



船闸浮式系船柱结构受荷敏感区域研究 *

刘明维^{1,2}, 纪旭东^{1,2}, 古明洁^{1,2}, 吴林键^{1,2}, 杨 嘉^{1,2}, 狄宇涛^{1,2}

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 随着我国水运交通事业的不断发展, 大型船闸的安全运行至关重要。为保证船闸内船舶的泊稳安全, 实时感知船闸浮式系船柱的运行状况至关重要。浮式系船柱受荷敏感区域的确定与结构监测传感器的布设方案密切相关, 然而针对该问题仍缺乏系统的研究。依托某大型船闸工程, 通过建立浮式系船柱结构三维数值模型, 基于有限元方法研究浮式系船柱在不同系缆力、系缆角度情况下的结构应变路径变化规律。结果表明, 浮式系船柱结构受系缆力作用的敏感区位置在靠近浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置附近, 为浮式系船柱结构受力监测传感器的安设以及后续工作提供理论支撑。

关键词: 数值仿真; 浮式系船柱; 应变; 受荷敏感区

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0076-08

Structural load sensitive area for floating mooring column of ship lock

LIU Mingwei^{1,2}, JI Xudong^{1,2}, GU Mingjie^{1,2}, WU Linjian^{1,2}, YANG Jia^{1,2}, DI Yutao^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Key Laboratory of the Ministry of Education on Hydraulic & Water Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: With the development of water transportation in China, the safe operation of large ship locks is crucial. To ensure the stability and safety of ships docked in the lock, it is necessary to monitor the operation status of the floating mooring column in real-time. Considering that the load sensitive area of the floating mooring column is directly related to the deployment of monitoring sensors, but there is still a lack of systematic research on this issue. Therefore, this paper relies on a large ship lock project, builds a three-dimensional numerical model of floating mooring column structure, and studies strain paths of the floating mooring column under at different mooring forces and mooring angles based on finite element numerical simulation method. The results show that the load sensitive area of floating mooring column structure by mooring force effect is near the welding position between the hollow cylinder of the floating mooring column and the fixed steel plate, which can provide a reference for the installation of the floating mooring column strain gauge and future work.

Keywords: numerical simulation; floating mooring column; strain; load sensitive area

随着我国水运交通的发展, 截至 2019 年我国已拥有 902 座通航建筑和 44 座通航枢纽大坝。船闸作为其中最主要的通航设施, 其结构和运行安

全对提高我国水上交通运输能力和服务水平至关重要^[1]。就船闸而言, 根据大量的案例研究可知, 浮式系船柱是影响船闸运行状态的关键环节^[2]。

收稿日期: 2023-04-14

*基金项目: 重庆市教育委员会“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCX2020030); 水利水运工程教育部重点实验室开放基金资助项目(SLK2021B13); 重庆英才计划项目(CSTC2021YCJH-BGZXM0053)

作者简介: 刘明维 (1972—), 男, 博士, 教授, 从事港口工程设计计算理论的教学与研究。

伴随着船闸通航能力的提高, 大型船舶进出船闸以及大规模的灌泄水作用都将影响浮式系船柱的受力状态, 当船舶进出闸过快或灌泄水过程中浮筒导轨卡阻等情况都将极大程度地威胁浮式系船柱的运营安全, 对船闸的正常通航带来不可忽视的影响。

已有一些学者进行了相关研究, 如张星星等^[3]基于传统浮式系船柱提出新型浮式系缆设施并进行相关验证。刘明维等^[4-7]利用数值仿真方法建立浮式系船柱的受荷响应力学模型, 分析浮式系船柱的应变结果; 在此基础上, 根据浮式系船柱受力特征, 基于浮式系船柱的受力状态对其进行相关分析和理论验证, 并结合浮式系船柱的现场监测检测结果, 提出浮式系船柱受荷情况的安全预警。孙刘林等^[8]通过对浮式系船柱系缆桩拉力进行实时监测, 提出利用新型鞍式传感器对系缆拉力进行动态监测的方式。杭震等^[9]基于激光测距和聚类分析的方法对浮式系船柱的运行状态进行分析和模拟。

针对浮式系船柱受力监测方面已有大量学者开展了相关研究工作^[10-12], 然而对于其结构监测传感器的布设方式强烈依赖于结构受荷敏感区域的分布及位置, 不同外部系缆力大小、方向作用下船闸浮式系船柱结构的受荷敏感区域尚缺乏系统的研究。为此, 本文结合某大型船闸工程, 利用有限元数值模拟方法, 深入研究浮式系船柱在不同系缆力大小和系统角度作用下, 其主体结构内外应变路径的变化规律。经对比分析, 明确浮式系船柱在系缆力作用下的受荷敏感区域, 为浮式系船柱结构受力监测传感器的安设以及相关的后续工作提供依据。

1 模型建立及验证

1.1 浮式系船柱结构三维模型构建

浮式系船柱模型选用某大型船闸所使用的浮式

系船柱结构, 根据其各部件的实际尺寸, 利用有限元仿真建立了浮式系船柱上部结构的三维数值仿真模型, 结果如图 1 所示。在三维数值仿真模型建立的过程中, 将船闸浮式系船柱上部结构考虑为对称结构, 概化其 4 个纵、横向滚轮为三维棱柱体。

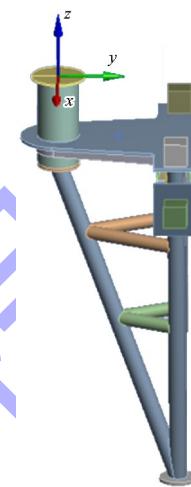


图 1 船闸浮式系船柱三维数值仿真模型

1.2 模型参数设置

根据某浮式系船柱上部结构的实际情况, 确定其主要材料为 Q345B 型钢材, 相关参数为: 弹性模量 E 为 206 GPa, 泊松比 ν 为 0.30, 密度 ρ 为 7 850 kg/m³, 屈服强度为 345 MPa, 抗拉强度为 510 MPa。

根据浮式系船柱的实际结构特征和受力情况, 选择 ANSYS workbench 中的 solid186(3D20N) 实体单元作为船闸浮式系船柱三维数值仿真模型的基本计算单元, 综合考虑数值仿真实验室的计算机性能, 采用 ANSYS workbench 中提供的四面体网格划分法对船闸浮式系船柱三维数值仿真模型进行网格划分, 单个网格为边长 20 mm 的平行四面体, 如图 2 所示。对船闸浮式系船柱三维数值仿真模型中的 4 个横、纵向滚轮所对应棱柱体的表面处施加固定约束, 即约束其在该表面上不发生任何平动或转动。

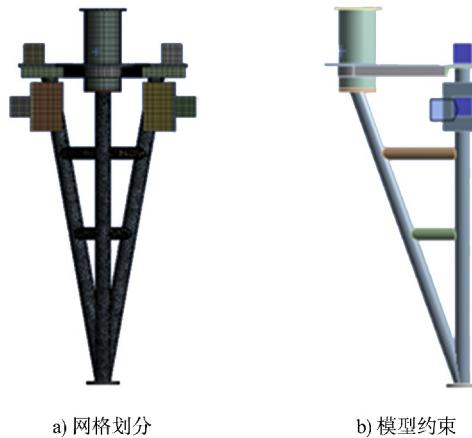


图 2 浮式系船柱三维模型网格划分和约束

1.3 模型精度验证

为了合理分析浮式系船柱结构在船舶系缆力作用下的受力状态,采用简化理论计算模型与数值仿真模型进行对比验证数值仿真模型的可靠性。其所受的荷载情况考虑为:1) 结构自身重力 $G=7.0288\text{ kN}$, 方向竖直向下;2) 水的浮力,与结构的自身重力大小相等,方向相反;3) 船舶系缆力 $F=100\text{ kN}$, 方向平行于 x 轴。

根据简化理论计算模型,可计算得到在验证工况条件下船闸浮式系船柱空心圆柱体上的弯矩分布,如图 3 所示。浮式系船柱的最大应力为 129.56 MPa 。

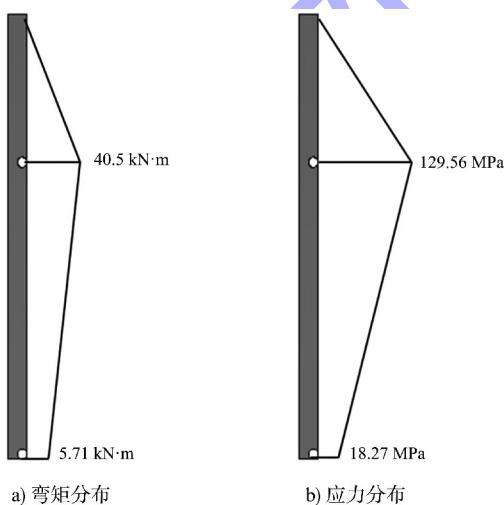


图 3 浮式系船柱简化理论模型的计算结果

根据数值仿真模型,可计算得到在验证工况条件下船闸浮式系船柱上部结构的应力云图,如图 4 所示。浮式系船柱的最大应力为 130.15 MPa 。

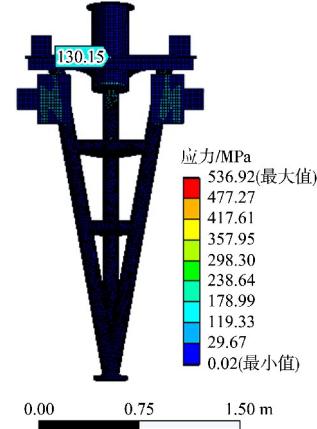


图 4 验证工况条件下数值仿真三维模型的应力云图

综上,简化计算模型(129.56 MPa)和数值仿真模型(130.15 MPa)二者在船闸浮式系船柱空心圆柱体相同位置处的应力结果相对误差为 0.37% ,验证了船闸浮式系船柱数值仿真模型的可靠性。

2 浮式系船柱结构数值仿真试验

2.1 数值仿真试验工况

通航船舶在船闸闸室内停靠的过程中,由于通航船舶干舷高度与浮式系船柱系统高度不一致,在水平面和竖直面内分别形成水平角 α 和竖向角 β ,见图 5。根据《系船柱构件通用设计编制说明》^[13], β 常取 15° 。

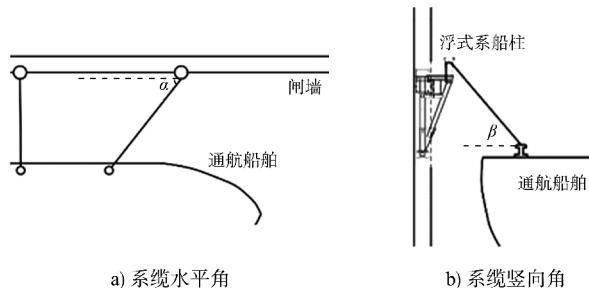


图 5 通航船舶系缆力作用时浮式系船柱的系缆角

根据 JTS 169—2017《码头附属设施技术规范》^[14], 船、艉缆水平投影与船舶纵轴所成夹角 α (水平角)宜为 $30^\circ \sim 45^\circ$, 但不小于 25° 。由此,可以得到缆绳水平角变化范围为 $25^\circ \sim 155^\circ$, 见图 6。

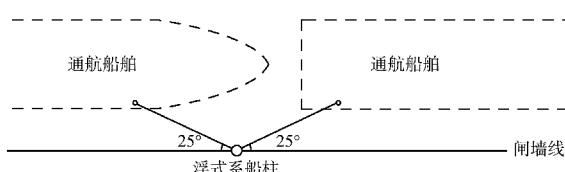


图 6 浮式系船柱水平系缆角度变化

在数值仿真模型计算过程中, 船闸浮式系船柱所受荷载考虑为: 1) 结构自身重力, 与简化理论计算模型相同; 2) 水的浮力, 与简化理论计算模型相同; 3) 船舶系统缆力 F 为 50、100、250 kN。其中结构自身重力、水的浮力是永久荷载, 均作为恒载施加于浮式系船柱数值仿真模型上, 计算工况仅考虑船舶系统缆力的变化, 见表 1。

表 1 计算工况

$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$		
	$F=50\text{ kN}$	$F=100\text{ kN}$	$F=250\text{ kN}$
90	15	15	15
90	0	0	0
90	-15	-15	-15
155	15	15	15
155	0	0	0
155	-15	-15	-15

2.2 浮式系船柱应变路径确定

基于材料力学中性轴的基本理论, 综合考虑浮式系船柱的对称性和水平系统角度变化范围, 结合浮式系船柱智能监测及安全预警系统对受拉应变的实际监测需求, 最终可确定浮式系船柱空心圆柱体在受荷过程中始终保持受拉状态的柱体区域, 见图 7。

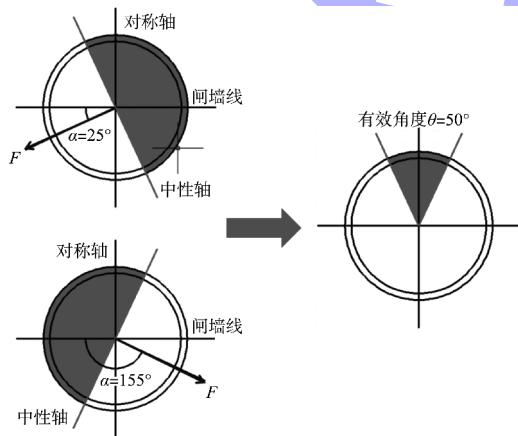
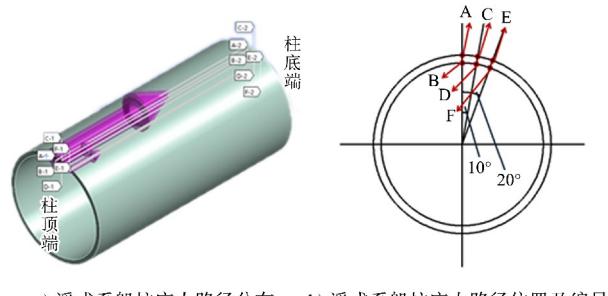


图 7 浮式系船柱空心圆柱体受拉柱体区域

基于图 7, 综合考虑浮式系船柱智能监测及安全预警系统内嵌计算模型的实际计算需求和浮式系船柱结构的对称性, 拟在浮式系船柱空心圆柱体内、外表面各设置 3 条应变路径, 共计 6 条应变路径, 如图 8 所示。



a) 浮式系船柱应力路径分布 b) 浮式系船柱应力路径位置及编号

图 8 浮式系船柱应力情况

3 结果与分析

3.1 系船柱柱体外部路径 A 的应变变化规律

水平系统角度为 90° 、 155° 时路径 A 上的应变分布见图 9。可以看出, 当 $\alpha=90^\circ$ 和 $\alpha=155^\circ$ 时, 路径 A 上的应变都呈现先增大后减小再增大的趋势, 且最值均出现在浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置附近。综上, 在靠近浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置处应变路径 A 上的应变变化最剧烈。

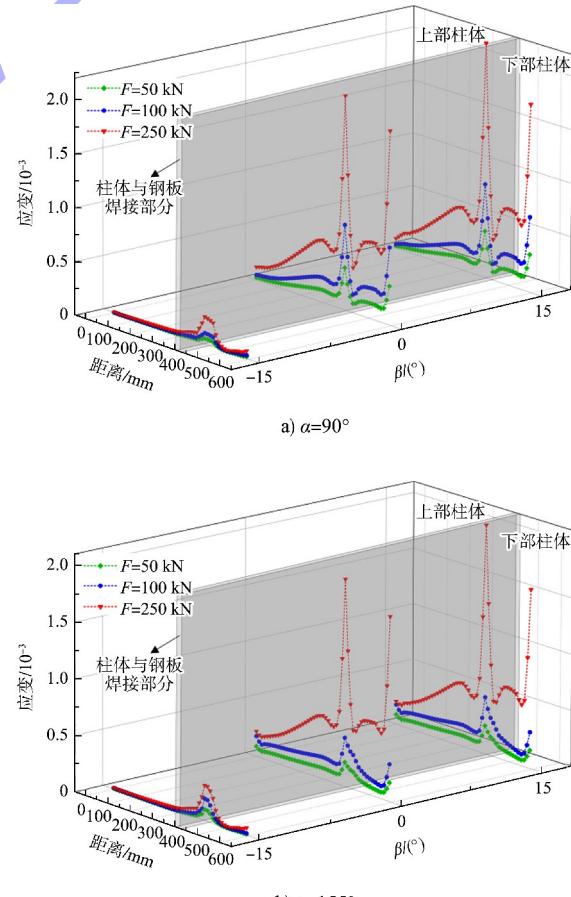


图 9 路径 A 上的应变分布

3.2 系船柱柱体外部路径 B 的应变变化规律

水平系缆角度为 90° 、 155° 时路径 B 上的应变分布见图 10。可以看出，当 $\alpha=90^\circ$ 和 $\alpha=155^\circ$ 时，路径 B 上的应变都呈现先增大后减小再增大的趋势，且当 $\beta=15^\circ$ 和 $\beta=0^\circ$ 时，最值均出现在浮式系船柱空心圆柱体底端，当 $\beta=-15^\circ$ 时，最值均出现在浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置附近。综上，在靠近浮式系船柱空心圆柱体底端位置处应变路径 B 上的应变变化最剧烈。但在浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置附近均出现了极值，说明在靠近浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置处应变路径 B 上的应变变化也比较剧烈。

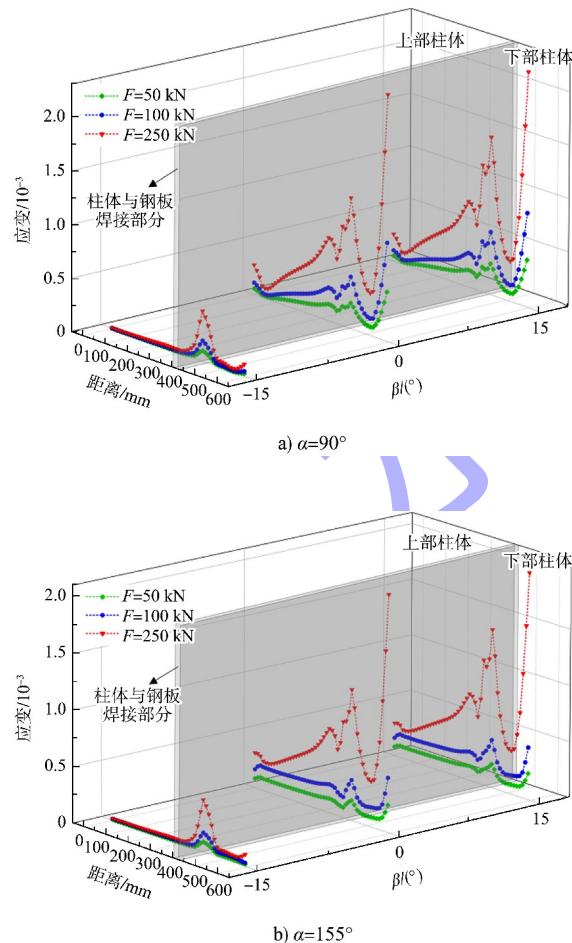


图 10 路径 B 上的应变分布

3.3 系船柱柱体外部路径 C 的应变变化规律

水平系缆角度为 90° 、 155° 时路径 C 上的应变

分布见图 11。可以看出，当 $\alpha=90^\circ$ 和 $\alpha=155^\circ$ 时，路径 C 上的应变都呈现先增大后减小再增大的趋势，且最值均出现在浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置附近。综上，在靠近浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置处应变路径 C 上的应变变化最剧烈。

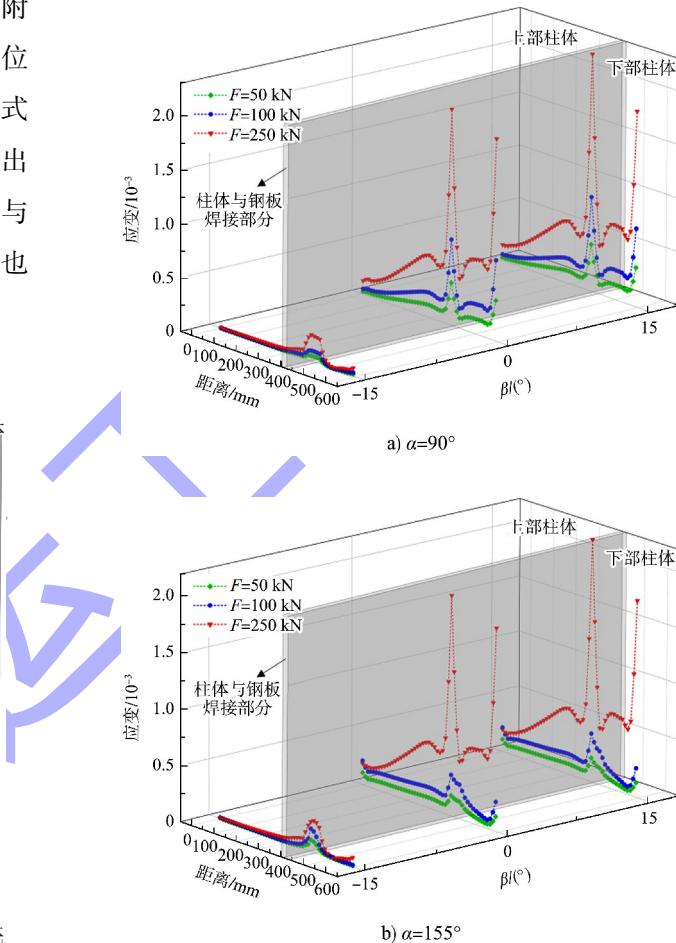


图 11 路径 C 上的应变分布

3.4 系船柱柱体外部路径 D 的应变变化规律

水平系缆角度为 90° 、 155° 时路径 D 上的应变分布见图 12。可以看出，当 $\alpha=90^\circ$ 和 $\alpha=155^\circ$ 时，路径 D 上的应变都呈现先增大后减小再增大的趋势，且当 $\beta=15^\circ$ 和 $\beta=0^\circ$ 时，最值出现在浮式系船柱空心圆柱体底端，当 $\beta=-15^\circ$ 时，最值都出现在浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置附近。综上，在靠近浮式系船柱空心圆柱体底端位置处应变路径 D 上的应变变化最剧烈。但在浮式系船

柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置附近均出现了极值, 说明在靠近浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置处应变路径 D 上的应变变化也比较剧烈。

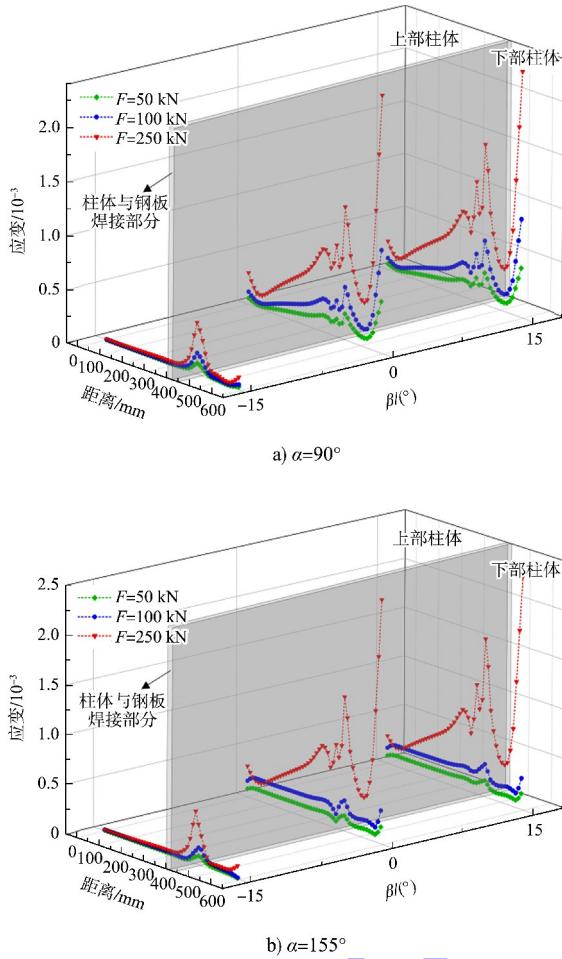


图 12 路径 D 上的应变分布

3.5 系船柱柱体外部路径 E 的应变变化规律

水平系统角度为 90° 、 155° 时路径 E 上的应变分布见图 13。可以看出, 当 $\alpha=90^\circ$ 和 $\alpha=155^\circ$ 时, 路径 E 上的应变都呈现先增大后减小再增大的趋势, 且最值均出现在浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置附近。综上, 在靠近浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置处应变路径 E 上的应变变化最剧烈。

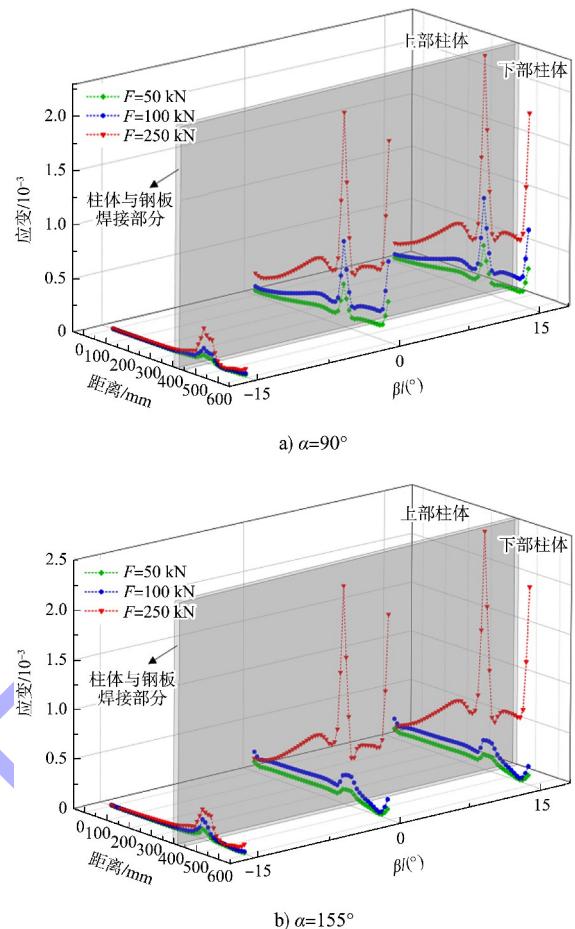


图 13 路径 E 上的应变分布

3.6 系船柱柱体外部路径 F 的应变变化规律

水平系统角度为 90° 、 155° 时路径 F 上的应变分布见图 14。可以看出, 当 $\alpha=90^\circ$ 和 $\alpha=155^\circ$ 时, 路径 F 上的应变都呈现先增大后减小再增大的趋势, 且当 $\beta=15^\circ$ 和 $\beta=0^\circ$ 时, 最值均出现在浮式系船柱空心圆柱体底端, 当 $\beta=-15^\circ$ 时, 最值均出现在浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置附近。综上, 在靠近浮式系船柱空心圆柱体底端位置处应变路径 F 上的应变变化最剧烈。但在浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置附近均出现了极值, 说明在靠近浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置处应变路径 F 上的应变变化也比较剧烈。

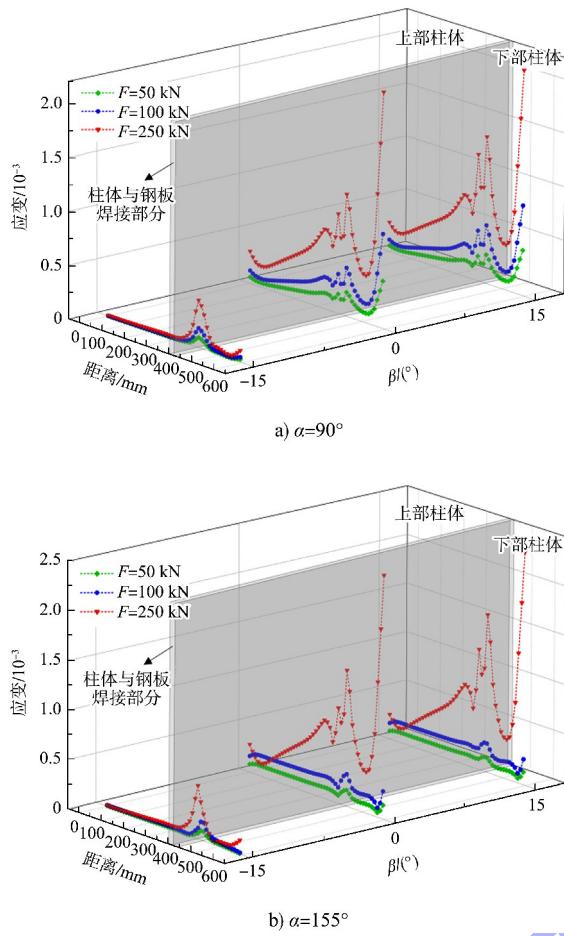


图 14 路径 F 上的应变分布

3.7 浮式系船柱受荷敏感区域确定

由路径 A~F 上的应变分布规律可知,浮式系船柱空心圆柱体柱身上的主要受荷敏感区域分布在靠近浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置附近,且越靠近浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置处应变变化越剧烈。

根据各路径上的应变分布规律,同时全面考虑应变计在安装后不能影响浮式系船柱正常使用的要求和应变计的实际结构尺寸,将受荷敏感区域的主要分析对象确定为距其上下边界各 20 mm 范围内的浮式系船柱空心圆柱体下端部分柱体,如图 15 所示。

通过统计路径 A~F 在浮式系船柱空心圆柱体下部柱体划定区域范围内的应变最值,并纵向对比浮式系船柱空心圆柱体柱身同一方向角度上的应变路径最值,可知柱身内外路径上的应变最值差别较小,即浮式系船柱空心圆柱体下部柱体

内外区域的受荷敏感性相差较小。

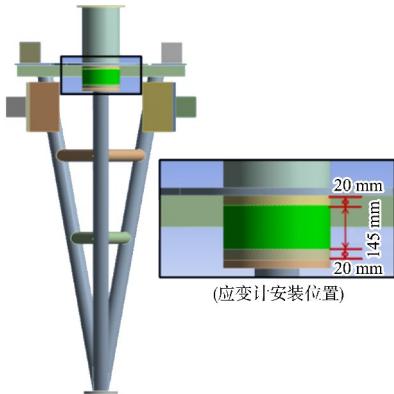


图 15 应变计安装位置

4 结论

- 本文建立浮式系船柱三维数值仿真模型,并通过对比简化计算理论模型和数值模拟计算的结果,验证了三维仿真模型的精度。
- 根据不同系统缆力大小和系统角度,研究浮式系船柱主要受力方向上各应变路径的应力应变状态,确定了浮式系船柱的受荷敏感区域在靠近浮式系船柱空心圆柱体与固定钢板焊接位置附近,为浮式系船柱应变计安装提供了参考标准。

- 本文对浮式系船柱的受荷敏感区域进行研究,结论可为浮式系船柱传感器布设位置和数量提供相关研究提供理论支撑和科学依据,为进一步研究浮式系船柱受力特征的监测提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 交通运输部水运局. 2018 年国内沿海货运船舶运力分析报告 [EB/OL]. (2019-02-12) [2020-03-26]. http://www.eworldship.com/html/2019/bulk_market_0212/146845.html.
- [2] 张义军,梅竞艳. 船舶大型化条件下的船闸管理对策[J]. 中国水运, 2015(7): 26-27.
- [3] 张星星,陈明栋,巴添. 新型浮式系缆装置关键技术及可靠性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 489-493.
- [4] 刘明维,曾丽琴,齐俊麟,等. 船闸浮式系船柱受力状态数值模拟[J]. 水运工程, 2020(12): 112-117.

- [5] 刘明维, 李明龙, 吴林键, 等. 船闸浮式系船柱受荷响应力学模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 127-132.
- [6] 刘明维, 王钟浩, 吴林键, 等. 船闸浮式系船柱系缆安全监测方法研究[J]. 水运工程, 2023(3): 85-91.
- [7] 刘明维, 李明龙, 吴林键, 等. 船闸浮式系船柱在线监测及预警系统研究概述[C]//海洋工程学会. 第二十届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 南京: 河海大学出版社, 532-536.
- [8] 孙刘林, 李海洋, 杜永春. 船闸浮式系船柱系缆桩动态拉力测量技术研究[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(8): 67-69, 109.
- [9] 杭震, 彭浩, 曹文卓, 等. 船闸浮式系船柱运行状态检测方法研究[J]. 机电工程技术, 2022, 51(12): 156-159, 193.
- [10] 刘步景, 徐亮, 李鹏飞, 等. 平原河网地区船闸水工结构维护检测技术分析[J]. 中国水运, 2021(9): 145-147.
- [11] 陈涛, 彭翰林. 大藤峡船闸闸室浮式系船柱埋件安装技术创新与实践[J]. 水利建设与管理, 2020, 40(5): 1-4, 8.
- [12] 吕慧. 龙洲垸船闸技术状况总体评估及建议[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(11): 251-252.
- [13] 水运规划设计院技术管理室. 系船柱构件通用设计编制说明[J]. 水运工程, 1978(12): 1-15.
- [14] 中国工程建设标准化协会水运专业委员会, 中交水运规划设计院有限公司. 码头附属设施技术规范: JTS 169—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

(本文编辑 王璁)

(上接第 49 页)

6 结论

1) 本文分析某斜坡式引堤项目的断面物理试验挡浪墙所受波浪力特征, 并与各波压力、浮托力理论方法计算结果进行比较可知, Martin 方法的冲击、脉动公式合力数值以及分布形态都与断面物理模型结果较为吻合, 推荐采用。

2) 挡浪墙水平波压力在掩护棱体上方达到最大值, 在掩护棱体上方和掩护棱体内都呈三角形分布, 在掩护棱体上方未掩护区域的衰减斜率较大, 而在棱体掩护区域斜率较小; 浮托力沿着挡浪墙底部线性减小, 在挡浪墙后沿根部并不为 0。

3) 挡墙采用 L 形结构, 可以使水平波压力在挡浪墙底部迅速减小, 因此挡浪墙根部位置的浮托力也相应减小, 从而导致整个挡浪墙底部受到的浮托力合力较小, 推荐折减系数可取 0.5~0.7。

4) 斜向浪对未掩护区域的折减效果显著, 对掩护区域的折减效果较差, 而对浮托力基本没有折减; 波向角越大, 折减系数越小; 折减后的波浪分布形态基本不变。

5) 由于挡浪墙所受波浪力影响因素复杂, 包

括波浪要素、掩护棱体外形尺寸、棱体粒径、挡浪墙形状等, 建议实际工程中应通过模型试验予以验证。

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [2] CIRIA, CUR, CETMEF. The rock manual: the use of rock in hydraulic engineering [M]. 2nd ed. London: CIRIA, 2007.
- [3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [4] 孙大鹏, 邢晨曦, 相才康, 等. 不同坡度下扭王字块斜坡堤胸墙受力的试验研究[J]. 水道港口, 2022, 43(6): 701-709.
- [5] 柳玉良, 韩炳辰, 李玉龙. 斜坡式防波堤护面对胸墙波浪力的影响[J]. 水运工程, 2010(8): 36-38.
- [6] 沈雨生, 孙忠滨, 周益人. 斜向波浪对斜坡堤胸墙作用力的试验研究[J]. 水运工程, 2018(1): 35-40.

(本文编辑 王璁)