

文章编号:1671-1637(2016)03-0046-09

连接索链弹性模量对防撞系统能量转换的影响

陈徐均,于伟,刘俊谊

(中国人民解放军理工大学野战工程学院,江苏南京 210007)

摘要:为了研究船舶与柔性浮式防撞系统碰撞过程中能量的转换关系,分析了连接索链弹性模量对系统消能作用的影响。在对数值计算模拟条件做出合理假设的前提下,基于能量守恒原理,模拟了船舶撞击柔性浮式防撞系统的运动过程,分析了不同连接索链弹性模量条件下重力锚位移的变化规律。基于位移相似与能量等量原则,建立了2种数学模型,比较了数值计算结果与试验结果的差异。分析结果表明:连接索链弹性模量衡量了其变形程度,是影响撞击过程中船舶动能转化为弹性势能的重要因素;在相同条件下,连接索链的弹性模量越大,连接索链越不易发生形变,船舶撞击系统过程中转化为弹性势能的动能就越小,转化为重力锚摩擦内能的动能就会越大,各重力锚的锚位移就会越大;通过数值计算结果与模型试验结果比较,模型试验中连接索链的弹性模量为260 GPa比较合适;在保证连接索链不发生断裂的前提下,索链的选取直接影响系统走锚的位移,从而影响柔性浮式防撞系统的拦阻效果。

关键词:桥梁工程;防撞系统;连接索链;弹性模量;能量转换;锚位移

中图分类号:U445.7 **文献标志码:**A

Influence of connecting cable chain's elastic modulus on energy conversion of flexible floating collision-prevention system

CHEN Xu-jun, YU Wei, LIU Jun-yi

(School of Field Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the energy conversion relations in the process of collision between ship and the flexible floating collision-prevention system (FFCPS), the influence of elastic modulus of connecting cable chain on energy dissipation was analyzed. Based on the basic principle of energy conservation, reasonable assumptions were made on the simulation conditions of numerical calculation, and the movement process of flexible floating collision-prevention system was simulated when the system was hit by ship. Under different elastic moduli of connecting cable chain, the changing rules of moving distances of gravity anchors were analyzed. 2 kinds of mathematical models were established based on the principle of similarity in displacement and equality in energy, and the numerical calculation results were compared with the experiment results. Analysis result indicates that the elastic moduli of connecting cable chain measure the deformation degree of cable chain, and it is an important influencing factor in the conversion between ship kinetic energy and elastic potential energy. Under the same conditions, the bigger the elastic modulus of connecting cable chain is, the harder the deformation of connecting cable chain is, the less the energy that ship kinetic energy converts into elastic potential energy is, the

收稿日期:2016-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51379213);国家科技支撑计划项目(2014BAB16B00)

作者简介:陈徐均(1972-),男,江苏南通人,中国人民解放军理工大学教授,工学博士,从事浮式工程结构流固耦合动力学研究。

more the energy that ship kinetic energy converts into friction energy is, and the longer the moving distance of gravity anchor is. Through the comparison between numerical calculation results and experiment results, the suitable value of elastic modulus of connecting cable chain in model test is 260 GPa. To be sure that the connecting cable chain cannot be broken, the selection of cable chain directly affects the moving distance of system anchor, thus affects the arresting effect of flexible floating collision-prevention system. 4 tabs, 8 figs, 27 refs.

Key words: bridge engineering; collision-prevention system; connecting cable chain; elastic modulus; energy conversion; moving distance of anchor

Author resume: CHEN Xu-jun(1972-), male, professor, PhD, +86-25-80821315, chenxujun213@sina.com.

0 引言

在交通航运业突飞猛进、桥梁建设快速发展的今天,桥梁防撞技术受到了众多学者的关注。船舶撞击问题伴随有大量的能量损耗,用能量方法分析船舶碰撞问题得到了诸多学者的认同^[1-3]。近些年船舶撞击桥梁事故频繁发生^[4-5],为了防止船舶对桥梁的撞击,多种不同类型的保护桥梁结构的防撞设施应运而生^[6-8]。吴广怀等设计了由多个锚泊浮体结构相连接构成的走锚消能式柔性防船舶碰撞系统^[9],并申请了专利,这是一种针对于非通航孔桥段防护^[10-11]的桥梁防撞设施,具有经济耐用、架设简便、有利于保护撞击船舶与防护范围大等多种优点^[12]。

柔性浮式防撞系统(Flexible Floating Collision-Prevention System, FFCPS)主要是通过系统重力锚滑移走锚,消耗撞击船舶的运动动能,工作原理十分简单。陈徐均等研究了船舶撞击锚泊防撞系统过程中的能量平衡关系,根据动能定理和锚链力求解方程,计算船舶正面撞击锚泊拦阻系统时锚泊系统的动能和力做的功,主要考虑船舶的动能、锚与海底的摩擦力做的功以及锚链力做的功,在模型试验的基础上进行分析,结果表明船舶的动能变化量基本上等于摩擦力和锚链力做功之和^[13]。本文分析了能量转换的细节问题,将能量不完全守恒问题归因为连接索链的弹性消能作用对于系统能量转换的影响。陈徐均等研究了柔性浮式防撞系统受撞击后的变形与位移,提出了一种微调平衡算法,利用悬链线的物理几何特性求解系统中各部件的受力,根据系统中各部件所受的合力(矩)实时微调系统的工作姿态,利用力(矩)的平衡原理,通过多次叠代计算求解系统在受船舶撞击后各浮筒的姿态变化、锚的位移和各时刻拦阻链的受力,理论分析与相关算例的数值结果均表明算法可用于锚泊多浮体系统受船舶撞击后运动的计算^[14-15]。

本文基于微调平衡算法,对连接索链的消能作用进行分析,在船舶撞击系统后的运动过程中,系统构件的运动是十分复杂的,构件之间通过连接索链柔性连接,运动相互制约,连接索链消能作用虽然不是主要消能形式,但弹性变形的影响不可忽视。

连接索链在系统中起到连接其他组成构件的作用,索链提供的作用力直接影响到系统的整体运动。研究系泊索链特性的方法众多,包括集中质量法^[16-18]、有限差分法^[19-21]、有限单元法^[22]等。目前,柔性构件分析主要向各种非线性计算与高度瞬态计算方向发展,并重点关注索链的疲劳及破断强度和能量。在柔性索链弹性模量的研究方面,Freire等基于变弹性模量数值计算方法,研究了斜拉桥缆索的非线性问题,研究表明钢索的几何非线性会影响索链的性能,包括钢索的弹性模量^[23];Daniell等研究了改良斜拉桥缆索的设计,认为斜拉索的下垂会改变其弹性模量,在计算斜拉索受力过程中需要考虑弹性模量的改变^[24]。柔性浮式防撞系统的连接索链与斜拉桥缆索有一定程度上的相似性,可以推测连接索链的弹性模量也会以索链拉力为直接表现形式,成为影响系统综合性能的一个因素。罗伟铭等基于冲击动力学理论和ANSYS/LS-DYNA软件分析了钢丝增强复合条带,研究表明材料的弹性模量会影响其能量吸收量作用^[25];李斌等用能量法计算线弹性结构位移,通过理论推导,在结构位移与能量之间建立了联系^[26];李啟定等对微位移工作台柔性铰链影响参数进行了分析和优化,以能量法为依据,分析了系统组成部分对系统整体的影响^[27]。

综合考虑以上学者对材料弹性变形与能量之间关系的研究,可以认为连接索链的弹性模量将会影响到柔性浮式防撞系统能量的转化。为了完善系统受撞击过程的能量平衡方程,本文对连接索链的弹性模量进行研究,成果将为柔性浮式防撞系统的设

计提供指导。

1 碰撞能量转换关系分析

柔性浮式防撞系统^[9]由浮筒、连接索链、锚泊系统等组成,见图 1。连接索链的弹性模量是系统设计需要考虑的因素之一。系统遭受船舶撞击的模型试验见图 2,受撞部位的浮筒和拦阻锚链将受到船舶作用力,并由连接索链传递到锚泊系统。

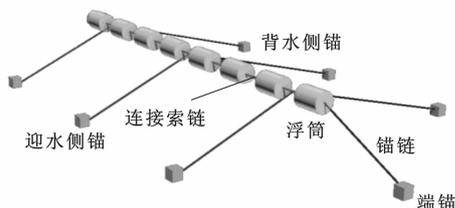


图 1 柔性浮式防撞系统

Fig. 1 Flexible floating collision-prevention system



图 2 柔性浮式防撞系统模型试验

Fig. 2 Model test of flexible floating collision-prevention system

在系泊锚链的张力作用下,锚依次从最靠近撞击部位向两侧逐次开始走锚,消耗船舶动能,同时连接索链张紧,以弹性势能的形式消耗船舶动能。两者共同作用,达到降低船舶速度、拦停失控船舶的效果。依据柔性浮式防撞系统的工作原理和能量守恒关系^[27],撞击过程中的能量关系为

$$E_1 = E_2 + E_3 + E_4 \quad (1)$$

式中: E_1 为船舶撞击的初动能; E_2 为所有锚滑动产生的摩擦内能; E_3 为系统连接索链产生的弹性势能; E_4 为碰撞过程中由船舶动能转化的其他能量。

根据碰撞过程中的能量转换关系,可以认为在同一次相同状况的碰撞过程中,船舶的动能与其他能量差值的大小是相同的,所以在条件相同的碰撞中,所有锚产生的摩擦内能和系统连接索链产生的弹性势能的总和不变。所有锚产生的摩擦内能与碰撞过程中各锚的质量和锚位移直接相关,对于确定的拦阻系统,各锚的质量是确定的,试验中第 i 个锚的位移为 D_i ,锚位移与系统摩擦内能的函数关系为

$$E_2 = f(D_i) \quad (2)$$

连接索链的弹性势能与其弹性变形相关。在柔性浮式防撞系统中,连接索链在撞击过程中起到连接传力的作用。在计算连接索链的拉力时,可以考虑连接索链的自重,运用悬链线方程求解连接索链的拉力。连接索链除了提供水平方向的拉应力外,还提供竖直方向的作用力,竖直方向作用力与连接索链的自重相等。

连接索链的受力见图 3; s 为连接索链两端的链距; l 为连接索链的实际长度; h 为连接索链端部与最低点的高度差; T_1 、 T_2 分别为连接索链两端的预张力; H_1 、 H_2 分别为连接索链两端水平方向拉力; V_1 、 V_2 分别为连接索链两端竖直方向拉力。

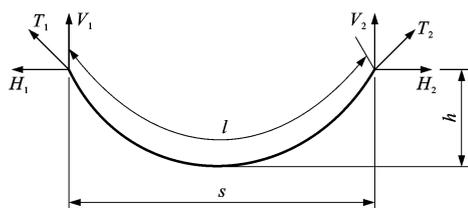


图 3 连接索链受力

Fig. 3 Forces of connecting cable chain

在没有受到撞击时,系统要保持在较为稳定的状态,所以连接索链有一定的预张力,预张力使得系统能够在水流和风浪等外力的作用下保持相对的稳定状态。预张力直接决定了连接索链悬链线的形状。由于维持系统相对稳定的水平方向预张力不能过小,分析可知 $H_1 \gg V_1$ 。根据连接索链受力分解关系分析,连接索链链端与最低点的高度差 h 不会很大,可以认为 h 远远小于连接索链两端的链距 s ,所以连接索链的水平拉力远远大于竖直方向的拉力,可以忽略连接索链的自重,用线弹性模型来模拟连接索链的受力,即连接索链提供拉力的变化量与连接索链两端距离的变化量成正比关系,连接索链弹性势能为弹性模量与变形量平方的乘积^[27]。在相同工况下船舶撞击防撞系统过程中,由于外界环境的影响,连接索链的总变形量略有不同,但相同条件下总变形量差别不大。由于系统中连接索链数量较多,所以统计连接索链长度的变化较为不易,可以用连接索链的弹性模量来衡量船舶动能转化为连接索链弹性势能。将弹性势能 E_3 与连接索链的弹性模量 E_5 的函数关系表示为

$$E_3 = G(E_5) \quad (3)$$

2 数学模型

根据船舶碰撞过程中的能量转换关系,撞击过

程中船舶的动能与其他能量的差值为走锚消耗摩擦内能与连接索链弹性势能的总和,而走锚消耗的内能与所有锚的质量和锚位移相关,连接索链弹性势能与变形量及其弹性模量相关。在碰撞过程中,弹性势能与摩擦内能的总和 Q 可以表示为

$$Q = f(D_i) + G(E_s) \quad (4)$$

为了研究船舶撞击系统的运动过程,可以通过受力分析和运动分析的方法,将撞击过程分为多个微小步骤进行数值模拟。在数值模拟过程中,假设如下。

(1)在船舶正撞过程中,船舶运动方向不会因为外界因素发生偏转。

(2)试验水池底部动摩擦因数恒定。

(3)可以运用线弹性理论计算连接索链受力。

(4)在撞击过程中水阻力为主要外力,忽略其他外力对于系统运动的影响。

(5)组成系统的多条连接索链有统一的弹性模量。

数值模拟方法的建立,可以通过改变系统各部件的设置,分析系统的碰撞过程。在数值模拟撞击过程中,采用时间微段分析的方法^[14],假设撞击过程中,各部件在每个时间微段内总是在趋于受力最小的近平衡位置,从撞击处依次调整系统各个构件的位置与姿态。随着船舶撞击的逐步进行,将时间微段连续处理,模拟出最终的撞击过程。将数值模拟结果与试验结果进行对比分析,总结出各系统构件发挥的作用,归纳出规律进行系统的有效设计。为了分析连接索链弹性模量对于系统消能作用的影响,建立 2 种数学模型进行对比分析。

2.1 位移相似模型

为了分析连接索链弹性模量对系统能量转换的影响,需要综合多种工况的计算数据。在系统设定后,系统中各个锚的质量和连接索链弹性模量已确定,弹性势能与摩擦内能的总和 Q 与各锚的锚位移和连接索链的弹性模量相关。

对于不同工况的试验,式(4)中的变量只有锚位移与连接索链弹性模量,所以可以认为两者有对应关系。最合理的弹性模量应当使数值模拟中各锚的锚位移与试验中相同工况下的锚位移最接近。考虑各计算工况的锚位移,对比试验数据和数值模拟数据,以两者各锚的锚位移方差最小为目标函数,建立数学模型

$$A_1 = \min \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (D_{ij} - d_{ij})^2 \quad (5)$$

约束方程为

$$\begin{cases} Q_{bj} = f(d_{ij}) + G(E_{bj}) \\ Q_{aj} = f(D_{ij}) + G(E_a) \end{cases} \quad (6)$$

式中: A_1 为位移相似模型目标函数; E_{bj} 为数值模型计算工况 j 的弹性模量; E_a 为试验工况中连接索链的弹性模量; D_{ij} 为试验工况 j 中第 i 个锚的锚位移; d_{ij} 为数值模型计算工况 j 中第 i 个锚的锚位移; Q_{bj} 为数值模型计算工况 j 中弹性势能与摩擦内能的总和; Q_{aj} 为试验工况 j 中弹性势能与摩擦内能的总和。

2.2 能量等量模型

在位移相似模型中,虽然是以撞击过程中的能量转化守恒为前提,但是以各锚的锚位移相同或相近为模型的最终量度。如果以能量等量为模型的最终量度,建立能量平衡关系的数学模型,可能会更加合理。在能量等量模型中,认为船舶在撞击过程中船舶动能转换为各锚摩擦内能的总和是相同的。以数值模拟摩擦内能与模型试验摩擦内能两者方差最小为目标函数,建立能量等量模型为

$$A_2 = \min \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n [m_i g \mu (D_{ij} - d_{ij})]^2 \quad (7)$$

式中: A_2 为能量等量模型目标函数; m_i 为第 i 个锚的质量; g 为重力加速度; μ 为滑动摩擦因数。

能量等量模型的约束方程同式(6)。

3 模型试验

为了分析船舶碰撞柔性浮式防撞系统后的能量转换关系,进而分析连接索链弹性模量对于系统碰撞过程的影响,以相关模型试验数据为依据^[15]进行试验。在模型试验中试验水池的水深为 0.25 m,采用了大、小 2 种船舶模型,分别在 0.357、0.275 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水流速度下撞击系统,共 4 种工况,见表 1。

表 1 试验工况

Tab. 1 Test conditions

工况	船舶模型	水流速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	大	0.357
2	大	0.275
3	小	0.357
4	小	0.275

原型与模型之间的设计缩尺为 40,按照重力相似准则,采用模型试验模拟对应的实际情况中的水深为 10 m,船舶的撞击速度约为 2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。2 种船舶模型的参数见表 2。按照重力相似准则,采用模型试验模拟对应的船舶实际吨位约为 7 500 t。

表2 模型参数

Tab.2 Parameters of models

船舶模型	质量/kg	长度/m	宽度/m	船舶水下部分垂直于水流方向的投影面积/m ²	船舶吃水线以下的表面积/m ²	船舶吃水深度/m
大	117.3	1.3	0.35	0.15	0.31	0.15
小	70.4	1.2	0.30	0.16	0.25	0.17

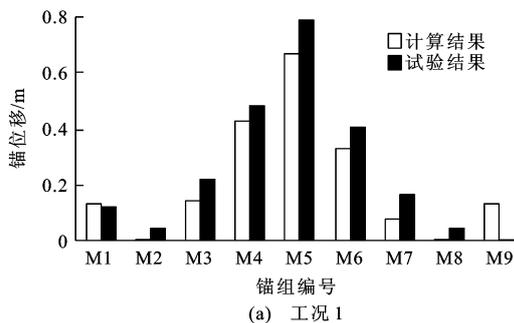
在模型试验中,锚为单个或多个串联的等质量正方体混凝土块,每个混凝土块与试验水池底部的最大摩擦力和动摩擦力均为 1.023 7 N。为了增大锚泊系统的拉力,发挥各自的锚泊作用,将单个混凝土块依次串联组成不同位置的锚。迎水侧锚组由 3 个混凝土块串联构成,背水侧锚由单个混凝土块构成,两端锚组由 10 个混凝土块串联构成。浮筒为不锈钢制成的空心圆柱体,长度为 0.12 m,直径为 0.12 m,吃水深度为 0.05 m。连接索链和锚链为细铁链,等效截面积为 0.21 mm²,连接索链的长度见表 3。

表3 连接索链长度

Tab.3 Lengths of connecting cable chains m

长连接索链	短连接索链	端部锚链	迎水侧锚链	背水侧锚链
0.15	0.075	1.5	3.0	1.0

船舶模型在无动力状态下顺水流方向漂流而下(正撞时船舶纵轴平行于水流方向)撞击柔性浮式防撞系统靠近中间的第 13 个浮筒,当船舶模型被拦阻停下后,将船舶模型拉走,用钢尺测量锚的位移,试验结果见图 4,其中 M1、M9 为 2 个端部锚组的锚位



(a) 工况 1

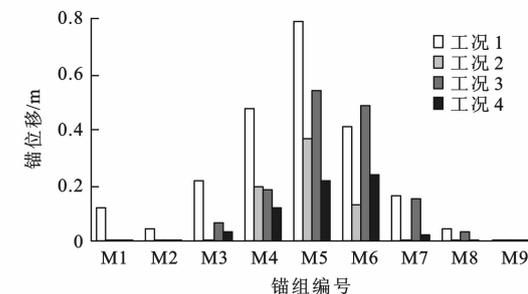


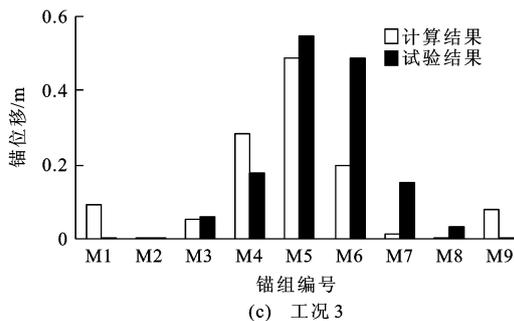
图4 模型试验的锚位移

Fig.4 Moving distances of anchors in model test

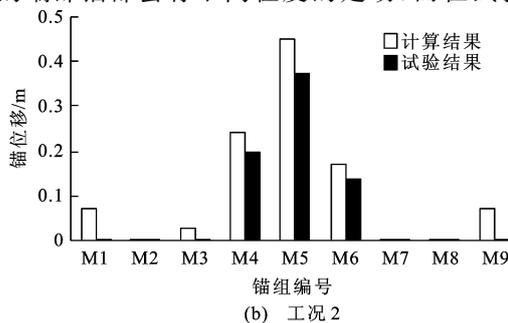
4 算例分析

根据能量转换分析,撞击过程中摩擦内能的转换与锚位移相关,连接索链的弹性势能与弹性模量相关,并且两者的总和在同一工况下是一定的。假定试验中连接索链的弹性模量为 200 GPa,根据运动学基本规律,运用数值模拟方法模拟船舶碰撞过程,在 4 种工况下,计算得到的各锚的锚位移与试验结果的对比见图 5。

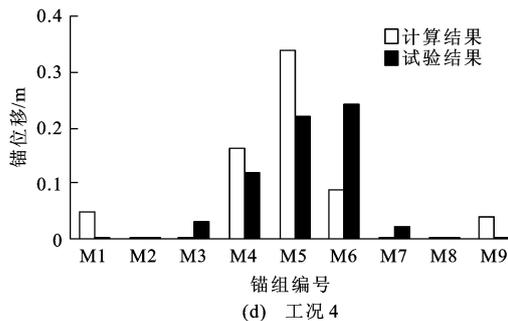
数值模拟结果与试验结果存在差异,如计算结果的端部锚都会有不同程度的走动,而在试验结果



(c) 工况 3



(b) 工况 2



(d) 工况 4

图5 数值计算与试验得到的锚位移比较

Fig.5 Comparison of moving distances of anchors between numerical calculation and experiment

中,除了工况 1 中 M1 端锚有滑动外,其他工况的端锚都没有明显的滑动,这是由于试验中连接索链的张紧程度没有具体量化。在本文计算中,以线弹性模型分析连接索链受力,并且均假设连接索链有一定的预张力。在连接索链弹性模量很大并且有很大预张力的情况下,船舶撞击拦阻系统,必定会发生端锚的走锚。另外,计算假设中认为船舶模型不会发生偏转,所以计算结果中两侧的端锚位移比较对称。在试验过程中,由于外界因素的作用,船舶模型会有偏转的状况发生。在工况 1 中,船舶模型向右侧偏转,所以左侧的锚 M1 发生明显滑移,而右侧端锚没有滑动;在工况 4 中,船舶模型明显向右侧偏转,导致靠近撞击点的锚 M5 没有临近的锚 M6 的滑移大。从计算结果中看出,在相同的假设条件下,不同工况中各个锚的锚位移基本与位置变化规律相同。按照船舶模型不发生偏转的假设,同一工况中迎水侧锚的锚位移按照从大到小排列,顺序为 M5、M4、M6、M3、M7、M2、M8。在两侧的端锚中,M1 的锚位

移比 M9 的锚位移略大,因为撞击位置更加靠近 M1。

从 4 种工况综合对比结果中发现,连接索链的弹性模量为 200 GPa 时,数值计算结果与试验结果的锚位移有一定的差异。为了让计算结果更加真实,令连接索链的弹性模量从 100 GPa 逐渐增大至 800 GPa,工况 1 的数值模拟碰撞过程的锚位移见表 4。从计算结果中可以看出:随着连接索链弹性模量的变化,在工况 1 下,各锚的锚位移差异较大,对于锚位移最大的 M5,试验结果的锚位移为 0.79 m,计算结果的锚位移为 0.48~0.89 m,因此,碰撞过程中不能忽略连接索链弹性模量对于系统消能的影响;随着连接索链弹性模量的不断增大,各锚的锚位移也逐渐增大;锚位移大,则由船舶模型的动能转化的摩擦内能就多,根据能量守恒的原理,撞击过程中转化的弹性势能就小;连接索链的弹性模量衡量了连接索链的变形难易程度,弹性模量越大,索链变形越不容易,撞击过程中船舶模型的动能转化为弹性势能的能量就越小,转化为摩擦内能的能量就越多。

表 4 不同弹性模量的锚位移

Tab. 4 Moving distances of anchors under different elastic moduli

弹性模量/ GPa	锚位移/m								
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
100	0.09	0.00	0.02	0.25	0.48	0.16	0.00	0.00	0.09
200	0.13	0.00	0.14	0.43	0.67	0.33	0.08	0.00	0.13
300	0.15	0.01	0.20	0.50	0.74	0.40	0.14	0.00	0.14
400	0.16	0.01	0.24	0.55	0.79	0.45	0.17	0.00	0.15
500	0.17	0.03	0.26	0.58	0.83	0.49	0.20	0.01	0.16
600	0.18	0.04	0.28	0.61	0.86	0.51	0.22	0.01	0.17
700	0.18	0.05	0.30	0.62	0.88	0.53	0.23	0.02	0.17
800	0.18	0.05	0.31	0.64	0.89	0.54	0.24	0.02	0.18

图 6 为工况 1 中 M5 在不同弹性模量条件下的锚位移:在连接索链的弹性模量由 100 GPa 增大至 800 GPa 的过程中,M5 的锚位移由 0.48 m 增大为 0.89 m;在变化的过程中,连接索链的弹性模量等步长增大,但是锚位移的变化规律却是初期变化较大,后期变化较小,弹性模量分别为 700、800 GPa 时,M5 的锚位移极为相近;按照这样的趋势,可以推测出当连接索链的弹性模量增大到一定程度后,连接索链将成为完全的刚体,不发生弹性变形,这时船舶的撞击动能更多地转化为锚的摩擦内能,各锚组的锚位移最大。

在数值模拟船舶碰撞过程中,计算量比较大,计算时间较长。理论分析和表 4 中数据都表明:连接索链弹性模量的增加与锚位移的增加具有单调性,

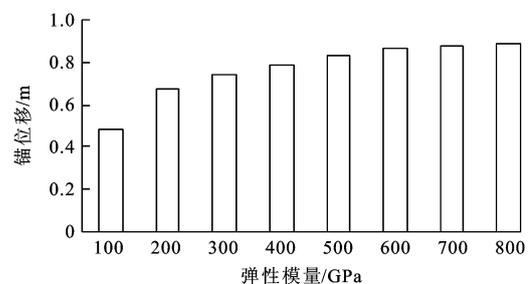


图 6 不同弹性模量下 M5 的锚位移

Fig. 6 Moving distances of M5 under different elastic moduli

所以对没有计算的弹性模量与锚位移,可以根据已有的数值进行插值。计算中得到了每种工况下 8 个弹性模量与锚位移的对应关系,插值后可以得到 71 个相互对应关系。分别运用位移相似模型与能量等量模型分析 71 组计算结果。在能量等量模型

中,将质量与摩擦因数以比值的形式代入约束条件,可以将运算简化,同时方便与位移相似模型进行比较。在模型试验中,迎水侧锚组各由 3 个混凝土块串联构成,两端锚组各由 10 个混凝土块串联构成,因此,计算能量等量模型时,将端锚的锚位移放大 3.33 倍,可以将计算简化。计算得到不同数学模型中弹性模量与目标函数值的关系见图 7。

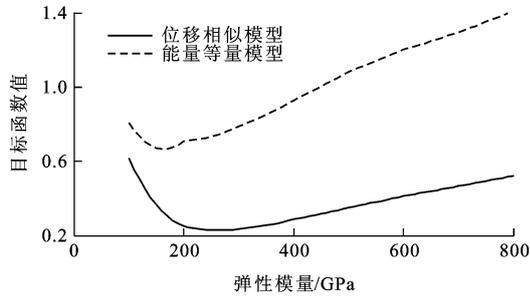


图 7 目标函数值比较

Fig. 7 Comparison of objective function values

通过 2 种数学模型计算结果比较,可以看出:采用 2 种模型得出的结论略有不同,在位移相似模型中,要求各锚的锚位移与试验中的锚位移最相近,当目标函数达到最小值 0.229 时,选定的连接索链的弹性模量为 260 GPa;在能量等量模型中,要求各锚产生的摩擦内能与试验结果最相近,当目标函数达到最小值 0.667 时,选定的连接索链的弹性模量为 160 GPa。将 2 种数学模型的计算结果与试验结果进行比较,结果见图 8。

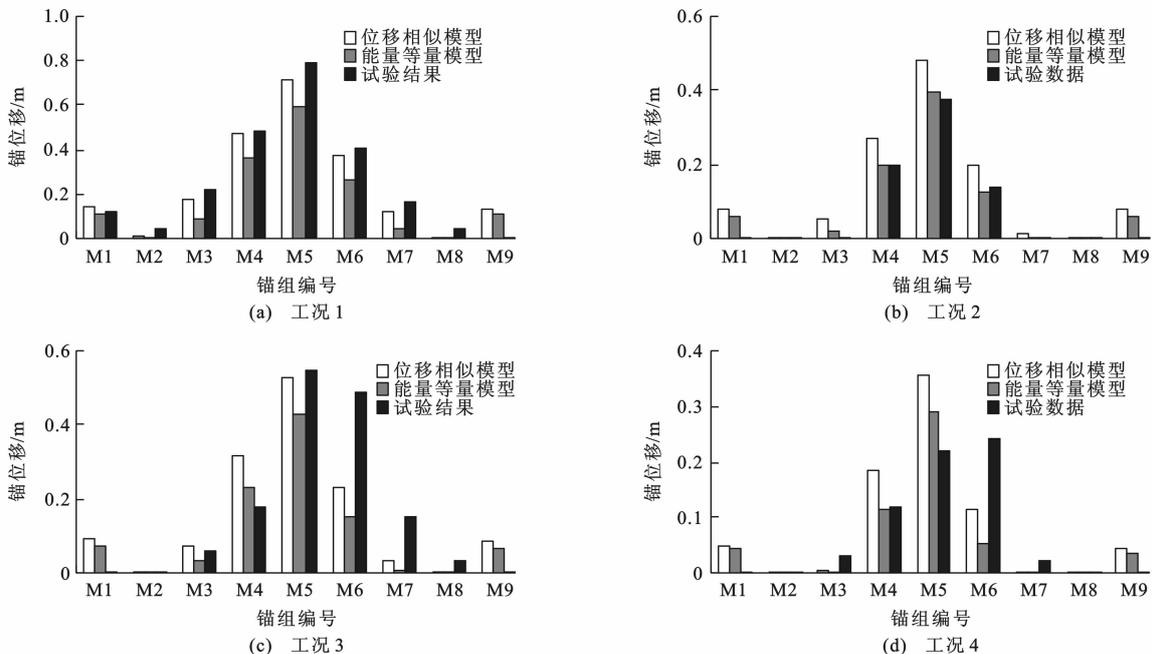


图 8 数学模型与试验得到的锚位移比较

Fig. 8 Comparison of moving distances of anchors between mathematical models and experiment

在 2 种数学模型的计算结果中,虽然选择弹性模量不同,但端锚的锚位移基本相同。综合考虑 4 种工况的锚位移偏差可以看出:在工况 2 中,能量等量模型计算结果与试验结果较为接近,其余工况中位移相似模型的计算结果与试验结果更为相近。综合考虑多种工况,选取位移相似模型的结果,认为试验模型中连接索链的弹性模量为 260 GPa。在能量等量模型中运用的是能量等量原理,由于在数值模拟撞击过程中,系统的端锚都有不同程度滑移,而且端锚质量较两侧锚质量大,所以即使端锚滑移位置很小,也会对最终的结果造成较大的影响。

由图 8(a)中可以直接看出:弹性模量为 260 GPa 时,计算结果与模型试验十分接近,而且模型试验各锚的锚位移也符合分析的规律,即各个锚的锚位移呈比例变化;在图 8(b)中,模型试验各锚的锚位移同样符合分析的规律,选择弹性模量为 260 GPa 时,各锚的锚位移都偏大,可能的原因,在试验中实际流速比 $0.275 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 要稍小,使得水流对船舶模型的推力小,导致试验结果偏小;在图 8(c)、(d)中,船舶模型都发生了不同程度偏转,在图 8(c)中 M6 的锚位移大于 M4 的锚位移,说明船舶模型向右偏转,图 8(d)中偏转更加严重,造成了 M6 的锚位移大于 M5 的锚位移。通过计算结果比较发现,在弹性模量为 260 GPa 时,计算结果较优,后续相关研究的分析可基于此弹性模量进行。

5 结 语

(1)根据柔性浮式防撞系统受船舶碰撞后的能量转换守恒原理,在一定假设的基础上,模拟了船舶碰撞拦阻系统的运动过程。试验与计算结果的对比证明了数值计算方法的合理性和正确性。通过建立位移相似模型和能量等量模型,分析试验数据与计算数据,得出以下结论:连接索链的弹性势能会吸收撞击的能量,影响到锚的锚位移,所以碰撞过程中不能忽略连接索链弹性消能的影响;连接索链弹性模量是影响撞击过程中船舶动能转化为弹性势能的一个重要因素,在同一条件下,连接索链的弹性模量越大,撞击过程中转化为弹性势能的能量就越小,各锚的锚位移就会越大;在保证连接索链不发生断裂的前提下,索链材料的选取会直接影响系统走锚的位移,从而影响系统的拦阻效果。

(2)研究方法基于对柔性浮式防撞系统运动的数值模拟计算结果,通过与试验结果比较,运用数学模型确定试验中连接索链的弹性模量应为260 GPa。研究方法可以运用于浮式防撞系统的设计阶段,并指导工程实践。在需要连接索链的弹性变形吸收更多能量的情况下,可以根据理论计算合理选取弹性模量小的材料。

(3)连接索链变形消能与材料的弹性模量、索链的截面积直接相关,文中没有考虑二者的相互影响因素。在柔性浮式防撞系统的设计过程中,需要同时考虑连接索链的强度要求和需要达到的消能效果,更深入地研究更加优化、合理的设计方法。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 王汉伟. 桥梁受船舶撞击分析[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.
WANG Han-wei. Analysis of the ship-bridge collision[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [2] WANG Li-li, YANG Li-ming, TANG Chang-gang, et al. On the impact force and energy transformation in ship-bridge collisions[J]. International Journal of Protective Structures, 2012, 3(1): 105-120.
- [3] 郝二通,柳英洲,柳春光. 海上风机单桩基础受船舶撞击的数值研究[J]. 振动与冲击,2015,34(3):7-13.
HAO Er-tong, LIU Ying-zhou, LIU Chun-guang. Numerical simulation of monopile foundation of an offshore wind turbine subjected to ship impact[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(3): 7-13. (in Chinese)
- [4] YUN H, NAYERI R, TASBIHGOO F, et al. Monitoring the collision of a cargo ship with the Vincent Thomas Bridge[J].

- Structural Control and Health Monitoring, 2008, 15(2): 183-206.
- [5] FAN Wei, YUAN Wan-cheng. Ship bow force-deformation curves for ship-impact demand of bridges considering effect of pile-cap depth[J]. Shock and Vibration, 2014, 2014(2): 1-19.
- [6] LEI Zheng-bao, CHEN Zhu, LEI Mu-xi, et al. Research on safety technology for initiative anti-collision of bridge[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 204-208: 2196-2199.
- [7] ZHU Bin, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Impact model tests and simplified analysis for flexible pile-supported protective structures withstanding vessel collisions[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2012, 138(2): 86-96.
- [8] CHANG Liu-hong, JIANG Chang-bao, LIAO Man-jun, et al. Nonlinear dynamic response of buoys under the collision load with ships[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 204-208: 4455-4459.
- [9] 吴广怀,于群力,陈徐均. 非通航孔桥的大距离走锚消能式防撞系统[J]. 公路,2009(1):213-218.
WU Guang-huai, YU Qun-li, CHEN Xu-jun. An energy consumed collision-prevention system of long distance anchor moving for non-navigational bridge[J]. Highway, 2009(1): 213-218. (in Chinese)
- [10] 祝世华. 海上大型桥梁非通航孔防撞问题研究[J]. 港工技术, 2011,48(6):12-14,49.
ZHU Shi-hua. Anti-collision study on non-navigable openings of large sea bridge[J]. Port Engineering Technology, 2011, 48(6): 12-14, 49. (in Chinese)
- [11] 陈国虞,倪步友,张澄,等. 跨海湾(河湾)桥梁非通航孔柔性拦船防撞装置[J]. 广东造船,2011,30(1):38-41.
CHEN Guo-yu, NI Bu-you, ZHANG Cheng, et al. Flexible ship-bridge collision protection for the piers of un-navigable spans of bay bridge[J]. Guangdong Shipbuilding, 2011, 30(1): 38-41. (in Chinese)
- [12] 陈云鹤,朱应欣,宋刚,等. 运河桥梁浮式防船撞设施的模拟计算[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2009,10(6): 559-564.
CHEN Yun-he, ZHU Ying-xin, SONG Gang, et al. Simulation calculation of floating-facility for anti-collision between ship and bridge over canal[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 10(6): 559-564. (in Chinese)
- [13] 陈徐均,黄光远,吴广怀. 船舶撞击锚泊防撞系统的能量平衡关系分析[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2009,10(1): 71-76.
CHEN Xu-jun, HUANG Guang-yuan, WU Guang-huai, et al. Energy balance relationship in collision between ship and moored collision-prevention system[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 10(1): 71-76. (in Chinese)
- [14] 陈徐均,黄光远,吴广怀,等. 柔性浮式系统受撞后运动的算法

- 及其收敛性[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2011, 12(5):501-506.
- CHEN Xu-jun, HUANG Guang-yuan, WU Guang-huai, et al. New numerical method for flexible floating collision-prevention system and its convergency discussion[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 12(5): 501-506. (in Chinese)
- [15] CHEN Xu-jun, HUANG Guang-yuan, WU Guang-huai, et al. Numerical simulation for the motion of the flexible floating collision-prevention system[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2013, 135(1): 1-9.
- [16] KOTERAYAMA W. Motions of moored floating body and dynamic tension of mooring lines in regular waves[R]. Hakon; Kyushu University, 1978.
- [17] KOTERAYAMA W, NAKAMURA M. Hydrodynamic forces acting on a vertical circular cylinder oscillating with a very low frequency in waves[J]. Ocean Engineering, 1988, 15(3): 271-287.
- [18] KOTERAYAMA W, NAKAMURA M. Drag and inertia force coefficients derived from field tests[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1992, 2(3): 162-167.
- [19] TOSHIO N. A study of the dynamics of various types by lumped mass method[D]. Tokyo: University of Tokyo, 1991.
- [20] BLIEK A. Dynamic analysis of single span cables[D]. Boston; Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [21] NAKAMURA M, KOTERAYAMA W, KYOZUKA Y. Slow drift damping due to drag forces acting on mooring lines[J]. Ocean Engineering, 1991, 18(4): 283-296.
- [22] SHASHIKALA A P, SUNDARAYADIVELU R, GANAPATHY C. Dynamics of a moored barge under regular and random waves[J]. Ocean Engineering, 1997, 24(5): 401-430.
- [23] FREIRE A M S, NEGRAO J H O, LOPES A V. Geometrical nonlinearities on the static analysis of highly flexible steel cable-stayed bridges[J]. Computers and Structures, 2006, 84(31/32): 2128-2140.
- [24] DANIELL W E, MACDONALD J H G. Improved finite element modelling of a cable-stayed bridge through systematic manual tuning[J]. Engineering Structures, 2007, 29(3): 358-371.
- [25] 罗伟铭, 石少卿, 田镇华, 等. 钢丝增强复合条带抗弹性能数值分析[J]. 后勤工程学院学报, 2014, 30(5): 6-9, 46.
- LUO Wei-ming, SHI Shao-qing, TIAN Zhen-hua, et al. Numerical analysis of anti-bullet performance of steel-reinforced composite strip[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2014, 30(5): 6-9, 46. (in Chinese)
- [26] 李 斌, 韦成龙, 陈积光, 等. 能量法计算线弹性结构位移[J]. 湖南理工学院学报:自然科学版, 2014, 27(4): 43-45, 92.
- LI Bin, WEI Cheng-long, CHEN Ji-guang, et al. Calculation of displacement of linear elastic structure with energy method[J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology: Natural Sciences, 2014, 27(4): 43-45, 92. (in Chinese)
- [27] 李启定, 李克天. 微位移工作台柔性铰链参数分析和优化[J]. 机电工程技术, 2015, 44(1): 72-75.
- LI Qi-ding, LI Ke-tian. Optimized and parameters analysis of flexible hinge micro-displacement[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2015, 44(1): 72-75. (in Chinese)