



高吨级浮码头撑杆消能系统结构计算

禹精瑞, 王全, 陈哲, 袁楚阳

(中交武汉港湾工程设计研究院有限公司,

海工结构新材料及维护加固技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430040)

摘要: 高吨级浮码头撑杆消能系统普遍采用船舶撞击能量选取的橡胶护舷最大反力作为撑杆系统的设计荷载, 满足工程需要, 但并不经济。分析趸船被船舶撞击后的运动状态, 采用趸船第1次撞击撑杆的最大撞击能量为撑杆系统的设计依据; 通过研究护舷吸能、桩基吸能与护舷反力的关系, 揭示桩基悬臂长度、桩基直径、护舷选型对橡胶护舷吸能量占比、护舷反力的影响。结果表明: 橡胶护舷在消能系统中起主要作用, 吸能量占比通常超90%; 随着桩基悬臂长度增大, 橡胶护舷吸能量占比减小, 护舷反力也减小; 随着桩基直径增大, 橡胶护舷吸能量占比增大, 护舷反力也增大, 但影响较小; 随着护舷增大, 橡胶护舷吸能量占比略微减小, 护舷反力明显增大。

关键词: 浮码头; 撑杆墩; 护舷; 消能

中图分类号: U656.1+17

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0054-06

Structural calculation of pole energy dissipation system for high-tonnage floating wharf

YU Jingrui, WANG Quan, CHEN Zhe, YUAN Chuyang

(Hubei Key Laboratory of Advanced Materials & Reinforcement Technology Research for Marine Environment Structures, CCCC Wuhan Harbour Engineering Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: The maximum reaction force of the rubber fender selected by the ship impact energy is generally used as the design load in the energy dissipation system of the pole of high-tonnage floating wharf, which meets the engineering needs, but is not economical. The motion state of a pontoon after being hit by a ship is analyzed, and the maximum impact energy of the barge's first impact on the pole is used as the design basis for the pole system. By studying the relationship between energy absorption of fender, energy absorption of pile foundation and fender reaction, the influences of cantilever length of pile foundation, pile diameter and fender selection on energy absorption ratio of rubber fender and fender reaction are revealed. The results indicate that rubber fenders play a major role in energy dissipation systems, with energy absorption accounting for typically over 90%. As the cantilever length of the pile foundation increases, the proportion of energy absorbed by the rubber fender decreases, and the fender reaction force also decreases. As the pile diameter increases, the proportion of energy absorbed by the rubber fender increases, and the fender reaction force also increases, but the impact is relatively small. As the size of the fender increases, the proportion of energy absorbed by the rubber fender slightly decreases, and the fender reaction force significantly increases.

Keywords: floating wharf; pole pier; fender; energy dissipation

长江作为我国第一大河, 也是横贯我国东西的水运大动脉, 航运优势巨大, 对推动经济发展具有

十分重要的作用^[1]。2024年4月, 长江干线武汉—安庆段6 m水深航道整治工程通过交通运输部竣工

收稿日期: 2024-12-04

作者简介: 禹精瑞(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程结构设计和研究。

验收。根据2024年度长江干线主航道养护尺度标准,岳阳城陵矶—武汉长江大桥维护水深4.5 m,可通航5 000吨级货船;武汉长江大桥—安庆吉阳矶维护水深6.0 m,可通航1万吨级货船^[2]。随着航道等级的提升,码头泊位等级也需要与之相适应,5 000吨级及以上的浮码头应设置专门的消能设施^[3]。

应用最广泛的浮码头消能设施为定位桩结构(包括含定位桩的浮式消能设施)和撑杆消能系统,现有研究主要集中在定位桩结构^[4-7],撑杆系统的研究较少。杨玉勤^[8]认为钢撑杆消能设施在长江中下游地区适应性更好,趸船位移控制方面较桩式浮箱消能设施有优势,但并未对船舶撞击趸船后的能量分配和桩基变形本身的吸能做进一步研究。当前普遍采用设计船型撞击能量选取的橡胶护舷最大反力作为撑杆系统的设计荷载,满足工程需要,但经济性较差。本文拟对船舶撞击趸船后的运动状态进行分析,研究消能系统吸收的能量,并通过分析桩基与护舷之间的能量分配,可为合理选取撑杆系统的护舷及桩基提供参考。

1 撞击能量分析

忽略船舶与趸船间水体作用及趸船与船舶的变形吸能(假定为刚体),则船舶与趸船之间的撞击服从动量守恒及动能守恒,假定趸船初始速度为0 m/s,则有:

$$mv+m_1v_1=m_1v_0 \quad (1)$$

$$mv^2/2+m_1v_1^2/2=m_1v_0^2/2 \quad (2)$$

式中: m 为趸船排水量,kg; m_1 为船舶排水量,kg; v_0 为船舶撞击前速度,m/s; v_1 为船舶撞击后速度,m/s; v 为趸船撞击后速度,m/s。

碰撞后趸船的速度为:

$$v=2m_1V_0/(m_1+m) \quad (3)$$

船舶靠泊时,以一定速度靠泊撞击趸船后,船舶速度减小,趸船以一定速度与船舶分离,向岸侧撞击撑杆,撞击能量被护舷和撑杆墩桩基的变形吸收,趸船速度减为0 m/s,随后撑杆墩桩基和护舷变形恢复,推动趸船向水侧运动,再次与迎面船舶发生碰撞,如此反复几次,直至船舶停稳。由于趸船上的支撑点通常布置在趸船内舷两端距趸船端部5~10 m处,支撑点相距较远,且船

舶靠泊撞击靠近趸船端部位置,忽略远侧撑杆的吸能影响,趸船的第1次向撑杆系统的撞击应为最大撞击能量。撞击能量的公式为^[9]:

$$E_0=\rho mv^2/2=\rho m\left(\frac{2m_1V_0}{m_1+m}\right)^2/2 \quad (4)$$

式中: ρ 为有效动能系数; E_0 为趸船撞击能量,J。

2 撞击能量分配分析

2.1 桩基吸能分析

撑杆墩及撑杆刚度较大,忽略撑杆墩和撑杆对吸收能量的影响,趸船与撑杆系统撞击时,撞击能量由撑杆两端的护舷和桩基变形吸收^[10]。根据能量守恒原理,则有:

$$nE_1+2E_2=E_0 \quad (5)$$

式中: n 为撑杆墩桩基数量; E_1 为单根桩基吸收能量,J; E_2 为单个护舷吸收能量,J。

单根桩基受到水平力变形产生位移的公式为:

$$\omega_0=f l^3/(3E_c I) \quad (6)$$

式中: ω_0 为桩基顶部位移,m; f 为桩基所受水平力,N; l 为桩基悬臂长度,m; E_c 为桩基弹性模量,Pa; I 为桩基惯性矩,m⁴。

该桩基在水平力 f 作用下吸收能量的公式为^[11]:

$$E_1=\int_0^{\omega_0} f d\omega=\int_0^{\omega_0} 3\omega E_c I d\omega/l^3=3E_c I \omega_0^2/(2l^3)=f^2 l^3/(6E_c I)=f\omega_0/2 \quad (7)$$

由于单个撑杆墩桩基地质条件、入土深度基本一致,桩基承受水平力以及吸收能量基本相同,根据作用力与反作用力相等的原理,护舷产生的反力与撑杆墩所受到的撞击水平力相等,均为 nf 。

2.2 护舷吸能分析

本文采用高邮市华润橡胶厂生产的DA-A300H×1.5 m、SA-B300H、SA-B500H、SA-B600H标准反力型橡胶护舷,分别简称为A3、S3、S5、S6型橡胶护舷。

橡胶护舷反力随吸能量增加呈波浪形变化,即吸能量占比在20%以内,反力随吸能急剧增大,吸能量占比在20%~85%,反力变化较小,吸能量占比超过85%后,反力明显增大。对护舷反力与吸能量的相关关系进行4次多项式拟合,橡胶护舷反力与吸能量关系见图1。

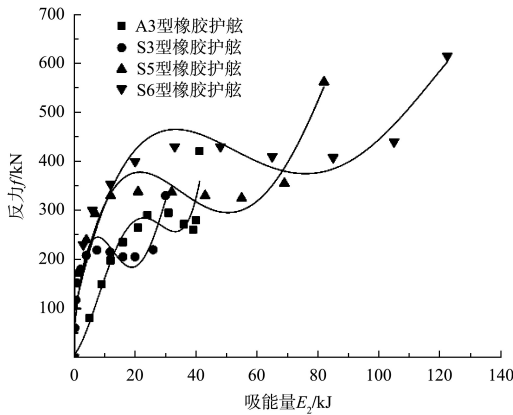


图1 橡胶护舷反力与吸能量拟合曲线
Fig.1 Fitting curve of rubber fender reaction force and energy absorption

由图1可得出 A3、S3、S5、S6 型橡胶护舷的拟合方程分别为:

$$f = 0.0013E_2^4 - 0.0917E_2^3 + 1.6750E_2^2 + 6.7197E_2 + 5.745 \quad (R^2 = 0.9277) \quad (8)$$

$$f = -0.0028E_2^4 + 0.2357E_2^3 - 6.3240E_2^2 + 60.7510E_2 + 54.824 \quad (R^2 = 0.8983) \quad (9)$$

$$f = -7 \times 10^{-5} E_2^4 + 0.0169E_2^3 - 1.2543E_2^2 + 33.4070E_2 + 86.749 \quad (R^2 = 0.9110) \quad (10)$$

$$f = -2 \times 10^{-5} E_2^4 + 0.0065E_2^3 - 0.7060E_2^2 + 28.2030E_2 + 92.356 \quad (R^2 = 0.9144) \quad (11)$$

3 案例计算

3.1 工程概况

荆州港某码头工程 3#、4#泊位为 5 000 吨级散货进口泊位。码头采用浮码头结构形式，每个泊位设置 1 艘 75.0 m×16.0 m×1.5 m (长×宽×吃水) 钢质趸船，趸船后沿中部通过 1 座 60 m×4.5 m (长×宽) 的活动钢引桥与转运楼相接，趸船内舷两端距趸船端部 7 m 处各设置 1 座撑杆消能系统。钢撑杆长 45 m，采用桁架结构，两端分别在撑杆墩和趸船上设置 1 套 A3 型橡胶护舷，撑杆墩采用钢筋混凝土结构，尺度为 6 m×6 m×3 m (长×宽×高)，基础采用 4 根直径 1 m 的钻孔灌注桩。码头平面布置见图 2 (5 000 t 货船尺度为 110 m×19.2 m×4.0 m)，撑杆消能系统结构见图 3。

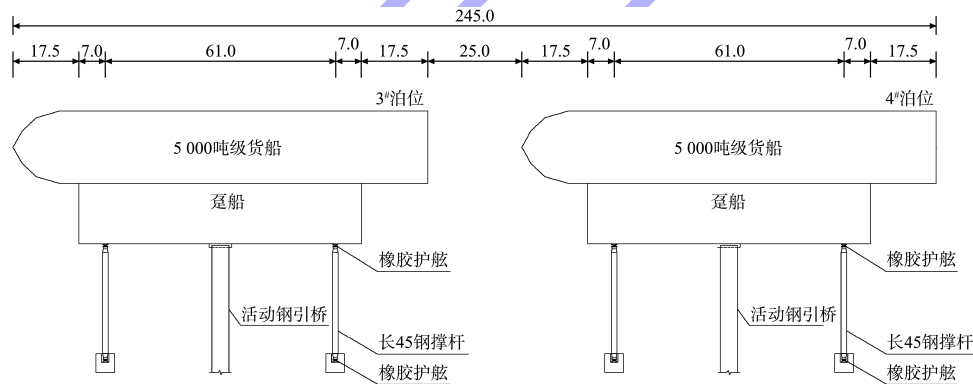


图2 平面布置 (单位: m)
Fig.2 Planar layout (unit: m)

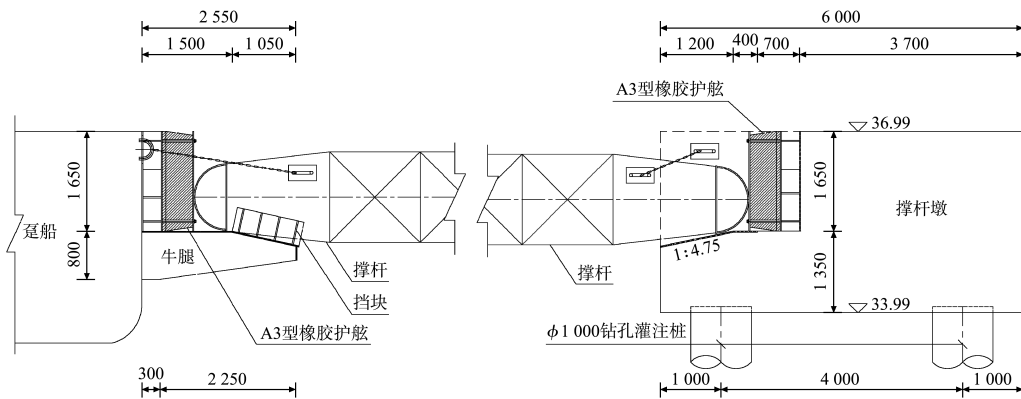


图3 撑杆消能系统结构 (高程: m; 尺寸: mm)
Fig.3 Structure of pole energy dissipation system (elevation: m; dimension: mm)

3.2 计算参数

5 000 吨级散货船满载排水量为 6 920 t, 设计法向靠泊速度为 0.17 m/s, 趸船的排水量为 1 800 t, 根据计算撑杆墩桩基顶部距离假想嵌固点深度为 8 m, 桩基采用 C35 混凝土, 桩基弹性模量 E_c 取 31.5 GPa, 桩基截面惯性距 $I=0.0491\text{ m}^4$ 。

3.3 撞击能量计算

根据式(3)计算得出趸船被船舶撞击后的速度 $v=0.27\text{ m/s}$, 并由式(4)计算得出趸船的撞击能量 $E_0=49.2\text{ kJ}$ 。

根据式(5)~(7)以及橡胶护舷反力与吸能量的拟合方程进一步求解护舷反力、护舷吸能量以及桩基吸能量, 桩基直径为 1.0 m, 桩基悬臂长度为 8 m, 则计算结果为: 单个护舷吸能量为 24.0 kJ, 单根桩基吸能量为 0.3 kJ, 护舷反力为 295.47 kN。此时护舷吸能量为该护舷最大吸能量的 58%。

3.4 结果分析

3.4.1 工况设计

为进一步分析桩基悬臂长度、桩基直径、护舷类型对护舷吸能量的影响, 采用控制变量法对不同因素进行计算, 工况设计见表 1。

表 1 工况设计
Tab.1 Working condition design

桩基悬臂长度/m	桩基直径/m	护舷类型
8、10、12、14	0.8、1.0、1.2、1.4	A3、S3、S5、S6

3.4.2 桩基悬臂长度的影响

根据不同桩基悬臂长度分别计算橡胶护舷吸能量以及桩基吸能量, 橡胶护舷吸能量占比以及护舷反力与桩基悬臂长度的关系曲线见图 4。

由图 4 可以看出, 悬臂长度 12 m 及以内时, 护舷吸能量占比超过 90%, 橡胶护舷吸能量占比随着桩基悬臂长度增大而减小, 变化范围在 87%~98%, 影响较大; 护舷反力也随着桩基悬臂长度增大而减小, 但影响较小。这是由于桩基悬臂长度增大时, 桩基柔性增大, 吸能量增大, 在总撞击

能量中橡胶护舷吸能量占比减小, 护舷反力也随之减小, 但变化并不显著。这是由护舷本身吸能量与反力为非线性关系决定的, 即吸能量占比在 20%~85% 时反力变化较小。

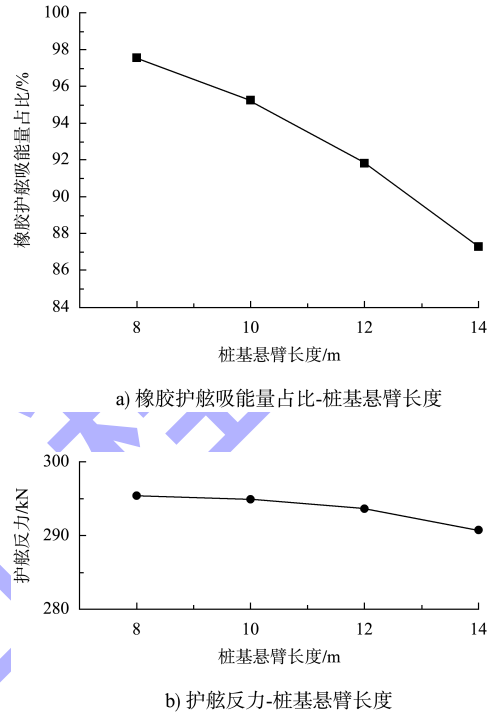
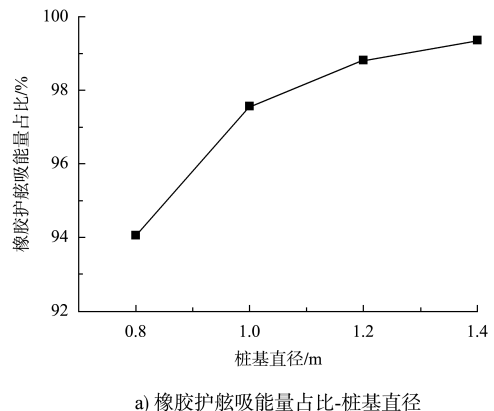


图 4 橡胶护舷吸能量占比、护舷反力与桩基悬臂长度的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of energy absorption ratio of rubber fenders, fender reaction force, and cantilever length of pile foundations

3.4.3 桩基直径的影响

根据不同桩基直径分别计算橡胶护舷吸能量以及桩基吸能量, 橡胶护舷吸能量占比以及护舷反力与桩基直径的关系曲线见图 5。



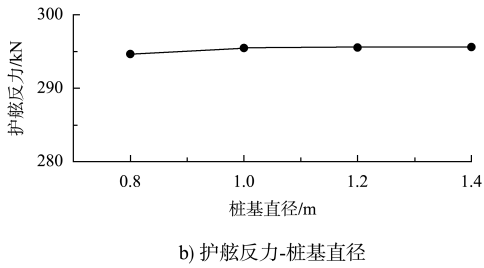


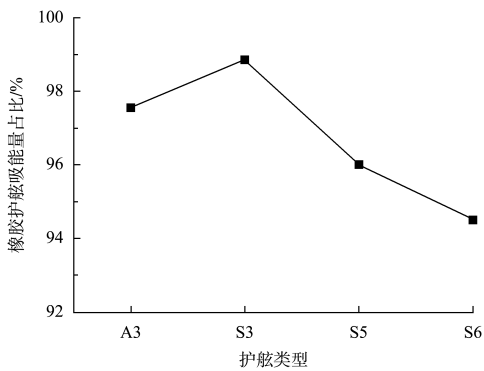
图 5 橡胶护舷吸能量占比、护舷反力与桩基直径的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of energy absorption ratio of rubber fenders, fender reaction force, and diameter of pile foundations

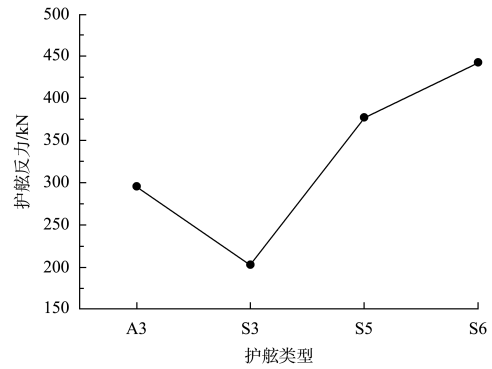
由图 5 可以看出，橡胶护舷吸能量占比随着桩基直径增大而增大，这是由于桩基直径增大时，桩基刚度增大，吸能量减小，在总撞击能量下，橡胶护舷吸能量占比增大，变化范围为 94%~99%，影响较小；护舷本身吸能量与反力为非线性关系，吸能量占比在 20%~85%时，护舷反力也随着桩基直径增大而增大，但影响较护舷吸能量更小。

3.4.4 护舷类型的影响

根据不同护舷类型分别计算橡胶护舷总能量以及桩基吸能量，橡胶护舷吸能量占比以及护舷反力与护舷类型的关系曲线见图 6。可以看出，同类护舷，随着护舷等级的提高，护舷反力增加，桩基吸能占比增大，橡胶护舷吸能量占比逐渐减小，变化范围为 94%~99%，影响不大；护舷反力也随着护舷等级提高而增大，变化范围为 203~442 kN，影响较大。



a) 橡胶护舷吸能量占比-护舷类型



b) 护舷反力-护舷类型

图 6 橡胶护舷吸能量占比、护舷反力与护舷类型的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of energy absorption ratio of rubber fenders, fender reaction force, and type of fender

4 结论

1) 船舶靠泊时，以一定速度靠泊撞击趸船后，船舶速度减小，趸船以一定速度与船舶分离，向岸侧撞击撑杆，撞击能量被护舷和撑杆墩桩基的变形吸收，趸船速度减为 0 m/s，随后撑杆墩桩基和护舷变形恢复，推动趸船向水侧运动，再次与迎面船舶发生碰撞，如此反复几次，直至船舶停稳。趸船的第 1 次向消能系统的撞击应为最大撞击能量，该能量可根据动能及动量守恒原理进行计算。

2) 趸船撞击撑杆系统的能量，可根据作用力与反作用力相等及能量守恒原理进行计算，橡胶护舷吸能量占比、护舷反力与桩基悬臂长度、桩基直径、护舷选型等因素有关，随着桩基悬臂长度增大，橡胶护舷吸能量占比减小，护舷反力也减小；随着桩基直径增大，橡胶护舷吸能量占比增大，护舷反力也增大，但影响较小；随着护舷增大，橡胶护舷吸能量占比略微减小，护舷反力明显增大。

3) 通常撑杆墩桩基悬臂长度不大，橡胶护舷在消能系统中起主要作用，在能量分配中通常承担超过 90%的撞击能量。因此，简化计算可不考虑桩基承担的撞击能量。

4) 由于各桩基承担撞击能量具有不平衡性，桩基结构计算时应考虑撞击不平衡系数，建议不小于 1.2；另建议将护舷厂家提供的护舷反力提高 10%作为设计荷载。

参考文献:

- [1] 叶红玲. 加快江海直达运输提升长江航运经济效益[J]. 中国水运, 2017(5): 13-14.
YE H L. Accelerating direct transportation between the Yangtze River and the sea to enhance the economic benefits of Yangtze River shipping [J]. China water transport, 2017(5): 13-14.
- [2] 蔡健哲, 徐言民, 金其强, 等. 长江武安段航道整治工程绿色施工评价指标体系研究[J]. 水运工程, 2024(10): 98-103.
CAI J Z, XU Y M, JIN Q Q, et al. Green construction evaluation index system for waterway regulation project in Wuhan-Anqing section of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2024(10): 98-103.
- [3] 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.
Design code for wharf structures: JTS 167-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [4] 屠红珍, 冯建国. 码头工程中双桩浮式消能设施设计[J]. 水运工程, 2006(6): 41-44.
TU H Z, FENG J G. Double-pile floating energy dissipating device design in wharf engineering [J]. Port & waterway engineering, 2006(6): 41-44.
- [5] 刘普, 万爱玉, 周伟, 等. 浮码头围船定位桩结构的设计与研究[J]. 水运工程, 2013(3): 101-108.
LIU P, WAN A Y, ZHOU W, et al. Structural design and research on positioning pile of pontoon wharf [J]. Port & waterway engineering, 2013(3): 101-108.
- [6] 齐同钦, 陈新, 王留洋. 柔性靠船桩簇结构受力计算[J]. 水运工程, 2015(8): 17-20.
QI T Q, CHEN X, WANG L Y. Structural stress calculation for flexible clustered fender piles [J]. Port & waterway engineering, 2015(8): 17-20.
- [7] 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(2): 90-101.
YANG S S, FAN Y B. Calculation of ship striking force to depending pile [J]. Hunan communication science and technology, 2003(2): 90-101.
- [8] 杨玉勤. 大水位差地区浮码头撑杆系统设计[J]. 港工技术, 2021, 58(4): 74-78.
YANG Y Q. Design of strut system for floating docks with large water head [J]. Port engineering technology, 2021, 58(4): 74-78.
- [9] 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
Load code for harbour engineering: JTS 144-1-2010 [S]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [10] 刘速. 钢簇桩设计中桩与护舷能量分配比例的计算[J]. 水运工程, 2008(4): 23-25.
LIU S. Calculation of energy allocation rate between piles and rubber fender in steel-pile cluster design [J]. Port & waterway engineering, 2008(4): 23-25.
- [11] 港口工程桩式柔性靠船设施设计与施工技术规程: JTJ 279—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Design and construction technical code for resilient pile facilities for port engineering: JTJ 279-2005 [S]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [11] 吴健, 张小飞, 陈丹, 等. 基于响应面法的型钢混凝土闸墩损伤可靠度分析[J]. 水利科技与经济, 2021, 27(9): 115-120.
WU J, ZHANG X F, Chen D, et al. Damage reliability analysis of steel reinforced concrete gate piers based on response surface methodology [J]. Water conservancy science and technology and economy, 2021, 27(9): 115-120.

(本文编辑 王璁)

(上接第53页)

- [8] 王德虎, 鲁子爱, 侯代云. 基于模糊层次分析法的高桩码头安全性评估[J]. 水运工程, 2013(1): 76-80.
WANG D H, LU Z A, HOU D Y. Safety evaluation of high-piled wharf based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Port & waterway engineering, 2013(1): 76-80.
- [9] 吴锋, 庞丹丹, 张章. 高桩码头运营期耐久性模糊评估方法[J]. 水运工程, 2013(2): 62-67.
WU F, PANG D D, ZHANG Z. Fuzzy evaluation for durability of high-pile wharf in service [J]. Port & waterway engineering, 2013(2): 62-67.
- [10] BOX G E P, WILSON K B. On the experimental

(本文编辑 赵娟)