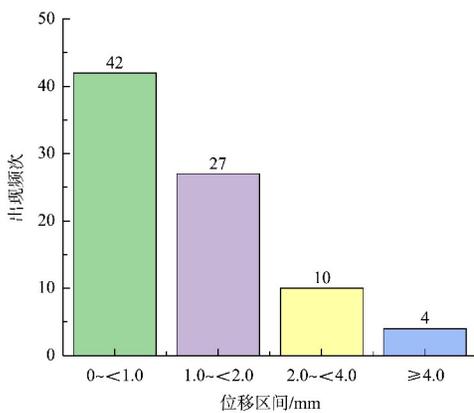
4 码头结构在线监测预警结果及分析

通过视频监控画面确定船舶撞击位置, 将船舶撞击工况下的位移监测数据和应变监测数据分类统计。船舶撞击所产生的位移和应变响应值共计 83 组数据, 时间跨度为 2022 年 10 月下旬—2023 年 3 月的各个时间段。船舶靠泊过程中码头结构位移频次分布及应变频次分布见图 11。

统计结果表明, 船舶靠泊过程中, 码头最大位移集中在 4.0 mm 以内。其中 $0 \sim < 1.0$ mm 多为 5 000 吨级船舶与 3 000 吨级船舶以小于规范靠泊速度撞击中间排架产生, 共计 42 次; $1.0 \sim < 4.0$ mm 多为 5 000 吨级船舶与 8 000 吨级船舶以规范靠泊速度撞击边排架和中间排架产生, 共计 37 次; ≥ 4.0 mm 的位移均为 5 000 吨级船舶与 8 000 吨级船舶以超过规范速度靠泊边排架产生, 共计 4 次。

统计结果表明, 船舶靠泊过程中, 桩基应变集中在 70×10^{-6} 以内。其中 $1 \times 10^{-6} \sim < 10 \times 10^{-6}$ 多为 3 000 吨级船舶与 5 000 吨级船舶以小于规范速度靠泊中间排架产生, 共计 46 次; $10 \times 10^{-6} \sim < 20 \times 10^{-6}$ 多为 5 000 吨级船舶与 7 000 吨级船舶以小于规范速度靠泊边排架产生, 共计 22 次; $20 \times 10^{-6} \sim < 70 \times 10^{-6}$ 多为 5 000 吨级船舶以规范速度靠泊边排架产生, 共计 10 次。 $\geq 70 \times 10^{-6}$ 多为 5 000 吨级船舶以超过规范速度靠泊边排架产生, 共计 5 次。

监测期间监测到的桩基最大应变为 135×10^{-6} , 结构最大位移为 6.8 mm; 码头在此期间运行过程



a) 最大位移响应分布

中,共触发4次码头结构安全三级预警,1次二级预警,未发生码头结构安全一级预警。

5 结论

1) 由有限元仿真结果可知,在船舶撞击1#排架的情况下,船舶撞击力达到238 kN时,码头整体位移与桩基顶部应变达到三级预警指标,此时,码头位移为3.8 mm,桩基顶部应变为 69×10^{-6} ;船舶撞击力达到323 kN时,码头整体位移与桩基顶部应变达到二级预警指标,此时,码头位移为5.1 mm,桩基顶部应变为 100×10^{-6} ;船舶撞击力达到471 kN,码头整体位移与桩基顶部应变达到一级预警指标,此时,码头位移为7.5 mm,桩基顶部应变为 156×10^{-6} 。

2) 由在线监测结果可见:监测到的桩基最大应变为 135×10^{-6} ,结构最大位移为6.8 mm;码头在此期间运行过程中,共触发4次码头结构安全三级预警,1次二级预警,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一级预警,码头结构技术状态处于设计使用状态范围内;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。

3) 在线监测预警结果表明,码头结构具备5 000吨级船舶靠泊能力,在规范靠泊的前提下,能够满足8 000吨级船舶靠泊的结构安全要求。

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] 刘利琴,陈建峰,罗超,等.高桩码头在船舶撞击下的动力响应及损伤分析[J].哈尔滨工程大学学报,2023,44(4):519-526.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 杨世殊,范焱斌.靠船桩船舶撞击力的计算[J].湖南交通科技,2003,29(2):90-90,101.
- [10] 吴同情,冯剑,许锡宾.柔性靠船桩几种计算方法的探讨[J].中国水运(学术版),2007,7(7):16-18.
- [11] 周春儿.靠船桩的性状及计算方法[J].水运工程,1999(5):22-27.
- [12] 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.
- [13] 王璟,孙克俐.基于ANN的船舶撞击高桩码头群桩损伤位置预测[J].港工技术,2020,57(2):34-38.
- [14] 邓雷飞,李越松,郭畅.船舶撞击码头动力响应有限元分析[J].水运工程,2013(8):92-96.
- [15] 朱立岩,刘红彪,张强,等.冲击荷载作用下高桩码头结构的动力响应分析[J].水道港口,2014,35(4):422-426.
- [16] 费建华.高桩码头结构混凝土裂缝的成因及防治措施探讨[J].建设监理,2016(5):54-56.

(本文编辑 赵娟)