

· 港口 ·



## 基于高桩码头排架荷载传递规律的 节点损伤评估方法研究\*

王其标<sup>1</sup>, 高刚刚<sup>2</sup>, 郭伟<sup>3</sup>, 王小惠<sup>4</sup>

(1. 中交海峰风电发展股份有限公司, 福建 福州 350026;

2. 中交上海港湾工程设计研究院有限公司, 上海 200032;

3. 上海港湾工程质量检测有限公司, 上海 200940; 4. 上海海事大学, 上海 200135)

**摘要:** 高桩码头的桩梁节点作为连接基桩和上部梁板结构的关键部位, 起着传递荷载和保持结构整体稳定性的作用, 对其损伤后的状态评估也是高桩码头结构安全评估中的重要一环。以某实际监测工程为依托, 建立一榀排架的三维有限元模型, 通过响应面法与实测数据相结合的方式实现了模型的校正。在此基础上, 采用弹性模量折减法模拟不同程度的桩梁节点损伤, 分析节点损伤对水平荷载传递的具体影响, 并引入荷载保留率作为量化指标, 为节点损伤程度的量化评估提供依据。最后, 提出了一种系统化的、便捷的、可量化的节点损伤评估方法, 为高桩码头的损伤检测和安全评估提供了理论依据和技术支持。

**关键词:** 高桩码头; 传递规律; 节点损伤; 损伤评估

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0047-07

### Node damage assessment method based on load transfer law of high-piled wharf bents

WANG Qibiao<sup>1</sup>, GAO Ganggang<sup>2</sup>, GUO Wei<sup>3</sup>, WANG Xiaohui<sup>4</sup>

(1. CCCC Haifeng Wind Power Development Co., Ltd., Fuzhou 350026, China;

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

3. Shanghai Port Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Shanghai 200940, China;

4. Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

**Abstract:** The pile beam nodes of the high-piled wharf serve as key parts connecting the foundation piles and the upper beam slab structure, playing a role in transmitting loads and maintaining the overall stability of the structure. Evaluating their damaged state is also an important part of the safety assessment of the high-piled wharf structure. This article is based on an actual monitoring engineering and establishes a three-dimensional finite element model of a truss. The model is calibrated by combining response surface methodology with measured data. On this basis, the elastic modulus reduction method is used to simulate different degrees of damage to pile beam nodes, and the specific impact of node damage on horizontal load transmission is analyzed. Load retention rate is introduced as a quantitative indicator to provide a basis for the quantitative evaluation of node damage degree. Finally, a systematic, convenient, and quantifiable node damage assessment method is proposed, providing theoretical basis and technical support for damage detection and safety assessment of high-piled wharfs.

**Keywords:** high-piled wharf; transmission law; node damage; damage assessment

收稿日期: 2024-12-02

\*基金项目: 上海市自然科学基金项目(21ZR1426800)

作者简介: 王其标(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口水工建筑物技术研发及施工管理工作。

高桩码头作为我国港口建设最早且应用最广的码头形式,具有透空结构、自重力小、泊稳条件好、建设速度快、造价低等优势。然而,长时间服役下码头因遭受船舶的碰撞、风浪的冲击荷载、混凝土材料的逐渐劣化以及自然环境的不断侵蚀,其结构普遍承受了不同程度的损害<sup>[1]</sup>。其中在桩梁节点处的损伤破坏尤其常见,不仅影响码头的正常运营,还严重威胁码头的安全性和耐久性。因此,对于老旧码头进行检测评估、加固改造已成为当前的迫切需求。

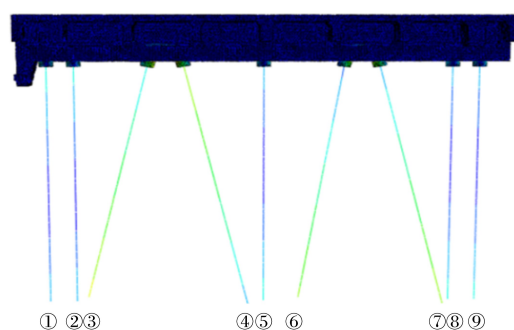
目前相关学者在高桩码头结构损伤评估方面做了大量研究,为高桩码头结构检测修复与加固提供了技术支持<sup>[2-3]</sup>。高苏洋<sup>[4]</sup>运用 ANSYS 软件,基于易损性曲线理论,结合串联模型,通过评估船舶撞击下桩基损伤判定高桩码头整体结构状态,建立了水平荷载下码头的易损性评估曲线;苏林王等<sup>[5]</sup>针对高桩码头结构的复杂性和桩基损伤检测难度,提出 VSP 联合 CT 检测技术,并据此对实际损伤程度进行了科学评估;赵天辉<sup>[6]</sup>运用 ABAQUS/Explicit 软件对船舶撞击码头的动态过程进行模拟分析,详细探讨了不同因素对高桩码头桩基损伤情况的影响;王璟等<sup>[7]</sup>采用 ABAQUS 建模分析船舶撞击高桩码头群桩损伤,结合 ANN 预测损伤位置并评估其可行性。在码头结构评估方面,王德虎等<sup>[8]</sup>基于高桩码头结构特点,对高桩码头结构的外观检测和承载能力进行能力评估,结合模糊层次分析法,建立高桩码头结构安全性评估指标体系;吴锋等<sup>[9]</sup>以模糊理论为基础,采用变权理论和层次分析法,结合高桩码头的结构特点,提出分层评估指标变权重和隶属函数的计算方法,建立高桩码头耐久性模糊综合评估方法。

然而目前对于高桩码头桩梁节点损伤的检测手段以及损伤对码头结构安全性、适用性的影响评估研究尚显不足。本文通过分析高桩码头在不同程度节点损伤下的荷载传递规律,引入荷载保留率作为量化指标,结合高桩码头现场监测数据,建立一种系统化的、便捷的、量化的节点损伤评估方法,旨在为高桩码头的结构检测与加固改造提供科学依据和技术支持。

## 1 节点损伤模拟

### 1.1 模型建立

为开展码头桩梁节点损伤对荷载传递规律的影响研究,本文以江苏某码头一榀排架为例进行分析并建立三维模型。根据实际高桩码头结构的设计施工方案,使用三维有限元软件,建立该码头结构的单榀排架数值分析模型。考虑到码头结构受力特性,仅选取码头前方桩台进行建模研究。模型中梁和桩梁节点均采用实体单元构建,桩则采用梁单元建立,见图 1。



注:桩从海侧至岸侧依次编号①~⑨。

图 1 三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model

该码头为 5 万吨级梁板式码头,桩基采用外直径 1 000 mm 的 PHC 管桩,直桩和叉桩交叉布置组成,码头断面见图 2。

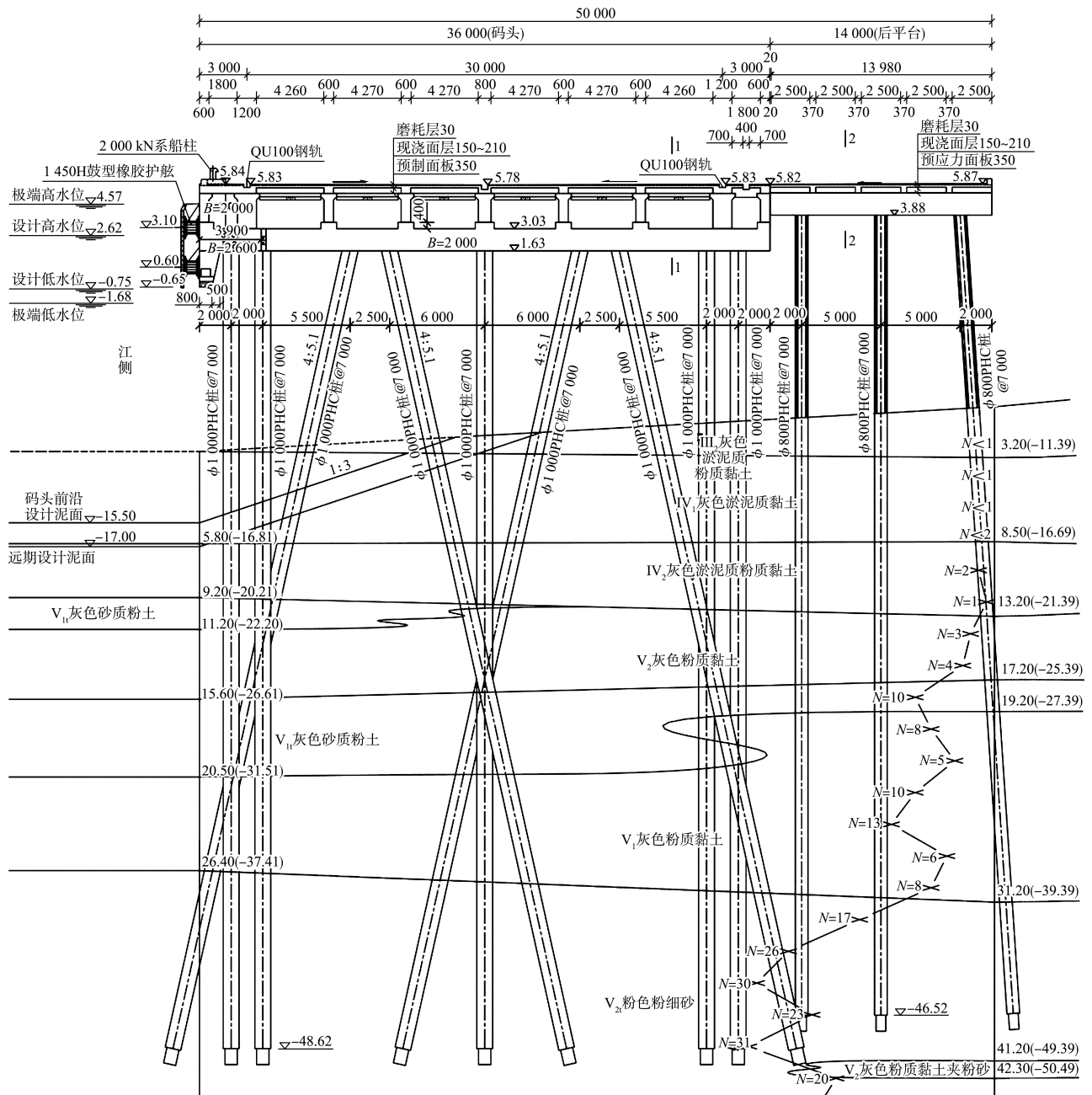


图2 码头断面 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 2 Wharf section (dimension: mm; elevation: m)

### 1.2 模型校正

为确保所建立模型的准确性, 通过分析码头实际监测数据情况, 对建立的有限元模型进行校正。依托工程中横梁监测传感器的布置情

况见图3, 其中“126”代表监测所在的排架编号, “KC”与“HL”分别标识靠船监测传感器和横梁监测传感器, 后缀数字为各监测传感器的具体编号。

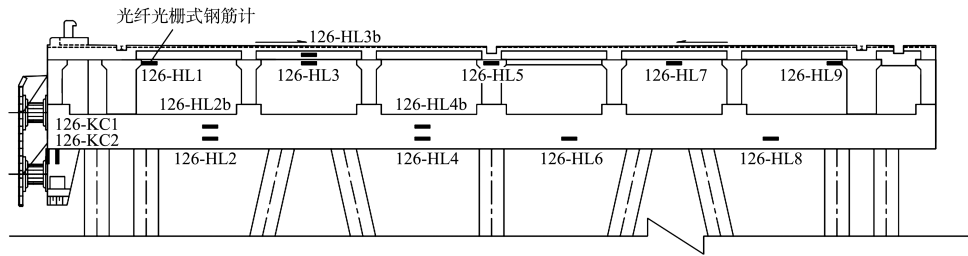


图3 横梁监测传感器布置

Fig. 3 Layout of crossbeam monitoring sensors

桩梁节点损伤主要影响水平力作用下的荷载传递,因此仅以桩梁节点附近的横梁测点监测数据对模型进行校正。将靠船监测传感器的测值视为该排架实际承受的水平力,以此作为模型的水平荷载输入参数;随后,计算有限元模型在监测点相同位置上的应力情况,并将这些应力计算结果与实际监测数据进行对比,以验证模型的准确性。

若计算结果与实测相差较大,则可通过响应面法对模型局部参数进行校正。响应面方法由 Box 等<sup>[10]</sup>提出,通过结合实测数据的方式,为码头模型校正提供一种思路,具体可按以下步骤进行校正。

1) 确定需要修正的参数变量和目标变量:基于高桩码头的结构特性和运行环境,通过敏感度分析,确定对高桩码头结构安全起主导作用的结构材料属性、工作荷载等为参数变量。结合码头关键构件的实测数据,确定最能反映码头工作状态的结构响应作为目标变量。

2) 样本试验设计:采用 Box-Behnken 矩阵抽样,该法至少需要 3 个参数变量。在进行抽样时,结合某一参数的中点值与另外 2 个参数各自区间的上下限进行组合。与其他抽样技术相比,Box-Behnken 法计算成本更低,适合复杂工程结构中基于响应面法的有限元模型优化。

3) 显著参数选取:根据试验方案,利用有限元分析得出目标变量的数值,并通过方差分析筛选出在整体样本中对目标变量影响显著的参数变量。

4) 响应面的回归拟合:建立采用二次多项式

响应面模型。建立该模型后,需要对响应面方程的拟合优度进行检验,采用拟合优度系数  $R^2$  进行检验:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N [y_{rs}(j) - y(j)]^2}{\sum_{j=1}^N [y(j) - \bar{y}]^2} \quad (1)$$

式中:  $N$  为样本总数;  $y_{rs}$  为响应面方程的计算值;  $y$  为有限元计算值;  $\bar{y}$  为有限元计算值的平均值。

拟合优度系数  $R^2$  的结果区间为  $[0, 1]$ , 当计算得到的拟合优度系数接近 1, 那么响应面方程的回归精度较高。相反,若拟合优度系数较低,则在构建模型时可能遗漏了对目标变量有重要影响的参数。这时,有必要重新评估各参数变量的敏感性,识别出全部具有显著影响的参数,并据此重新规划响应面试验。

5) 参数优化:将相对误差设定为有限元计算与现场监测结果的差异指标,基于构建的响应面方程,找到在固定区间内误差最小(即接近 0)的试验条件组合。这一组合的参数值即可作为优化有限元模型时所需的调整参数。

模型校正后,通过对比受船舶撞击力下的模型计算结果与实测数据,进一步验证和确认模型校正的准确性。码头监测数据见图 4,图中记录了某一时刻码头受船舶撞击力作用下桩梁节点附近的测点数据变化情况。

实际测得该时刻下两靠船力监测传感器测值分别为 442.83、442.03 kN,取其均值 442.43 kN。以 442.43 kN 为模型水平荷载输入值,经模型校正后实际测值与模型计算结果见表 1。

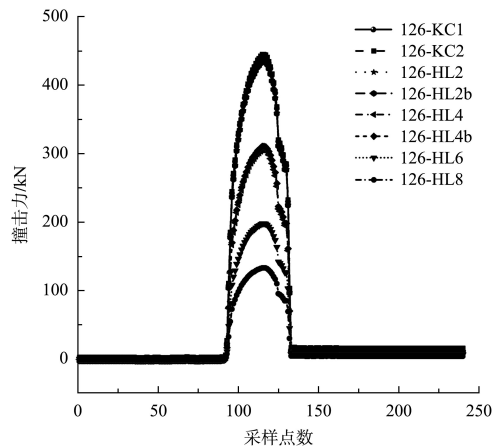


图4 监测数据  
Fig. 4 Monitoring data

表1 监测数据的实际值和模型计算结果  
Tab. 1 Actual values and model calculation results of monitoring data

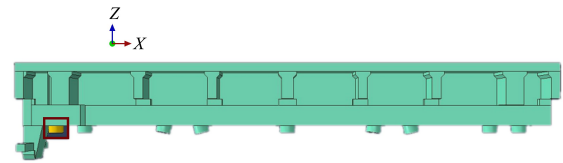
传感器编号	实测值/kN	计算值/kN	误差/%
126-HL2	437.84	433.55	0.98
126-HL4	310.50	307.72	0.90
126-HL6	195.25	193.14	1.08
126-HL8	120.44	119.10	1.11

由表1可知,在施加相同水平力的条件下,现场实测值与校正后模型计算得出的理论值之间的误差约为1%,误差水平相对较小。结果表明,在模拟实际工况的过程中,模型所预测的结构响应与通过高精度监测传感器实际测得的数据高度一致,误差被严格控制在非常低的可接受范围内,充分验证了校正后模型的可靠性和准确性。

### 1.3 损伤模拟

在有限元损伤模拟中,主流的模拟方法为刚度折减法,刚度折减法可通过弹性模量折减法或面积折减法进行刚度值折减,从而模拟损伤情况。弹性模量折减法主要通过减少单元的弹性模量进行折减,以降低单元的刚度;面积折减法主要通过减小结构的截面面积,以降低单元的刚度<sup>[11]</sup>。本研究针对高桩码头桩梁节点结构损伤问题,采用三维有限元模型进行分析。为便于研究,通过弹性模量折减法模拟节点损伤,即通过折减桩梁节点处弹性模量来调整节点的刚度,进而实现桩梁节点的损伤模拟。桩梁节点处弹性模量设置范围

见图5。模型桩梁节点在不同健康程度下的材料参数见表2。



注:图中标记处为桩梁节点弹性模量折减区域。

图5 弹性模量折减区域

Fig. 5 Elastic modulus reduction area

表2 材料参数

Tab. 2 Material parameters

材料	弹性模量/GPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比
C80-1%	0.38		
C80-5%	1.90		
C80-10%	3.80		
C80-20%	7.60		
C80-30%	11.40		
C80-40%	15.20		
C80-50%	19.00	2 500	0.2
C80-60%	22.80		
C80-70%	26.60		
C80-80%	30.40		
C80-90%	34.20		
C80	38.00		

注:C80表示PHC管桩无损情况下的桩梁节点参数数据,后缀表示节点健康程度。

## 2 桩梁节点荷载传递规律分析

为量化桩梁节点受损后荷载传递情况,引入荷载保留率,计算如式(2)。通过该式可计算出桩梁节点在不同健康程度下的荷载传递变化情况。

$$\lambda_F = \frac{V_{a1} - V_{b1}}{V_a - V_b} \quad (2)$$

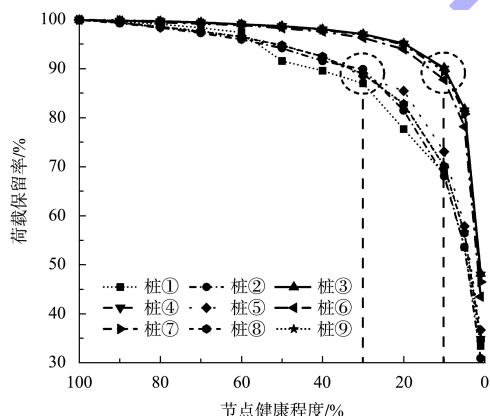
式中: $\lambda_F$ 为荷载保留率; $V_a$ 为节点健康程度为100%时,即桩梁节点无损伤时,桩前横梁中水平荷载,kN; $V_b$ 为节点健康程度为100%时,即桩梁节点无损伤时,桩后横梁中水平荷载,kN; $V_{a1}$ 为桩梁节点出现损伤时,桩前横梁中水平荷载,kN; $V_{b1}$ 为桩梁节点出现损伤时,桩后横梁中水平荷载,kN。

为研究桩梁节点荷载传递规律，在不同健康程度下的模型中施加 1 个 1 000 kN 的水平荷载进行计算。分别截取各相邻桩基之间以及横梁段的

水平荷载带入式(2)，可得出桩梁节点不同健康程度下的荷载保留率，见表 3。桩梁节点不同健康程度下的荷载保留率变化点线图见图 6。

表 3 桩梁节点荷载保留率  
Tab. 3 Load retention rate for pile beam nodes

节点健康程度/ $\%$	荷载保留率/ $\%$								
	桩① $\lambda_F$	桩② $\lambda_F$	桩③ $\lambda_F$	桩④ $\lambda_F$	桩⑤ $\lambda_F$	桩⑥ $\lambda_F$	桩⑦ $\lambda_F$	桩⑧ $\lambda_F$	桩⑨ $\lambda_F$
100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
90	99.60	99.30	99.80	99.80	99.50	99.80	99.90	99.40	99.40
80	99.10	98.40	99.70	99.70	98.40	99.50	99.70	98.60	98.60
70	98.40	97.30	99.50	99.40	97.50	99.20	99.40	97.60	97.70
60	97.40	96.00	99.10	99.10	96.10	98.90	99.10	96.50	96.50
50	91.60	94.20	98.70	98.70	94.70	98.30	98.60	94.80	94.80
40	89.60	91.60	98.10	98.00	92.40	97.60	98.00	92.50	92.50
30	87.00	89.90	97.10	97.00	88.50	96.30	96.90	88.90	88.90
20	77.70	81.50	95.20	95.10	85.50	94.00	94.90	82.80	82.90
10	68.60	68.10	90.20	90.00	73.10	87.80	89.50	70.10	70.20
5	53.60	53.60	81.80	81.50	57.90	78.20	80.80	56.50	56.60
1	33.40	30.90	48.20	48.00	36.70	43.50	46.50	34.70	35.10



注：桩③、桩④、桩⑥、桩⑦为斜桩，桩①、桩②、桩⑤、桩⑧、桩⑨为直桩。

图 6 荷载传递规律

Fig. 6 Load transfer law

由图 6 可知：1) 随着桩顶节点损伤程度的加重，即节点弹性模量的减少量越大，桩梁节点传递给基桩的剪力将越小。2) 在相同健康程度下，斜桩承受的剪力明显大于直桩；相同斜度的斜桩承受的剪力基本一致。3) 直桩桩顶节点的弹性模量降到 30% 时，桩所承受的剪力减少 10%；而斜

桩桩顶节点的弹性模量降到 10% 时，桩所承受的剪力只减少 10%。说明节点损伤对斜桩的影响较小，即对于斜桩较多的高桩码头，桩梁节点损伤对码头安全性、适用性影响较小；而对于全直桩码头，桩梁节点损伤会明显影响各桩基的荷载分布，使节点无损伤的基桩受荷载明显增大，进而影响码头安全性、适用性。

### 3 节点损伤评估流程

在高桩码头结构检测评估中，针对桩梁节点的损伤评估是一个重要环节。基于损伤模拟和荷载传递规律分析方法，本文建立了基于节点损伤的码头安全性、适用性评估流程，旨在为码头提供一种便捷的、量化的检测评估手段。

1) 前期准备：在损伤评估工作开始前，需进行充分的前期准备。包括收集结构设计资料、施工记录和历史监测数据等。同时，还需要进行现场勘查，对桩梁节点的外观损伤进行详细记录，包括损伤位置、尺寸和形态等。为后续的三维模型建立和损伤模拟提供了基础数据。

2) 布设测点:为确保损伤评估的准确性,需在码头上合理布设测点。测点的布设应考虑码头的结构特点、受力情况以及历史损伤情况等。在桩梁节点前后位置尤其针对具有外观损伤的节点附近应着重布设测点,并根据桩梁节点前后测点的实测数据计算出该节点的荷载保留率。

3) 建立桩梁节点局部模型:基于码头结构设计资料,使用三维有限元软件建立码头桩梁节点的局部分析模型。通过调整桩梁节点的弹性模量模拟节点不同程度的损伤,建立不同损伤程度下的荷载保留率与荷载传递规律。

4) 确定节点损伤程度:通过对比桩梁节点荷载保留率的实测与模型计算结果,确定该节点损伤后适用于有限元模拟分析的弹性模量。

5) 损伤影响分析:根据节点损伤后的弹性模量建立码头损伤后的有限元模型。根据码头的实际设计荷载,计算得出节点损伤下的码头结构承载力、位移和变形等。

6) 损伤评估与结论:基于设计荷载下损伤模型计算结果,与码头设计指标和实际运营要求进行对比分析,以此对码头结构的安全性、适用性进行评估,并提出相应的维修加固建议。

#### 4 结论

1) 随着桩顶节点损伤程度的加重,即节点弹性模量的减少量越大,桩梁节点所传递给基桩的剪力将越小。

2) 在相同健康程度下,斜桩所承受的剪力明显大于直桩;相同斜度的斜桩所承受的剪力基本一致。

3) 对于斜桩较多的高桩码头,桩梁节点损伤对码头安全性、适用性影响较小;而对于全直桩码头,桩梁节点损伤显著影响各桩基的荷载分布,使节点无损伤的基桩所受荷载明显增大,进而影响码头安全性、适用性。

4) 本文建立了一个基于节点损伤的码头安全性、适用性评估流程,为码头的结构检测与评估提供指导。研究成果不仅具有重要的理论价值,而且在实际工程应用中具有广阔的前景,对于准确评估码头的安全性和适用性具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 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.  
LIU L Q, CHEN J F, LUO C, et al. Dynamic response and damage analysis of high-piled wharves under ship impact[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(4): 519-526.
- [2] 王承强,刘强,高军军,等.高桩码头船舶荷载响应测试及结构承载力评估[J].人民珠江,2020,41(11):60-64.  
WANG C Q, LIU Q, GAO J J, et al. Ship load response test and structural bearing capacity assessment of high-piled wharfs[J]. Pearl River, 2020, 41(11): 60-64.
- [3] 李沛,李东军.在役码头结构检测评估现状与展望[J].中国港湾建设,2019,39(8):71-75.  
LI P, LI D J. Present situation and prospect of detection and evaluation for structure of in-service wharfs[J]. China harbour engineering, 2019, 39(8): 71-75.
- [4] 高苏洋.水平荷载下高桩码头结构易损性曲线研究[D].南京:东南大学,2016.  
GAO S Y. Research on fragility curves of high-piled wharf subjected to horizontal loads [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [5] 苏林王,赵冉,赵永贵,等.VSP与CT技术对在役高桩码头结构损伤的检测与应用[J].水运工程,2015(3):140-144.  
SU L W, ZHAO R, ZHAO Y G, et al. Structural damage detection of in-service high-pile wharf using VSP and CT technology[J]. Port & waterway engineering, 2015 (3): 140-144.
- [6] 赵天辉.对高桩码头在船舶撞击力作用下损伤预测的研究[D].天津:天津大学,2018.  
ZHAO T H. Damage prediction of high-piled wharf under ship impact force[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [7] 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.  
WANG J, SUN K L. Prediction of damaged position of pile clusters while a ship colliding with piled berth structure based on ANN [J]. Port engineering technology, 2020, 57(2): 34-38.